

Główny Instytut Górnictwa

Zakład Geologii i Geofizyki

---



## Rozprawa doktorska

mgr Sławomir Siwek

Związek zmian obciążeń grawitacyjnych górotworu  
z sejsmicznością indukowaną  
w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.

Promotor pracy:

dr hab. inż. Grzegorz Mutke prof. GIG

Promotor pomocniczy pracy:

dr inż. Andrzej Kotyrba

Katowice, 2021



Składam serdeczne podziękowania promotorowi pomocniczemu Panu dr inż. Andrzejowi Kotyrbie za życzliwość, cenne rady i wskazówki oraz wszelką pomoc w realizacji tej pracy oraz promotorowi Panu dr hab. inż. Grzegorzowi Mutke prof. GIG za udzielone wsparcie i rzeczową dyskusję nad wynikami. Dziękuję również Żonie i Córce, za cierpliwość i mobilizację do przygotowania niniejszej rozprawy.





## **Streszczenie pracy**

W sejsmologii ogólnej zajmującej się naturalnymi trzęsieniami litosfery jednym z elementów przyjmowanych jako przyczyna ich wystąpienia w określonym czasie, jest oddziaływanie periodycznych zmian pola siły ciężkości na litosferę Ziemi. Oddziaływanie to będące efektem wzajemnego grawitacyjnego oddziaływania układu ciał niebieskich tj. Słońca, Ziemi i Księżyca przejawia się w formie tzw. pływów litosfery i ma charakter falowy. Poszukiwanie związku pomiędzy falami pływowymi i występowaniem trzęsień ziemi jest zagadnieniem rozpowszechnionym w świecie naukowym.

Podziemna eksploatacja węgla w GZW systemem ścianowym powoduje powstawanie znacznych naprężeń w skałach karbońskich o wartościach przekraczających ich wytrzymałość mechaniczną. Naprężenia te koncentrują się przed frontami ścianowymi i mają charakter okresowy. Ich wielkość wzrasta wraz z głębokością eksploatacji. W trakcie ruchu ścian naprężenia ulegają okresowej relaksacji powodując wstrząsy o relatywnie dużej energii. Górotwór za frontami ścianowymi ulega przeobrażeniom strukturalnym w strefie od powierzchni ziemi do poziomu eksploatacji. Warstwy skalne nadkładu za frontem ścian eksploatacyjnych ulegają łamaniu i kruszeniu w procesie zawału. Proces ten generuje wstrząsy górotworu o relatywnie małej energii. Oba wymienione procesy cyklicznie się powtarzają w trakcie ruchu ściany wydobywczej w pokładzie węgla.

W pracy dokonano badania związku pomiędzy czasem występowania wstrząsów sejsmicznych wywołanych podziemną eksploatacją złóż węgla kamiennego w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego a teoretycznymi i mierzonymi grawimetrem pływowym zmianami przyspieszenia siły ciężkości powodującymi okresowe, wolnozmiennie obciążenia i odciążenia górotworu. Dodatkowo, w analogii do jednej z metod statystycznych stosowanych w sejsmologii ogólnej, przeprowadzono analizę okresowości w 3 zbiorach danych o wstrząsach górniczych tzw. widmem Schustera. Dwa zbiory zawierają dane o wstrząsach, które wystąpiły w okresie od 2016 do 2019 roku w obszarze niecki górnośląskiej. Zbiory te zawierają wstrząsy zarówno górnicze jak i regionalne, których wychwycenie jest możliwe poprzez geometrię stanowisk sejsmologicznych sieci GRSS GIG (<https://grss.gig.eu>). Trzeci katalog zawiera dane o wstrząsach sejsmicznych, które wystąpiły w trakcie eksploatacji ściany w złożu węgla kamiennego, zarejestrowanych przez kopalnianą sieć sejsmologiczną KWK ROW ruch Rydułtowy (<https://tcs.ah-epos.eu>). W pierwszym etapie analizy zbiorów zbadana została zależność pomiędzy czasem wystąpienia wstrząsów (regionalnych i górniczych) a zmianą obciążenia grawitacyjnego górotworu. W toku pracy przyjęto, iż związek taki może istnieć w sytuacji wstrząsów, które występują w momencie maksymalnego dociężenia lub odciążenia grawitacyjnego skorupy ziemskiej. Na przebieg krzywych wyznaczonych teoretycznie oraz zaobserwowanych pomiarami grawimetrami pływowymi zmian przyspieszenia siły ciężkości nałożono czasy wystąpienia wstrząsów indukowanych.

W efekcie uzyskano dane z których wynika, że dla zbioru który porównano z teoretycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości, blisko 30% wstrząsów indukowanych w okresie 2016 – 2018 r. wystąpiło w momencie maksymalnego dociężenia lub odciążenia grawitacyjnego skorupy ziemskiej. Natomiast porównanie zbioru z 2019 r. z rzeczywistymi, pomierzonymi grawimetrem pływowym *gPhone-X* zmianami przyspieszenia siły ciężkości wykazało iż dla około 40% wstrząsów indukowanych czas ich wystąpienia można powiązać z momentem maksymalnego dociężenia lub odciążenia grawitacyjnego skorupy ziemskiej. Poszukiwanie okresowości w zbiorach z zastosowaniem widma Schuster'a, szczególnie dla okresów odpowiadających głównym falom pływu litosferycznego nie dostarczyło jednoznacznej informacji o istnieniu lub braku takiej zależności dla badanych zbiorów.

### **Słowa kluczowe:**

obciążenia grawitacyjne, pływy litosferyczne, wstrząsy indukowane eksploatacją górniczą, ciągły monitoring sejsmiczny, ciągły monitoring grawimetryczny

## **Summary:**

In seismology dealing with natural lithospheric quakes one of the elements assumed as the cause of their occurrence at a certain time is influence of periodic changes of the force of gravity field on the Earth's lithosphere. This influence being the effect of the mutual gravitational interaction of the system of celestial bodies, i.e. the Sun, Earth and the Moon is manifested in the so-called tides of the lithosphere and has a wave character. The search for a connection between tidal waves and the presence of earthquakes is a widespread issue in the scientific world.

Underground coal mining exploitation in Upper Silesian Coal Basin with longwall system causes the formation of significant stresses in Carboniferous rocks with values exceeding their mechanical strength. These stresses are concentrated in front of the longwall fronts and are periodic in nature. The magnitude of stress increases with the depth of exploitation. As the longwalls move, these stresses relax periodically causing tremors of relatively high energy. The rock mass behind the longwall fronts undergoes structural transformations in the zone from the earth's surface to the exploitation's level. The overburden rock layers behind the mining longwall are subject to fracturing and crushing in the process of collapse. This process generates rock mass tremors of relatively low energy. Both mentioned processes are repeated cyclically during the operation of the mining longwall in the coal seam.

The study investigates the connection between the time of the seismic shock activities caused by the underground mining of hard coal deposits in the area of Upper Silesian Coal Basin and theoretical and measured with a tidal gravimeter changes in the acceleration of the gravity causing periodic and slow loads or unloads of rock mass. Additionally, in analogy to one of the statistical methods used in seismology, an analysis of the periodicity was carried out in three data sets on mining tremors so-called Schuster Spectrum. Two sets contain data on the shocks that occurred in the period from 2016 to 2019 in the area of Upper Silesian Basin. These collections include both mining and regional shocks which can be picked up by geometry of the seismological positions of the GRSS GIG (<https://grss.gig.eu>). Third set contains data on seismic shocks that occurred during the operations of the wall in the hard coal deposits recorded by the mine seismological network the KWK ROW Rydułtowy (<https://tcs.ah-epos.eu>). In the first stage of the collection analysis it was examined connection between the time of shocks (regional and mining) and change of the gravitational load of the rock mass. In the course of work it was accepted that such a connection may exist in shock situations that occur at the moment of maximum loading or unloading gravity of the Earth's crust. On the course of the theoretically determined curves and the changes in the acceleration of the heavy force observed by tides gravimeters, the time of occurrence of induced shocks was imposed.

As a result, the data was obtained which shows that for the collection compared with theoretical changes in the acceleration of the gravity, almost 30% of induced shocks in the period 2016-2018 occurred at the moment of maximum loading or unloading of the Earth's crust by gravity. On the other hand, a comparison of the 2019 collection with the actual changes in the acceleration of gravity measured by the tidal gravimeter gPhoneX showed that for about 40% of the shocks induced, the time of occurrence can be associated with the moment of maximum loading or unloading of the Earth's crust by gravity. The research for periodicity in sets using the Schuster spectrum, especially for periods corresponding to the main waves of lithospheric flow did not provide unambiguous information about the existence or absence of such dependence for the sets under study.

## **Keywords:**

gravitational loads, lithospheric tides, shocks induced by mining operations, continuous seismic monitoring, continuous gravimetric monitoring.

## Spis treści

1	Wprowadzenie.....	8
1.1	Cel i uzasadnienie podjęcia pracy.....	10
1.2	Zawartość pracy.....	12
2	Pływowe zmiany pola siły ciężkości Ziemi.....	14
2.1	Podstawy teoretyczne grawitacyjnych pływów litosfery Ziemi.....	15
2.2	Katalogi fal pływowych.....	19
2.3	Pływy oceaniczne.....	24
3	Inne czynniki powodujące zmiany przyspieszenia siły ciężkości.....	27
3.1	Ruch bieguna Ziemi.....	27
3.2	Zmiany hydrologiczne.....	29
3.3	Zmiany ciśnienia atmosferycznego.....	30
4	Sejsmiczność w GZW.....	32
4.1	Warunki geologiczno - górnicze w GZW.....	32
4.2	Mechanizmy wstrząsów indukowanych.....	34
5	Dotychczasowy stan badań związanych z podejmowaną problematyką.....	37
6	Metoda i zakres badań.....	44
6.1	Metoda analizy statystycznej.....	44
6.2	Dane pomiarowe zmian przyspieszenia siły ciężkości.....	48
7	Analiza i interpretacja danych.....	51
7.1	Katalog GRSS (1) 2016-2018 - pływy syntetyczne.....	51
7.2	Katalog GRSS (2) 2019 – pływy rzeczywiste (gPhoneX-157).....	61
7.3	Katalog ROWR19 – pływy rzeczywiste (gPhoneX-155).....	69
8	Analiza możliwości wykorzystania związków pływy – wstrząsy antropogeniczne dla obszaru GZW.....	87
9	Wnioski.....	89
10	Literatura.....	91
11	Spis tabel.....	95
12	Spis rysunków.....	96

# 1 Wprowadzenie

Próby zrozumienia i określenia mechanizmu zjawisk będących przyczyną wstrząsów górotworu są przedmiotem badań wielu naukowców i ośrodków naukowych na świecie. Przyczyny te generalnie dzieli się na naturalne i antropogeniczne. Do naturalnych wstrząsów sejsmicznych dochodzi wskutek ruchów górotworu w strefach kontaktów płyt litosferycznych, w rejonach aktywnych stref uskokowych i obszarach wulkanicznych. Szczególnym przypadkiem wstrząsów, są te zachodzące wskutek oddziaływania człowieka na górotwór w procesie wydobywania kopalin. W obszarze Górnego Śląska od ok. XVI wieku prowadzona jest podziemna eksploatacja złóż węgla kamiennego, która z upływem kolejnych wieków prowadzona była coraz głębiej, sięgając obecnie w niektórych kopalniach głębokości 1200 metrów. Wraz ze zwiększaniem się głębokości eksploatacji zwiększała się liczba i energia wstrząsów górotworu.

W sejsmologii ogólnej zajmującej się wstrząsami naturalnymi jednym z elementów przyjmowanych jako przyczyna wystąpienia wstrząsu w określonym czasie jest oddziaływanie periodycznych zmian pola siły ciężkości na litosferę Ziemi. Oddziaływanie to przejawia się w formie tzw. pływów litosfery i ma charakter falowy. Poszukiwanie związku pomiędzy falami pływowymi i występowaniem trzęsień ziemi jest zagadnieniem rozpowszechnionym w świecie naukowym. Deformacje pływowe litosfery stanowią elastyczną odpowiedź jej bryły na wzajemne oddziaływanie grawitacyjne układu ciał niebieskich tj. Słońca, Ziemi i Księżyca. Obserwowane na średnich szerokościach geograficznych zmiany pola siły ciężkości są rzędu  $300\mu\text{Gali/dobę}$  (Timmen 2010). Powoduje to odkształcenia litosfery rzędu 0,4m w okresie czasu 1 doby (Heaton 1975) natomiast zmiany naprężeń w litosferze osiągają wartości na poziomie  $10^3\text{ Pa}$  (Varga i Grafarend 2018). Dla układu skał, w którym prowadzona jest eksploatacja górnicza, a znajdującego się blisko wartości krytycznych naprężeń, nawet niewielkie oddziaływanie fal pływowych może być zatem inicjatorem wstrząsu.

Badania w celu określenia związku odkształceń litosfery wywołanych okresowymi zmianami pola siły ciężkości z wstrząsami górotworu wykonywane były dotychczas dla obszarów o naturalnej aktywności sejsmicznej tj. stref kontaktowych płyt litosfery, rejonów wulkanicznych itd., a więc dla zdarzeń sejsmicznych o dużo większej energii niż te obserwowane na Górnym Śląsku. W pracy po raz pierwszy podjęto się określenia istnienia takiego związku dla obszaru o małej sejsmiczności naturalnej natomiast dużej sejsmiczności indukowanej (antropogenicznej) wywołanej podziemną eksploatacją złóż węgla kamiennego.

Dotychczas dane o wstrząsach sejsmicznych analizowano w odniesieniu do syntetycznych wartości grawitacyjnego pływu litosfery, wyznaczonych dla przyjętych przez Międzynarodową Unię

Geodezji i Kartografii (IUGG) modeli geometrycznych kuli ziemskiej. Te syntetyczne dane są skatalogowane i pozwalają na określenie parametrów grawitacyjnej fali pływowej w zależności od szerokości i długości geograficznej w każdym punkcie kuli ziemskiej. W niniejszej pracy dane o wstrząsach górniczych analizowane są w odniesieniu do rzeczywistych zmian pola grawitacji, rejestrowanych przez grawimetry pływowe (typu gPhoneX), na stanowiskach w Katowicach i Rybniku.

W niniejszej pracy zastosowano elementy testu Schuster'a, jednego z podstawowych narzędzi analizy harmonicznej służącego do badania okresowości w zbiorach danych, którymi są szeregi czasowe. Na tej podstawie zbadano czy istnieje związek pomiędzy zmianą obciążenia grawitacyjnego litosfery a czasem występowania wstrząsów górniczych. Dodatkowo, zbadano z zastosowaniem widma testu Schustera okresowość występowania wstrząsów indukowanych. Stwierdzenie jej obecności w analizowanych zbiorach danych pozwalałoby na wprowadzenie predykcji czasu ich wystąpienia.

## 1.1 Cel i uzasadnienie podjęcia pracy

Celem rozprawy jest badanie zależności pomiędzy okresowymi zmianami pola siły ciężkości powodującymi zmienne w czasie odkształcenia litosfery (nazywane falami pływu litosferycznego) a występowaniem wstrząsów sejsmicznych w kopalniach węgla kamiennego. Wstrząsy spowodowane są zaburzeniem stanu równowagi mechanicznej górotworu w rejonach prowadzonej eksploatacji. Badanie przeprowadzono metodą analizy obliczonych teoretycznie (dla modelu kuli ziemskiej) oraz mierzonych, rzeczywistych zmian przyspieszenia pola siły ciężkości grawimetrem pływowym. Obserwacje pływowych zmian pola siły ciężkości wskazują, iż część wstrząsów indukowanych działalnością zakładów górniczych eksploatujących złoża węgla kamiennego na terenie GZW występuje w czasie maksymalnego dociążenia lub odciążenia górotworu falą pływową. Badanie tego związku przeprowadzono metodą analizy statystycznej danych o wstrząsach z katalogu Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej ([www.grss.gig.eu](http://www.grss.gig.eu)) oraz kopalnianej sieci sejsmologicznej PGG KWK Rydułtowy (dane udostępnione na platformie projektu EPOS-PL). Dane o wstrząsach z katalogu GRSS skorelowano z obliczonymi dla określonych modeli kuli ziemskiej pływami litosferycznymi dla punktu w Katowicach oraz z danymi z pomiarów grawimetrami pływowymi w Katowicach i Rybniku. Zbiór danych z kopalnianej sieci sejsmologicznej obejmował katalog wstrząsów zarejestrowanych w czasie prowadzenia ściany VIII-E E1 w pokładzie 703/1 na głębokości 1000 – 1100m. Badanie związku pomiędzy czasem występowania wstrząsów a pływami przeprowadzono z wykorzystaniem elementu tzw. testu Schuster'a (metoda analizy harmonicznej stosowanej w sejsmologii ogólnej służąca do wyszukiwania okresowości w zbiorach danych) w którym określane jest położenie momentu wystąpienia wstrząsu względem sumarycznego teoretycznego i rzeczywistego efektu grawitacyjnego. Dodatkowo z wykorzystaniem widma testu Schuster'a przeprowadzono badanie na istnienie okresowości w analizowanych katalogach wstrząsów, które można by powiązać z okresami najważniejszych fal pływu litosferycznego.

*Nowości w pracy:*

1. Prace dążące do określenia związków pływów litosferycznych z występowaniem wstrząsów sejsmicznych prowadzone były dotychczas dla obszarów o naturalnej aktywności sejsmicznej tj. stref kontaktowych płyt litosferycznych i rejonów wulkanicznych. A więc dla wstrząsów sejsmicznych o dużo większej energii niż te obserwowane na Górnym Śląsku. W pracy po raz pierwszy wykonano taką analizę dla obszaru o małej aktywności sejsmiczności naturalnej, natomiast dużej sejsmiczności indukowanej (antropogenicznej) wywołanej podziemną eksploatacją górnictwem złóż węgla kamiennego.

2. *Dotychczasowe badania związku pomiędzy zmiennymi w czasie obciążeniami pływowymi górotworu a aktywnością sejsmiczną w kopalniach węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego prowadzono metodą analizy teoretycznie obliczonych wartości naprężeń pływowych jakie powinny wystąpić w górotworze wskutek oddziaływania okresowych zmian natężenia pola—grawitacji ziemskiej. W niniejszej pracy aktywność sejsmiczną badano w odniesieniu do teoretycznych oraz mierzonych grawimetrami pływowymi zmian przyspieszenia siły ciężkości.*

## 1.2 Zawartość pracy

Rozdział 1 zawiera wprowadzenie do rozprawy oraz przedstawienie celów jej realizacji.

Rozdział 2 przedstawia fizyczne podstawy pływów Ziemi wywołanych oddziaływaniem innych ciał niebieskich, szczególnie Księżyca i Słońca. Omówiono związek oddziaływań pływowych ze zmianą przyspieszenia siły ciężkości dla punktu znajdującego się na powierzchni Ziemi. Przedstawiono rozwój badań nad falami pływowymi, budowę katalogów fal pływowych. W rozdziale przedstawiono wyznaczony na podstawie danych katalogowych o falach pływowych syntetyczny efekt zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołany pływem litosferycznym dla stanowiska Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego (GOG) w Katowicach, gdzie zainstalowany jest jeden z grawimetrów pływowych *gPhoneX* a który jest podstawą przeprowadzenia pierwszej części pracy badawczej. W ostatniej części rozdziału przybliżono pływ oceaniczny, będący wtórnym efektem pływu litosferycznego, również wyznaczając jego zmiany w polu przyspieszenia siły ciężkości.

Rozdział 3 zawiera charakterystykę pozostałych najważniejszych czynników wpływających na zmiany przyspieszenia siły ciężkości w punkcie obserwacyjnym. Ruch bieguna Ziemi, zmiany hydrologiczne oraz zmiany ciśnienia atmosferycznego są ważnymi czynnikami uwzględnianymi przy wyznaczaniu wartości absolutnych przyspieszenia siły ciężkości w punkcie pomiarowym. W rozdziale wyznaczono ich efekty w postaci zmian przyspieszenia siły ciężkości jakie wywierają na punkt odpowiadający położeniem stanowisku w GOG.

Rozdział 4 przedstawia informacje o budowie geologicznej, tektonice oraz eksploatacji złóż węgla kamiennego w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Jednym z istotnych dla mieszkańców regionu oraz zakładów górniczych efektów prowadzenia podziemnej eksploatacji złóż węgla jest występowanie wstrząsów sejsmicznych wywołanych przeobrażeniem górotworu. W rozdziale przedstawiono rozkład przestrzenny obserwowanych w Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej wstrząsów indukowanych podziemną eksploatacją węgla. Omówiono również mechanizmy, które odpowiadają za występowanie wstrząsów indukowanych w GZW.

Rozdział 5 to analiza literatury krajowej i zagranicznej związanej z określaniem związku pomiędzy pływem litosferycznym a czasem występowania wstrząsów sejsmicznych.

Rozdział 6 przybliży zastosowaną w pracy metodykę badawczą oraz narzędzia badawcze jakimi są dwa grawimetry pływowe *gPhoneX* produkcji Micro-g LaCoste (USA) o numerach seryjnych 157 i 155 zainstalowane w Katowicach i Rybniku.

Rozdział 7 to przedstawienie analizy i interpretacji uzyskanych wyników badań z rozdzieleniem na poszczególne, analizowane zbiory danych. W pracy przebadano trzy zbiory. Zbiór 1 to dane o wstrząsach z lat 2016 – 2018 z sieci sejsmologicznej GRSS, które zostały powiązane z wyznaczonymi



w rozdziale 2 syntetycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości. Zbiór 2 to dane z sieci GRSS z 2019 r. powiązane z rzeczywistymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości rejestrowanymi grawimetrem pływowym na stanowisku w Katowicach (teren pogórnicy). Trzeci zbiór stanowią dane z kopalnianej sieci sejsmologicznej KWK ROW ruch Rydułtowy związane z prowadzoną w 2019r. eksploatacją ściany VIII-E1 w pokładzie 703/1 i powiązanie ich z rzeczywistymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości rejestrowanymi grawimetrem pływowym na stanowisku w Rybniku (teren górniczy).

Rozdział 8 stanowi analizę porównawczą wyników uzyskanych w badanych katalogach danych.

Rozdział 9 to podsumowanie pracy.

## 2 Pływowe zmiany pola siły ciężkości Ziemi

Wartość przyspieszenia siły ciężkości, jaka obserwowana jest w dowolnym punkcie na powierzchni Ziemi z wykorzystaniem zarówno najprostszyc jak i najnowocześniejszych przyrządów pomiarowych, obciążona jest szeregiem czynników powodujących ciągłe jej zmiany. Podstawową jednostką wyrażającą przyspieszenie siły ciężkości jest  $m/s^2$ . Jednakże w grawimetrii, w literaturze krajowej i zagranicznej, powszechnie stosowana jest jednostka pochodna – Gal, a z uwagi na osiągnięte poziomy dokładności pomiarowej jej pochodna, czyli mikroGal  $\mu Gal$ , gdzie  $1\mu Gal = 10^{-8}m/s^2 = 10^{-3}mGal = 10\text{ nm}/s^2$ . W tabeli nr 1 zestawiono najważniejsze i największe pod względem amplitudy (powyżej  $1\mu Gal$ ) źródła i przedziały zmian przyspieszenia siły ciężkości (efekt grawitacyjny) obserwowane w punkcie pomiarowym na powierzchni Ziemi (za Neumeyer 2010).

Tab. 1. Zestawienie najważniejszych źródeł zmian pola siły ciężkości w punkcie na powierzchni Ziemi (Neumayer 2010)

Okres oddziaływania	Źródło fizyczne	Efekt grawitacyjny
~ 0.1 – 10 sekund	szum mikrosejsmiczny (naturalny i antropogeniczny)	do 10 $\mu Gal$
~ 0.1 – 100 sekund	trzęsienia Ziemi	tysiące $\mu Gal$
6 godzin – 1 rok	pływy litosferyczne	do 300 $\mu Gal$
6 godzin – 1 rok	pływy oceaniczne	do 20 $\mu Gal$
godziny do lat	niepływowe zmiany mas oceanów	do 2 $\mu Gal$
minuty do lat	zmiany ciśnienia atmosferycznego	do 20 $\mu Gal$
minuty do lat	zmiany hydrologiczne	do 10 $\mu Gal$ /m
do 435 dni	ruch bieguna Ziemi	do 10 $\mu Gal$

Z powyższego zestawienia wynika, iż największe efekty grawitacyjne powodują trzęsienia Ziemi, zarówno naturalne (Neumeyer 2010) jak i antropogeniczne, w tym wywołane eksploatacją górnictw (Kotyrbka i Kortas 2020). Są to jednak efekty krótkotrwałe obejmujące okresy od kilku, kilkunastu sekund dla bliskich wstrząsów górnictw do kilku godzin dla dalekich i silnych trzęsień Ziemi.

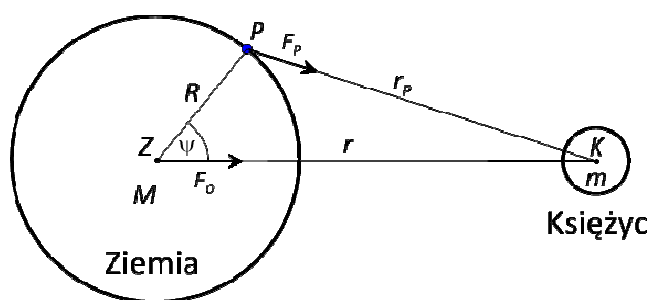
Wzajemne oddziaływanie grawitacyjne ciał niebieskich Układu Słonecznego oraz ruch obrotowy Ziemi i wywołane tym zmiany siły ciężkości oddziałującej na litosferę Ziemi, powodują powstawanie największego pod względem amplitudy zjawiska geodynamicznego jakim są pływy litosferyczne. Z uwagi na dobrze poznany ruch ciał niebieskich względem Ziemi (przede wszystkim Księżyca i Słońca) możliwe jest precyzyjne określenie teoretycznego efektu pływowego dla dowolnego punktu na powierzchni Ziemi, w dowolnym momencie czasu. Pozostałe czynniki: pływy oceaniczne, zmiany ciśnienia atmosferycznego, hydrologiczne czy ruch bieguna wywołują zmiany do 1 do 20  $\mu Gal$ , a więc o przynajmniej rząd wielkości mniejsze i bliskie dokładności

pomiarowej urządzeń grawimetrycznych. Niemniej w określonych momentach czasu poprzez wzajemne złożenie, efekt ich oddziaływania może w wyraźny sposób zmieniać mierzone wartości siły ciężkości.

## 2.1 Podstawy teoretyczne grawitacyjnych pływów litosfery Ziemi

Obserwowane efekty wzajemnego oddziaływania Ziemi i innych obiektów w przestrzeni, zgodnie z prawem powszechnego ciężenia noszą nazwę zjawisk pływowych. Wynikają one z ruchu obrotowego Ziemi oraz wzajemnego, grawitacyjnego oddziaływania Ziemi i innych obiektów Układu Słonecznego, szczególnie najbliższego - Księżyca oraz największego pod względem masy własnej - Słońca. Deformacje pływowe Ziemi stanowią jej elastyczną odpowiedź na zmianę wartości przyspieszenia grawitacyjnego wywołwaną przede wszystkim przez Księżyc i Słońce (Wang 1997, Wenzel 1997). Oddziaływanie pozostałych obiektów układu słonecznego jest obecnie pomijane, z uwagi na bardzo małą wartość tych oddziaływań – od 6 do 14 rzędów niższe względem wartości oddziaływania Księżyca i Słońca. Są to wartości znacznie poniżej możliwości pomiarowych współczesnych grawimetrów. O wielkości oddziaływania sił pływowych decydują przede wszystkim trzy czynniki: odległość pomiędzy Ziemią a Księżycem, odległość pomiędzy Ziemią a Słońcem oraz wzajemne ustawienie Słońca, Ziemi i Księżyca – z granicami w kwadrze i syzygium. Dla pływu występującego w czasie syzygium, a więc gdy Słońce, Ziemia i Księżyc znajdują się w jednej linii, obserwowane pływy są najwyższe, natomiast w kwadrze – najniższe. Dodatkowo pływy słoneczne stanowią ilościowo 45,9% pływów księżycowych (Simon et al. 2013).

Siły pływowe powstają wskutek grawitacyjnego oddziaływania obiektów znajdujących się w przestrzeni ponad Ziemią powodując zmiany w jej polu grawitacyjnym oraz odkształcenia jej figury. Najczęściej przytaczany opis fizyczny dwóch wzajemnie oddziałujących ciał niebieskich przedstawia układ zawarty na rysunku 1. W układzie tym Ziemia pozostaje sztywnym ciałem kulistym z pomijanym jej ruchem obrotowym, natomiast oddziałujące ciało niebieskie (Księżyc, Słońce) stanowi jednostkowy punkt materialny o masie  $m$ .



Rys. 1. Geometria układu wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego Ziemi i Księżyca.

Siła przyciągania punktu  $P$  przez Księżyc zgodnie z prawem Newton'a wynosi:

$$F_P = \frac{Gm}{r_p^2} \quad (1)$$

gdzie:

$G$  – stała grawitacyjna  $(6,67259 \pm 0,85) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

$r_p$  - odległość topocentryczna ciała niebieskiego (Księżyc)

$m$  – masa ciała niebieskiego (Księżyc)

natomiast potencjał siły przyciągania:

$$V_P = \frac{Gm}{r_p} \quad (2)$$

Poprzez trójkąt ZPK (rysunek nr 1) można powiązać odległości geocentryczną i topocentryczną oddziaływującego ciała niebieskiego z promieniem Ziemi. Przy zastosowaniu wielomianów Legendre'a ( $P_n$ ) uzyskujemy zależność (Barlik 2001):

$$\frac{1}{r_p} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R^n}{r^n} P_n(\cos \psi) \quad (3)$$

gdzie:

$r$  – odległość geocentryczna ciała niebieskiego (Księżyc)

$r_p$  – odległość topocentryczna ciała niebieskiego (Księżyc)

$R$  – promień równikowy Ziemi (6378136.6m)

$\psi$  – odległość zenitalna Księżyc

$P_n$  – wielomiany Legendre'a

zatem potencjał siły przyciągania masy  $m$  układu dwóch ciał niebieskich w punkcie  $P$  wynosi:

$$V_P = \frac{Gm}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R^n}{r^n} P_n(\cos \psi) \quad (4)$$

gdzie dla  $n \neq 0$  składnik sumy w równaniu jest zależny od promienia Ziemi ( $R$ ) oraz kąta odległości zenitalnej ( $\psi$ ) Księżyc w punkcie  $P$ . Potencjał pływowy w punkcie  $P$  wynika z różnicy sił przyciągania przyłożonych w tym punkcie i w środku Ziemi. Powoduje to, iż równanie potencjału można ograniczyć do wyrazów drugiego rzędu:

$$V_{pł} = V_P - V_Z = \frac{Gm}{r^2} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{R^n}{r^n} P_n(\cos \psi) \quad (5)$$

Wówczas wykorzystując wielomiany Legendre'a w postaci:

$$P_1(\cos \psi) = \cos \psi$$

$$P_2(\cos \psi) = 1,5 \cos^2 \psi - 0,5$$

uzyskuje się równanie potencjału pływowego (Barlik 2001):

$$V_{pł} = -\frac{Gm R^2}{2 r^3} (3 \cos^2 \psi - 1) \quad (6)$$

Wyrażenie to, odnoszące się do oddziaływania Księżyca, w podobny sposób jest wyznaczane dla układu Ziemia – Słońce. Analogicznie wyraża się zmianę siły ciężkości w punkcie (różniczka potencjału):

$$\delta g = \frac{Gm}{r^3} (3\cos^2 \psi - 1) \quad (7)$$

Postępując za Czarnecki (2014) odległość zenitalną ciała niebieskiego ( $\psi$ ) można zastąpić, za pomocą trójkąta paralaktycznego, związkiem wyrażonym poprzez współrzędne sferyczne:

$$\cos \psi = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t \quad (8)$$

gdzie:

$\psi$  – odległość zenitalna Księżyca

$\delta$  – deklinacja (geocentryczna szerokość Księżyca)

$t$  – kąt godzinny ciała niebieskiego (Księżyca)

$\varphi$  – szerokość geocentryczna punktu na powierzchni Ziemi, którą można zastąpić szerokością geodezyjną

Wówczas potencjał sił pływowych wyraża się wzorem:

$$V_{pl} = \frac{3}{4} \frac{GmR^2}{r^3} \left[ \cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2t + \sin 2\varphi \sin 2\delta \cos t + 3 \left( \cos^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left( \sin^2 \delta - \frac{1}{3} \right) \right] \quad (9)$$

Z powyższego równania (9) wynikają główne rodzaje identyfikowanych fal pływowych Ziemi. Mówi się wówczas o pływach litosferycznych, nazywanych również pływami Ziemi stałej (ang. rigid Earth lub solid Earth), gdyż pływy te są zmianami obserwowanymi na realistycznej, ale pozbawionej oceanów Ziemi. (Agnew 2007). Pierwszy człon – sektorowy - opisuje półdobową (ok. 2 cpd – z ang. cycle per day – ilość cykli na dobę) harmoniczną falę powierzchniową (Barlik 2001). Drugi człon równania – tesseralny – opisuje fale pływowe o okresie zbliżonym do doby (1 cpd). Trzeci człon opisuje natomiast fale zonalne (strefowe), a więc fale charakteryzujące się krótkim okresem trwania (0.07cpd i mniejszy). Ta część została rozwinięta w podrozdziale *Katalogi fal pływowych*.

Ponieważ w rzeczywistości Ziemia nie jest ciałem sztywnym, a odkształca się pod wpływem oddziaływujących sił, pełna wartość potencjału siły ciężkości w punkcie  $P$  składa się z czterech części (za Barlik 2001): pierwotnego potencjału siły ciężkości ( $W_p$ ), potencjału pływowego ( $V_p$ ) wywołanego oddziaływaniem ciał niebieskich, zmiany potencjału początkowego ze względu na deformację Ziemi ( $\Delta W_p$ ) oraz zmiany potencjału ze względu na przemieszczenie radialne (pionowe) punktu obserwacji ( $-ug$ ). Obserwowany wówczas potencjał siły ciężkości ma postać:

$$W = W_p + V_p + \Delta W_p - ug = W_p + V_p(1 + k - h) \quad (10)$$

gdzie:

$g$  – przyspieszenie siły ciężkości

$h$  – pierwsza liczba Love'a

$k$  – druga liczba Love'a

$u$  – przemieszczenie radialne (pionowe) punktu powierzchni Ziemi (obserwacji)

i jest uzależniony od wartości parametrów przyjętego modelu elastycznego Ziemi opartego o wyznaczone przez Love'a w 1911 (Love 1911) bezwymiarowe liczby  $h$  i  $k$ . Liczba  $h$  określana jako *pierwsza liczba Love'a*, wiąże wielkość radialnego przesunięcia  $u$  powierzchni Ziemi i potencjału pływowego równaniem:

$$u = h \left( \frac{V_P}{g} \right) \quad (11)$$

Z zależności tej wynika, iż liczba  $h$  stanowi stosunek wielkości radialnych przemieszczeń powierzchni Ziemi do wysokości pływu statycznego (Bogusz i Figurski 2010). Wartość liczby  $h$  zmienia się w przedziale od 0 do 1, przyjmując wartość 0 dla Ziemi opisanej jako ciało idealnie sztywne i 1 jako ciało idealnie sprężyste. Natomiast liczba  $k$ , określana jako *druga liczba Love'a* wiąże wielkość potencjału początkowego i potencjału wywołanego oddziaływaniem ciał niebieskich i wyraża się równaniem:

$$\Delta W_P = k V_P \quad (12)$$

Różniczkując wyrażenie (10) względem promienia  $r$  uzyskuje się równanie opisujące zmiany obserwowanych wartości przyspieszenia siły ciężkości  $g$  w punkcie obserwacji (Czarnecki 2014):

$$g + \delta_g g = g - \left( 1 - \frac{3}{2}k + h \right) \frac{\partial V_P}{\partial r} \quad (13)$$

Element równania  $\delta_g g$  stanowi efekt oddziaływania pływów i sprężystej deformacji Ziemi na przyspieszenie siły ciężkości (Barlik 2001). Z równania (13) wynikają dwa wyrażenia (Czarnecki 2014):

$$\delta_g = 1 - \frac{3}{2}k + h \quad \gamma = (1 + k - h) \quad (14)$$

gdzie:

$\delta_g$  – współczynnik grawimetryczny

$\gamma$  – współczynnik niwelacyjny

$h$  – pierwsza liczba Love'a

$k$  – druga liczba Love'a

Współczynnik grawimetryczny  $\delta_g$  i współczynnik niwelacyjny  $\gamma$  służą do wyznaczenia pływowej deformacji pionowej. Współczynnik grawimetryczny jest jednym z ważniejszych parametrów pływów służącym do ich porównania z obserwacjami zmian pola siły ciężkości na powierzchni Ziemi. Jego definicja, zatwierdzona przez ICET (International Center for Earth Tides) mówi, iż w domenie częstotliwości, pływowy współczynnik grawimetryczny jest funkcją przeniesienia między siłą pływową wywieraną wzdłuż prostopadłej do elipsoidy i zmianą siły ciężkości wzdłuż pionu, mierzonej za pomocą grawimetru (Dehant et al. 1999). W wyniku elastycznego odkształcania się Ziemi przy wyznaczaniu wartości  $g$ , uwzględniane są również parametry odnoszące się do zachodzącego przesunięcia poziomego punktu obserwacji:

$$A = 1 + k - l \quad (15)$$

gdzie:

$A$  – przesunięcie poziome punktu powierzchni Ziemi (obserwacji)

$k$  – druga liczba Love'a

$l$  – liczba Schida

Przytoczony w powyższym wyrażeniu parametr  $l$  – *liczba Schida* jest trzecią bezwymiarową liczbą opisującą elastyczne poziome odkształcenia Ziemi. Wartość tego parametru, wyznaczonego w 1912 roku przez Schida dla jednorodnej Ziemi o module sztywności  $\mu$  oblicza się z równania (Barlik 2001):

$$l = \frac{3}{4} \left( 1 + 7,5 \frac{\mu}{\delta g R} \right)^{-1} \quad (16)$$

gdzie:

$l$  – liczba Schida

$\mu$  – moduł sztywności

$\delta_g$  – współczynnik grawimetryczny

$g$  – przyspieszenie siły ciężkości

$R$  – promień równikowy Ziemi

Wyznaczone na podstawie modeli budowy wewnętrznej Ziemi opartych na analizie rejestracji przebiegu fali P (Takeuchi 1950; Melchior 1983) liczby Love'a zawierają się w przedziałach:  $0,59 < k < 0,62$  oraz  $0,28 < k < 0,30$  oraz liczby Schida w przedziale  $0,07 < l < 0,08$ .

Równanie (13) opisujące zmiany obserwowanych wartości przyspieszenia siły ciężkości  $g$  w punkcie obserwacji wraz z wyznaczonymi parametrami liczb Love'a i Shida opisuje odkształcanie się Ziemi wskutek oddziaływania sił pływowych wywołanych obecnością ciał niebieskich w sąsiedztwie Ziemi. Są one w dużym stopniu uzależnione od miejsca położenia punktu obserwacji oraz przyjętego modelu budowy Ziemi.

## 2.2 Katalogi fal pływowych

Z uwagi na ruch obrotowy Ziemi i stale zmieniającą się odległość Słońca i Księżycy od Ziemi, obliczane teoretycznie pływy Ziemi stałej (ang. *rigid Earth* lub *solid Earth*) obejmują dużą liczbę fal pływowych (pływów częściowych). W poprzednim rozdziale przytoczone zostały podstawy fizyczne obliczenia funkcjonatów potencjału pływowego wyznaczone dla wybranego stanowiska i okresu czasu. Potencjał pływowy można rozszerzyć w stałe sferyczne harmoniczne. Analiza spektralna sferycznych harmonicznych potencjału pływowego pozwala wyznaczyć katalogi potencjałów pływowych – tabele amplitud, faz i częstotliwości wybranych fal pływowych. Obecnie dostępnych jest przynajmniej kilka katalogów fal pływowych z różną liczbą fal pływowych i różną dokładnością

(Wenzel 1997). Pierwszą klasyfikację fal pływowych wykonał w 1883r. George Darwin i przyjęty przez niego system literowego oznaczania kolejnych fal stosowany jest do dzisiaj. Pierwszy, powszechnie stosowany katalog fal wyznaczył z kolei w 1921 r. Doodson (Doodson 1921) opisując w nim 378 fal. Jednocześnie wprowadził swoją nomenklaturę oznaczania fal opartą na tym, że częstotliwość dowolnej harmoniki jest sumą wielokrotności kilku podstawowych częstotliwości. W niniejszej pracy przyjęto oznaczenia Darwin'a, z uwagi na ich wykorzystanie przez twórców oprogramowania TSoft, pozwalającego na obliczenia pływów syntetycznych oraz przetwarzanie danych uzyskanych z pomiarów grawimetrycznych. Kolejne uznane katalogi wyznaczyli: Cartwright, Tayler i Eden (Cartwright i Tayler 1971; Cartwright i Eden 1973) – 505 fal, Tamura (Tamura 1987) – 1200 oraz obecnie najczęściej stosowany katalog HW95 (Hartmann i Wenzel 1995), w którym wyznaczonych zostało 12 935 fal pływowych. Katalog ten uwzględnia poza Księżycem i Słońcem, również najbliższe Ziemi planety Układu Słonecznego oraz jej spłaszczenie. Kolejny katalog – WDD (Dehant et al. 1999), zbudowany został podobnie jak HW95, ale dodatkowo opiera się na modelu budowy Ziemi, zakładającym, iż Ziemia jest elipsoidalna z nieelastycznym płaszczem, nie obciążonym wpływem oceanów, dla którego uwzględniony jest wpływ konwekcji w płaszczu i jej deformacje na granicach oraz obserwacje okresu swobodnej nutacji jądra Ziemi i dynamicznego spłaszczenia zarówno jądra jak i całej planety. Najnowszy katalog jest opisany przez Kudryavtsev'a w 2004 r. (Agnew 2007) i zawierają 28 806 fal, jednak wiele z wykazanych w katalogu fal i spodziewany ich efekt pływowy pozostaje poniżej progu pomiarowego stosowanych urządzeń badawczych.

Na podstawie równania potencjału pływowego (9) wyznaczone są główne rodzaje identyfikowanych fal pływowych Ziemi stałej: fale sektorowe, tesseralne oraz zonalne. Fale sektorowe to fale charakteryzujące się częstotliwością około 2cpd ( $\pm 0.2$ ), a więc o półdobowym cyklu. Osiągają maksimum na równiku. Fale tesseralne o częstotliwościach ok 1cpd ( $\pm 0.2$ ) osiągają maksimum dla szerokości geograficznych  $\pm 45^\circ$ , natomiast fale zonalne (długookresowe) osiągają maksimum dla biegunów. W tabeli 2 zestawiono najczęściej opisywane w literaturze fale pływowe wraz z oznaczeniami Darwina, liczbą Doodsona, okresem oraz teoretycznie wyznaczonym w pracy Dehanta (Dehant et al. 1999) współczynnikiem grawimetrycznym  $\delta_g$ . W ostatniej kolumnie uwidoczniono teoretyczne wartości amplitudy zmiany przyspieszenia siły ciężkości  $g$ , wyznaczone przez Wenzel (1997) dla punktu położonego na szerokości geograficznej  $48.3^\circ\text{N}$  oraz przez Timmen (2010) dla punktu położonego na szerokości geograficznej  $52.39^\circ\text{N}$ .



Tab. 2. Zestawienie wybranych fal pływowych. Wartości współczynnika grawimetrycznego za Dehant et al. (1999). Amplituda zmiany g za Wenzel (1997) i Timmen (2010).

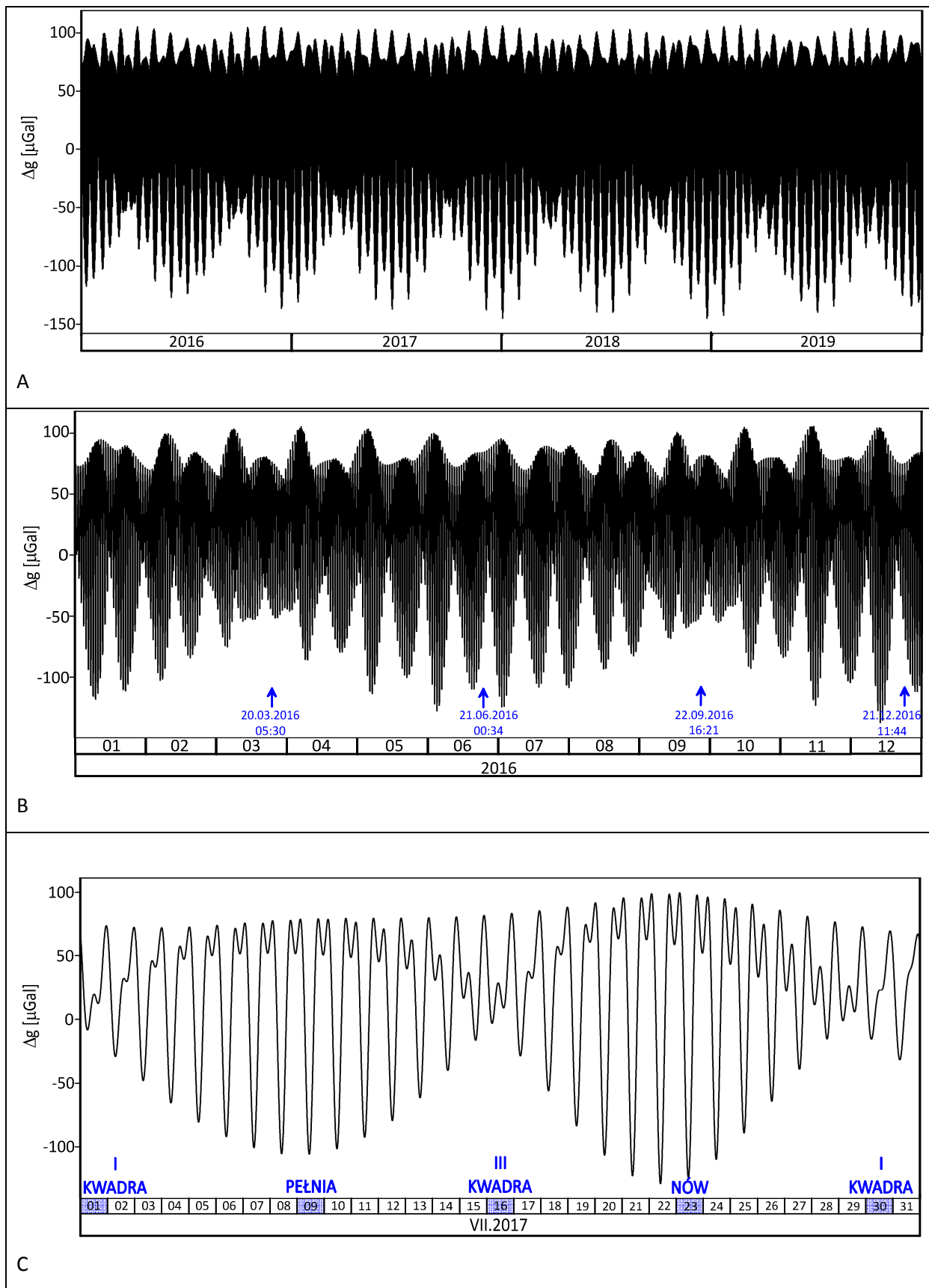
L.p	Symbol Darwin'a	Liczba Doodsona	Źródło pływu	Okres [d]	Częstotliwość [cpd]	Współczynnik grawimetryczny $\delta_g$	Amplituda zmiany g [ $\mu$ Gal]
1	DC ( $S_0/M_0$ )	055.5555	stały Słońca i Księżycy	$\infty$	-	-	26.7
2	Long (N)	055.5655	węzłowy orbity Księżycy	6798.096	0.00015	1.1614	bd
3	Sa	056.5545	eliptyczny słoneczny $S_0$	365.242	0.00274	1.1592	0.4
4	$S_{Sa}$	057.5555	deklinacyjny słoneczny $S_0$	182.621	0.00548	1.1588	2.6
5	$M_{Sm}$	063.6555	-	31.812	0.03143	1.1580	bd
6	$M_m$	065.4555	eliptyczny księżycowy $M_0$	27.555	0.03629	1.1579	2.3 – 2.9
7	$M_{Sf}$	073.5555	Dwutygodniowy wariacyjny księżycowy	14.765	0.06773	1.1577	bd
8	$M_f$	075.5555	deklinacyjny księżycowy $M_0$	13.660	0.07321	1.1577	4.3 – 5.6
9	$Q_1$	135.6555	eliptyczny księżycowy $O_1$	1.1195	0.89326	1.1528	5.8 – 5.9
10	$O_1$	145.5555	główny księżycowy	1.0758	0.92954	1.1528	30.0 – 30.9
11	$M_1$	155.6555	mniejszy eliptyczny księżycowy	1.0347	0.96646	1.1521	2.4
12	$P_1$	163.5555	główny słoneczny	1.0027	0.99731	1.1477	14.0 – 14.4
13	$K_1$	165.5555	Deklinacyjny księżycowo ( $O_1$ ) - słoneczny ( $P_1$ )	0.9973	1.00271	1.1328	42.3 – 43.4
14	$\psi_1$	166.5546	-	0.9971	1.00291	1.2374	bd
15	$\varphi_1$	167.5556	-	0.9918	1.00827	1.1678	bd
16	$J_1$	175.4555	mniejszy eliptyczny księżycowy	0.9624	1.03907	1.1547	2.4
17	$OO_1$	185.5555	księżycowy drugiego rzędu	0.9294	1.07596	1.1548	1.3
18	$N_2$	245.6555	eliptyczny księżycowy $M_2$	0.5274	1.89609	1.1571	5.4 – 6.4
19	$M_2$	255.5555	główny księżycowy	0.5175	1.93237	1.1571	28.0 – 33.2
20	$S_2$	273.5555	główny słoneczny	0.5000	2.00000	1.1571	13.0 – 15.4
21	$K_2$	275.5555	Deklinacyjny księżycowo ( $M_2$ ) - słoneczny ( $S_2$ )	0.4986	2.00562	1.1571	3.5 – 4.2
22	$M_3$	355.5555	główny księżycowy 3 rzędu	0.3450	2.89855	1.0690	0.3 – 0.4
23	$M_4$	455.5555	główny księżycowy 4 rzędu	0.2587	3.86548	1.0390	bd

Wyznaczany syntetyczny efekt pływowy powodujący zmianę przyspieszenia siły ciężkości na wybranym stanowisku badawczym, a w przypadku niniejszej pracy dla punktów w Górnośląskim Obserwatorium Geofizycznym GIG w Katowicach ( $\phi = 50.27170^\circ$ ,  $\lambda = 19.02640^\circ$ ,  $h = 286\text{m n.p.m}$ ) oraz Industrialnym Centrum Kultury Zabytkowej Kopalni Ignacy w Rybniku - Niewiadomiu ( $\phi = 50.062540^\circ$ ,  $\lambda = 18.467134^\circ$ ,  $h = 297.07\text{m n.p.m}$ ), polega na zsumowaniu sinusoid wybranych fal pływowych opisanych przez ich amplitudy i przesunięcia fazowe. W niniejszej pracy, korzystając z oprogramowania *TSoft* stworzonego w Belgijskim Obserwatorium Królewskim (Van Camp i Vauterin 2005), efekt zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołany pływem litosferycznym wyznaczono w oparciu o katalog WDD (Dehant et al. 1999) wykorzystując do obliczeń 13 fal pływowych (tabela 3).

Tab. 3. Zestawienie parametrów fal pływowych wykorzystanych do obliczenia efektu pływowego

Symbol Darwin'a	Częstotliwość [cpd]		współczynnik grawimetryczny $\delta$
	min	max	
DC ( $S_0/M_0$ )	0.000000	0.000001	1.00000
Long (N)	0.000140	0.002427	1.15800
$M_f$	0.002428	0.249951	1.15786
$Q_1$	0.721500	0.906315	1.15431
$O_1$	0.921941	0.940487	1.15430
$P_1$	0.958085	0.998028	1.14908
$K_1$	0.999853	1.003651	1.13449
$\Psi_1$	1.005329	1.005623	1.27248
$\varphi_1$	1.007595	1.011099	1.17071
$OO_1$	1.013689	1.216397	1.15636
All <sub>2</sub> (suma N2, M2, S2, K2)	1.719381	2.182843	1.16199
M3	2.753244	3.381478	1.07360
M4	3.381379	4.347615	1.03900

Na rys. 2 przedstawiono wyniki wyliczeń efektu pływowego kolejno dla okresu 4 lat (2016-2019), 1 roku (2016) oraz 1 miesiąca (lipiec 2017) dla stanowiska w Katowicach. Uwidaczniają one zachodzące krótko- i długookresowe zmiany, którym podlega pole siły ciężkości w analizowanym punkcie. Zmiany przyspieszenia siły ciężkości zawierają się w przedziale  $\pm 150\mu\text{Gal}$ . Aby uwidocznić wpływ zmian pozycji Księżyca względem Ziemi i Słońca, na obserwowane zmiany wartości przyspieszenia siły ciężkości na rys. 2B obejmującym rok kalendarzowy nałożono momenty przesilen i równonocy a na rys. 2C przedstawiającym miesięczne zmiany przyspieszenia siły ciężkości kolejne fazy Księżyca.



Rys. 2. Zmiany wartości przyspieszenia siły ciężkości wywołane efektem pływowym wyznaczone dla stanowiska Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego w Katowicach ( $\varphi = 50.27170^\circ$ ,  $\lambda = 19.02640^\circ$ ,  $h = 286\text{m n.p.m.}$ ).

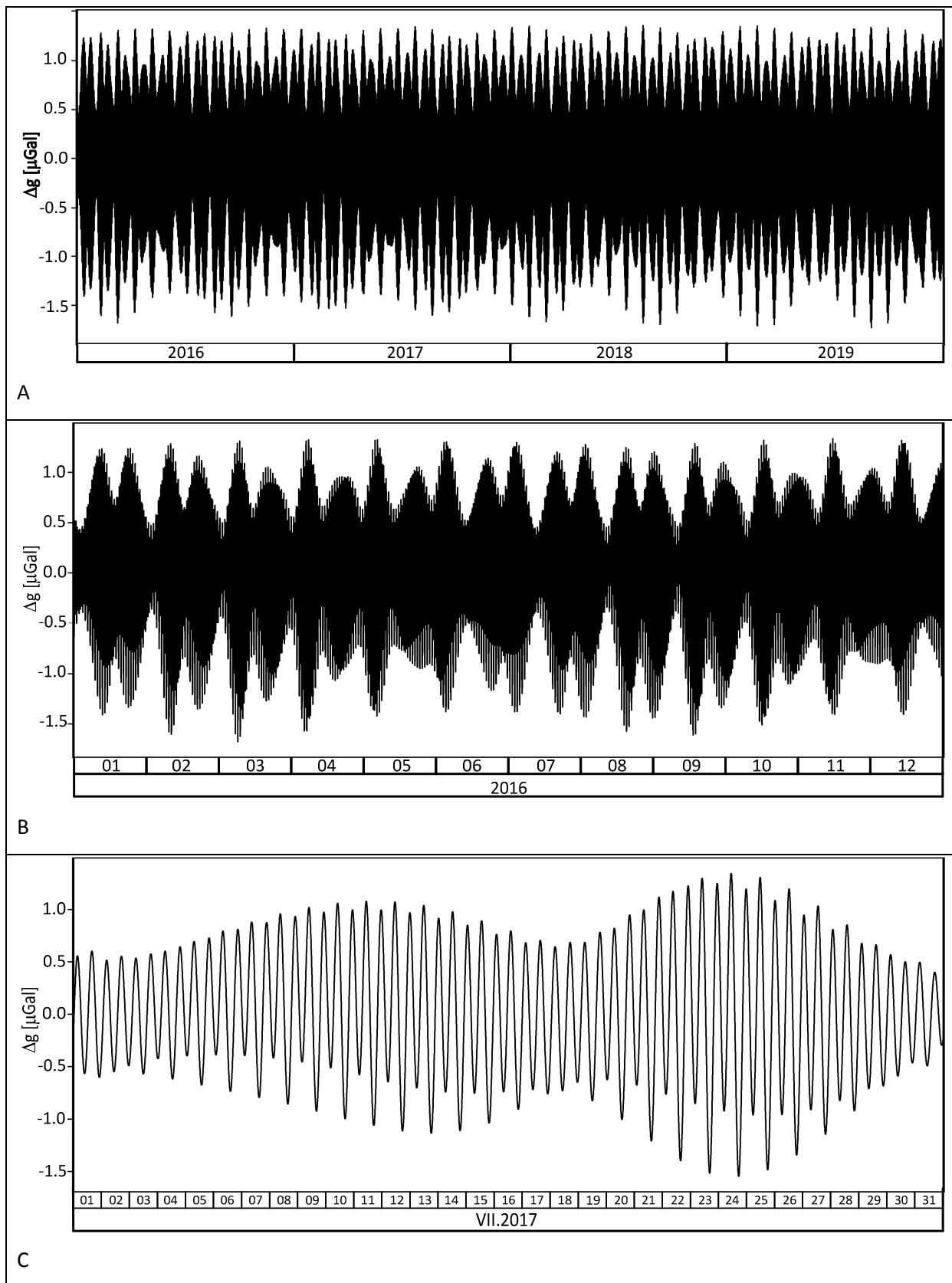
A – zmiany w okresie 4-letnim, B – rocznym i C – miesięcznym

Wyraźnie widoczne jest, iż w momencie pełni (9.VII.2017) oraz nowiu (23.VII.2017) obserwowane są najwyższe amplitudy zmian przyspieszenia siły ciężkości. W ujęciu rocznym, co obrazuje rys. 2B najwyższe zmiany obserwowane są w trakcie przesilen (czerwiec i grudzień), a najniższe w trakcie równonocy.

### 2.3 Pływy oceaniczne

Wywołane pływami litosferycznymi przemieszczanie się mas wód oceanicznych powoduje dodatkowe zmiany przyspieszenia siły ciężkości, które również mają charakter pływowy. Pływy oceaniczne są zatem efektem przemieszczania się mas wód oceanicznych (od pływów litosferycznych i bezpośredniego grawitacyjnego oddziaływania wód) oraz spowodowanej tym zmiany obciążenia skorupy ziemskiej (pionowego przemieszczenia). O ile przemieszczenia mas wody powodują zmiany przyspieszenia siły ciężkości głównie w obszarach nadbrzeżnych, o tyle efekt obciążeniowy oddziałuje na całe płyty litosferyczne powodując ich odkształcanie.

W oznaczaniu pływu oceanicznego istotnym elementem jest zastosowanie poprawnego modelu Ziemi zawierającego dokładne odwzorowanie kształtu skorupy ziemskiej w otoczeniu danego stanowiska badawczego. Prace te realizowane są poprzez altimetryczne misje satelitarne (m.in. TOPEX/POSEIDON, Jason-1, Jason-2, ERS-1, ERS-2, ENVISAT) dostarczające coraz precyzyjniejszych danych wysokościowych poziomu wód oceanicznych. Wskutek zastosowania technik altimetrii satelitarnej zbudowanych zostało kilkanaście numerycznych modeli odnoszących się zarówno do całego globu jak i wybranych obszarów (Agnew 2013). Ich zastosowanie możliwe jest zarówno poprzez specjalistyczne programy (np. SPOTL, LOAD, ETERNA) jak i dostępne serwisy internetowe. Na potrzeby pracy, do obliczeń wpływu pośredniego efektu oceanicznego wykorzystano serwis obliczeniowy Onsala Space Observatory (<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>) oraz model FES2004. FES2004 (Finite Element Solution) jest modelem całkowicie hydrodynamicznym, którego podstawy na bazie pomiarów mareografami stworzył w 1994 Christian Le Provost. Obecnie w modelu wykorzystywane są dane z altimetrycznej misji satelitarnej TOPEX/POSEIDON. FES2004 jest modelem o rozdzielczości przestrzennej  $0,125^\circ$  i zawiera dużą, w odniesieniu do innych modeli liczbę fal pływowych: M2, S2, K2, N2, 2N2, O1, P1, K1, Q1, Mf, Mtm, Mm, Msqm i M4. Dane modelu po konwersji do oprogramowania TSoft pozwoliły na wyznaczenie zmian przyspieszenia siły ciężkości wskutek oddziaływania pływu oceanicznego. Jego ilustrację dla stanowiska w Katowicach ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Zmiany wartości przyspieszenia siły ciężkości wywołane efektem pływu oceanicznego wyznaczone dla stanowiska Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego w Katowicach ( $\phi = 50.27170^\circ$ ,  $\lambda = 19.02640^\circ$ ,  $h = 286\text{m n.p.m}$ ).  
 A – zmiany w okresie 4-letnim, B – rocznym i C – miesięcznym.

Generalnie dla stanowisk położonych w Polsce, zmiany poziomu wód oceanicznych wywołują zmianę pola siły ciężkości na poziomie  $2\mu\text{Gal}$  (Rajner 2010). Wyznaczone zatem wartości zmian są poprawne, gdyż zawierają się w przedziale  $\pm 1.5\mu\text{Gal}$ . Dla stanowiska w Katowicach, wartości te są o dwa rzędy wielkości niższe od efektu grawitacyjnego obserwowanego dla pływów litosferycznych ( $\pm 150\mu\text{Gal}$ ).

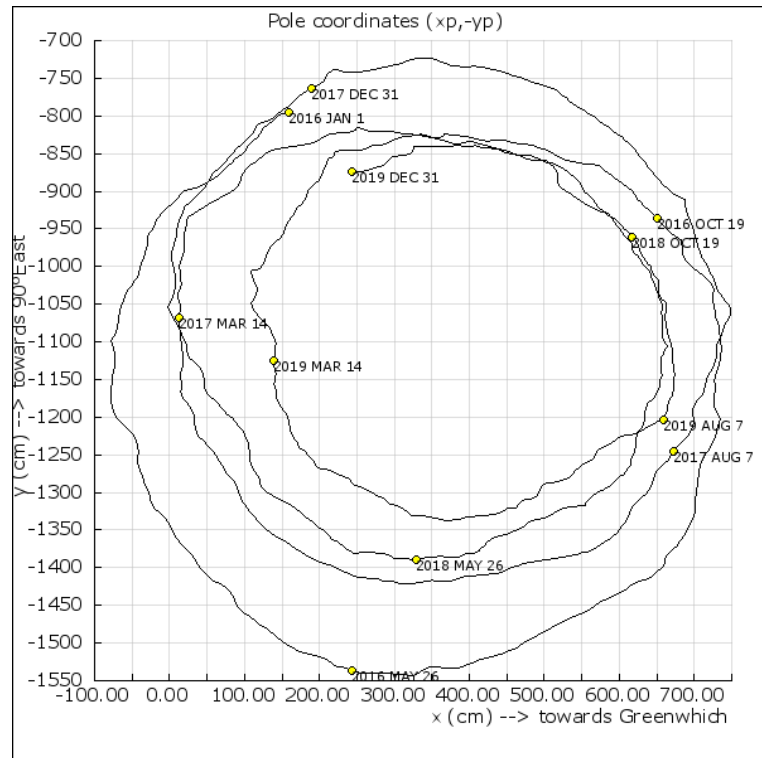
### **3 Inne czynniki powodujące zmiany przyspieszenia siły ciężkości**

Zmiany przyspieszenia siły ciężkości wywołane są nie tylko oddziaływaniem fal pływowych, chociaż te charakteryzują się najwyższymi wartościami zmian. W analizie danych grawimetrycznych ciągłych uwzględnia się również efekty wywołane zmianą położenia (ruchem) bieguna, zmianami ciśnienia atmosferycznego oraz zmianami hydrologicznymi (wahania poziomu zwierciadła wód podziemnych oraz zawilgocenia gleby). Efekty te, w toku opracowywania danych grawimetrycznych, są eliminowane z zapisu zmian przyspieszenia siły ciężkości poprzez zastosowanie odpowiednich poprawek. Ruch obrotowy Ziemi, który wyraża się odśrodkowym potencjałem grawitacyjnym, stanowi jeden z elementów uwzględnianych przy wyznaczaniu pływu litosferycznego, dlatego nie stanowi odrębnego zagadnienia.

#### **3.1 Ruch bieguna Ziemi.**

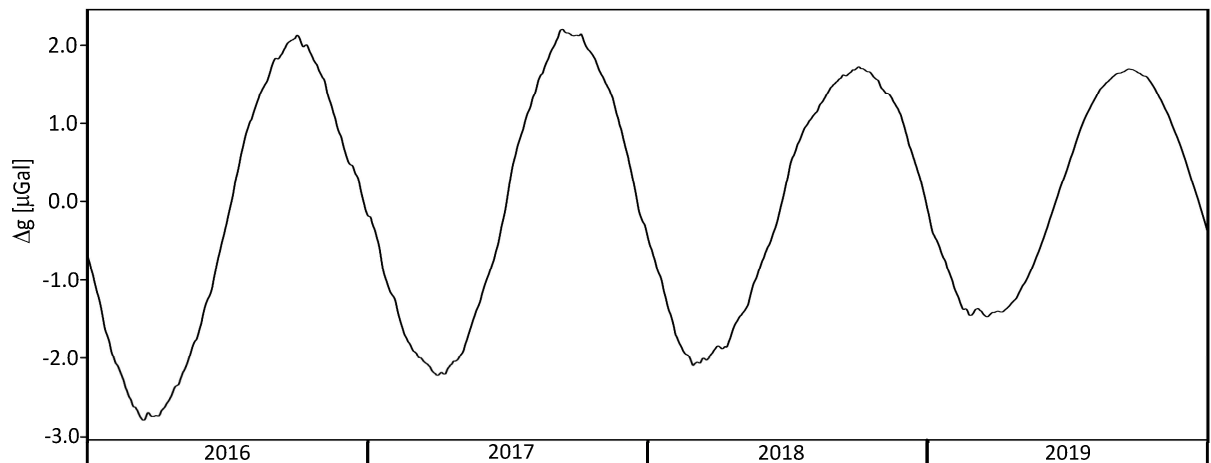
Położenie osi obrotu Ziemi na skorupie ziemskiej podlega ciągłym zmianom. Wynikają one z oddziaływania sił pływowych, eliptyczności orbity Ziemi oraz nachylenia osi obrotu Ziemi względem figury Ziemi. Jak podaje Timmen (Timmen 2010) ruch ten zawiera dwie składowe zawierające się w stałych okresach 435 dni (okres Chandlera) oraz 365 dni (okres roczny) oraz długookresowy nieregularny dryft. Składowe okresowe wynikają z dynamicznego spłaszczenia kształtu Ziemi oraz faktu iż chwilowa oś obrotu Ziemi nie pokrywa się z osią bezwładnego obrotu figury Ziemi a także z przemieszczeń mas w atmosferze i oceanach. Nieregularny dryft wynika z kolei z ruchu wiekowego bieguna północnego w kierunku południka 70°W, polodowcowego odkształcania (wypiętrzania) skorupy ziemskiej w północnej części Ziemi, a także z wzajemnego przemieszczania się płyt litosferycznych (tektonika płyt).

Współrzędne bieguna są stale mierzone poprzez zastosowanie technik satelitarnych obejmujących takie systemy jak GPS (Global Positioning System), SLR (Satellite Laser Ranging), LLR (Lunar Laser Ranging), VLBI (Very Long Baseline Radio Interferometry) oraz DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite). Dane uzyskiwane z tych misji są gromadzone, przetwarzane i udostępniane przez IERS (International Earth Rotation and Reference System Service). Zobrazowanie ruchu osi obrotu Ziemi względem skorupy, wyznaczone na podstawie danych dostępnych w serwisie IERS (<http://hpiers.obspm.fr/iers/eop/>) w okresie 01.01.2016 – 31.12.2019 r. przedstawione na rysunku 4, pokazuje iż w okresie 4 lat oś obrotu oscylowała w okręgu o średnicy około 8m.



Rys. 4. Ruch bieguna względem skorupy ziemskiej w okresie 2016 – 2019r. (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc>).

Przeliczając przemieszczenia bieguna na zmiany przyspieszenia siły ciężkości uzyskuje się krzywą przedstawioną na rysunku 5.



Rys. 5. Zmiany przyspieszenia siły ciężkości związane z ruchem bieguna względem skorupy ziemskiej w okresie 2016 – 2019r. dla stanowiska GOG w Katowicach.

Z powyższego rysunku wynika, iż obserwowane zmiany przyspieszenia siły ciężkości wywołane ruchem bieguna zawierają się w przedziale  $\pm 3\mu\text{Gal}$ . Uzyskane zmiany uwzględnia się w przetwarzaniu danych grawimetrycznych stosując poprawkę na ruch bieguna (Timmen 2010):

$$\Delta g = -\delta_{pol}\omega^2 R \sin 2\varphi (x_{pol} \cos \lambda - y_{pol} \sin \lambda) \quad (13)$$

gdzie:

$\delta_{pol}$  – współczynnik określający elastyczną odpowiedź Ziemi stałej = 1.164



$\omega$  – prędkość kątowna obrotu Ziemi =  $7.292115 \cdot 10^{-5}$  rad/s

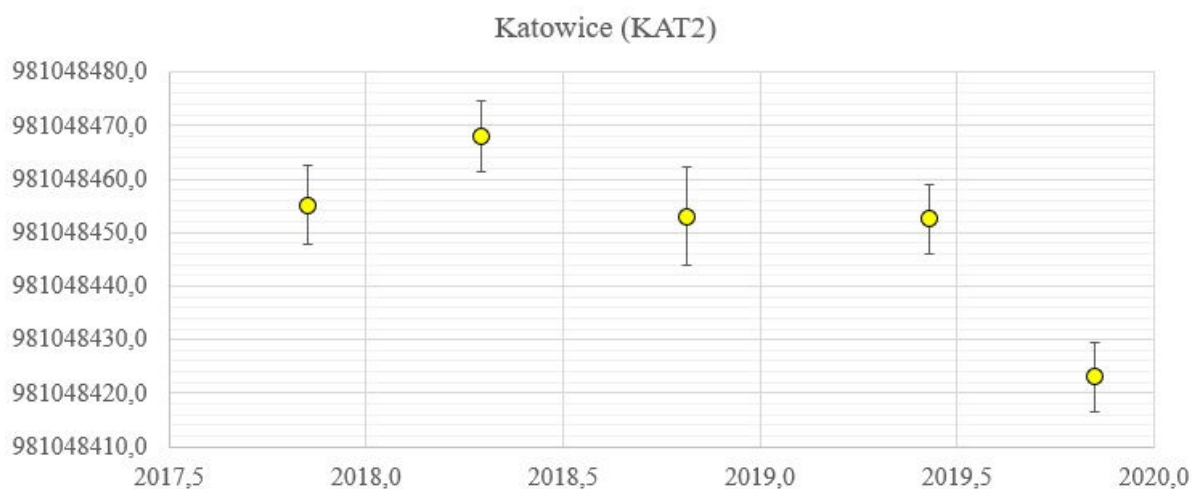
$\lambda$  – długość geodezyjna stanowiska pomiarowego

$\varphi$  – szerokość geodezyjna stanowiska pomiarowego

### 3.2 Zmiany hydrologiczne

Efekt zmiany przyspieszenia siły ciężkości związany ze zmianami hydrologicznymi wynika przede wszystkim ze zmiany masy wody w przekroju pionowym, a więc od wahań zwierciadła wód podziemnych (w szczególności pierwszego poziomu wodonośnego). W mniejszym stopniu wiąże się pionowym przemieszczeniem punktu pomiarowego wskutek elastycznej deformacji płytowej i wynikającej z tego zmiany odległości względem zwierciadła wód podziemnych czy konsolidacji gruntu (zmniejszenia objętości przestrzeni porowych gruntu) wskutek obniżania poziomu zwierciadła wód podziemnych (Timmen 2010). Głównym czynnikiem determinującym wahania poziomu zwierciadła wód podziemnych są zmiany sezonowe wynikające z wielkości opadów i parowania wody. Szacunkowa zmiana może wynosić około  $\pm 10 \mu\text{Gal}$  w skali roku (Torge 1993). Poprawkę tą wykorzystuje się najczęściej w odniesieniu do pomiarów absolutnych z uwagi na skomplikowany charakter przetwarzania danych o opadach i zawilgoceniu gleby w otoczeniu stanowiska pomiarowego.

Przykładem sezonowych zmian przyspieszenia siły ciężkości na terenie GZW mogą być wyniki pomiarów absolutnych przyspieszenia siły ciężkości wykonywanych przez IGiK Warszawa (Dykowski 2020) w ramach realizacji projektu EPOS-PL w obszarze GZW (rysunek 6). Pomijając anomalnie suchy okres 2019 roku, zmiany sezonowe obserwowane pomiędzy jesienią 2017 a wiosną 2018 wyniosły  $12.8 \mu\text{Gal}$  a zmiana roczna (jesień 2017 - jesień 2018)  $2.1 \mu\text{Gal}$ .



Rys. 6. Zmiany wartości absolutnych przyspieszenia siły ciężkości obserwowane na punkcie KAT2 (GOG Katowice) uzyskane z realizacji projektu EPOS (Dykowski 2020)

### 3.3 Zmiany ciśnienia atmosferycznego

Obserwowane na Ziemi zmiany ciśnienia atmosferycznego związane są z przemieszczeniami mas gazów budujących atmosferę Ziemi. Przemieszczenia te wywołują również rejestrowane zmiany przyspieszenia siły ciężkości w punkcie pomiarowym położonym na powierzchni skorupy ziemskiej. Uznaje się, iż są one wywołane zarówno przyciąganiem grawitacyjnym mas atmosfery, jak i obciążeniem masami gazów powierzchni lądów i oceanów. Efekty wywołane zmianami obciążenia mogą osiągać wartość 1cm (Timmen 2010) Niwelowanie tych wpływów określane jest mianem poprawki barometrycznej, która ma postać (Timmen 2010):

$$\Delta g_{atmo} = -\alpha(f - f_n) [hPa] \quad (14)$$

gdzie:

$\alpha$  – współczynnik poprawki barometrycznej (0.3 $\mu$ Gal/hPa)

$p$  – aktualne ciśnienie atmosferyczne stanowiska

$p_n$  – normalne (nominalne) ciśnienie atmosferyczne stanowiska.

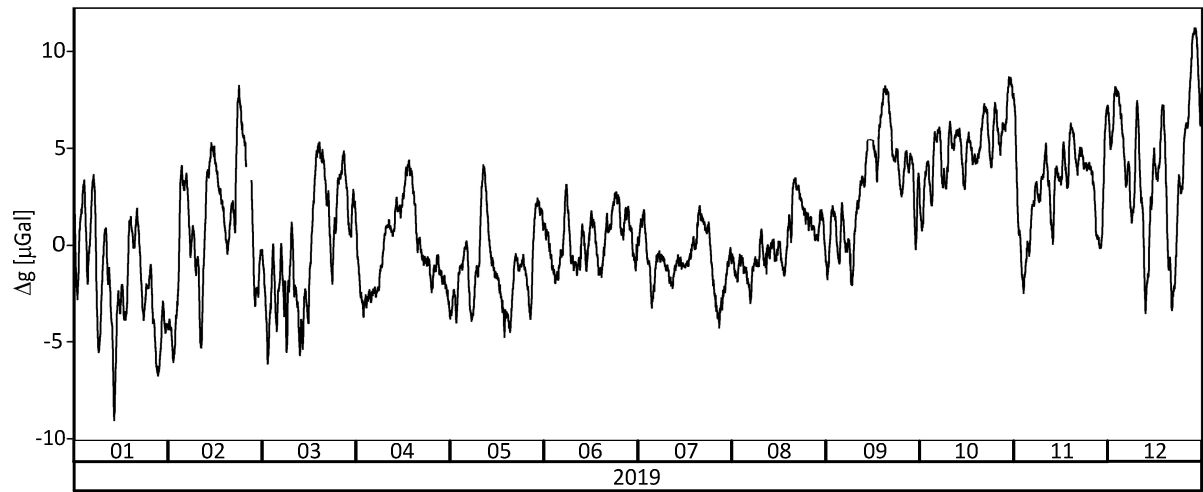
Normalne ciśnienie atmosferyczne stanowiska wyznaczane jest zgodnie z formułą:

$$f_n = 1013.25 \left( 1 - \frac{0.0065 H_{[m]}}{288.15} \right)^{5.2559} [hPa] \quad (15)$$

gdzie:

$H_{[m]}$  – wysokość stanowiska nad poziomem morza [m]

Podobnie jak w przypadku poprawki hydrologicznej uwzględnianie poprawki barometrycznej w rejestracjach zmian przyspieszenia siły ciężkości wymaga posiadania ciągłych obserwacji zmian ciśnienia atmosferycznego dla stanowiska. W przypadku stanowisk w Katowicach i Rybniku zmiany te rejestrowane są od momentu instalacji grawimetrów pływowych gPhone-x w listopadzie 2018 r. Na rysunku 7 przedstawiono zmiany przyspieszenia siły ciężkości wywołane zmianami ciśnienia atmosferycznego w 2019 r. na stanowisku w Katowicach. Obserwowane zmiany przyspieszenia siły ciężkości zawierają się w przedziale  $\pm 10\mu$ Gal i trudno doszukiwać się w ich przebiegu okresowości.

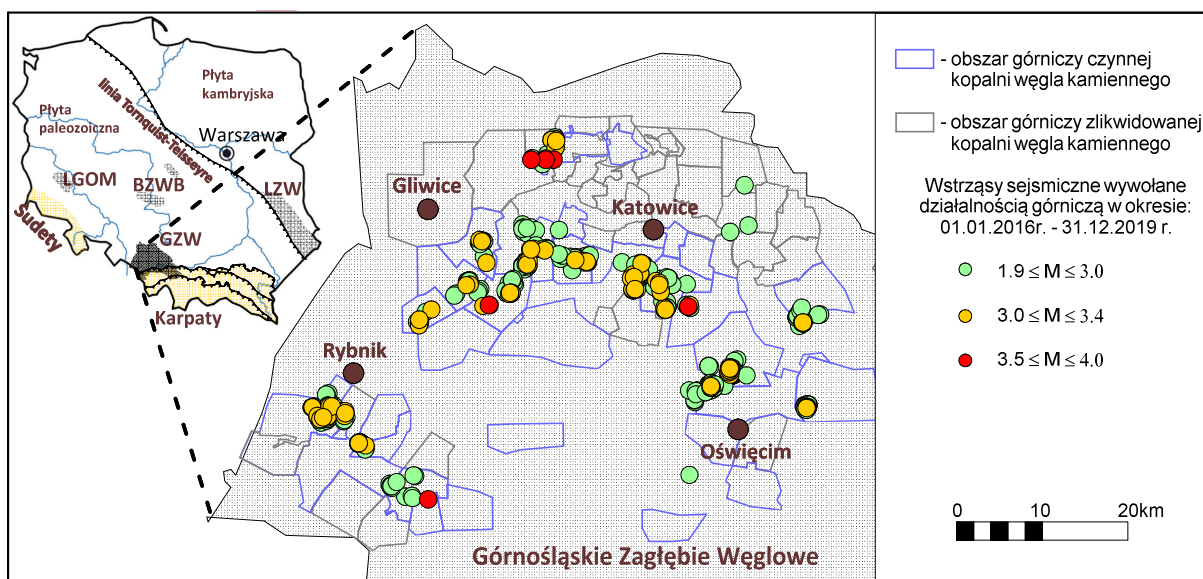


Rys. 7. Zmiany przyspieszenia siły ciężkości wywołane zmianami ciśnienia atmosferycznego zarejestrowane na stanowisku GOG Katowice grawimetrem gPhoneX-157.

## 4 Sejsmiczność w GZW.

### 4.1 Warunki geologiczno - górnicze w GZW.

Położony na płycie euroazjatyckiej obszar Polski uznawany jest za region asejsmiczny. Najaktywniejszymi obszarami Polski z naturalną sejsmicznością są obszary górskie Karpat i Sudet oraz strefa Tornquist – Teisseyre – strefa kontaktowa krystalicznych, prekambryjskich płyt zachodnioeuropejskiej i wschodnioeuropejskiej (rysunek 8). Antropogeniczna aktywność sejsmiczna na terenie Polski związana jest głównie z prowadzeniem eksploatacji górniczej i jej oddziaływaniem na górotwór. Eksploatacja taka prowadzona jest obecnie w czterech regionach Polski: Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW), Lubelskim Zagłębiu Węglowym (LZW), Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym i Bełchatowskim Zagłębiu Węgla Brunatnego (Mutke 2019). Podłoże obszaru Górnego Śląska stanowi niecka górnośląska. Niecka górnośląska - o powierzchni około 7250 km<sup>2</sup> - jest zapadliskiem przedgórskim położonym we wschodniej części basenu morawsko-śląskiego na prekambryjskiej jednostce tektonicznej zwanej blokiem górnośląskim (Buła i Kotas 1994).



Rys. 8. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą (grss.gig.eu) w obszarze GZW w okresie 2016-2019.

Niecka górnośląska zalegająca do głębokości ok. 3 – 4 km wypełniona jest młodszymi skałami osadowymi. Wskutek ruchów górotwórczych w środkowym dewonie, starsze utwory paleozoiku (kambru i dewonu dolnego) zostały w większości zerodowane. Osady dewonu górnego oraz karbonu i permu wykazują zgodność zalegania, jednak wskutek kolejnych ruchów górotwórczych zostały częściowo zerodowane, a przede wszystkim silnie zuskokowane. Karbon dolny stanowią piaskowce, mułowce, łupki oraz wapień węglanowe. Karbon górny (produktywny) budują naprzemianległe piaskowce i łupki z występującymi w nich bogatymi złożami węgla kamiennego. W obszarze całego

USCB rozpoznano kilkaset pokładów węgla o miąższości od kilku cm do 10-23m, z czego przemysłowe znaczenie ma kilkadziesiąt z nich. Największe miąższości utwory karbonu górnego osiągają na zachodzie niecki stopniowo zmniejszając się na wschód, gdzie niższe poziomy stratygraficzne ulegają całkowitemu wyklinowaniu. Nadkład utworów karbonu stanowią utwory Permu, Triasu, Jury, Trzeciorzędu i Czwartorzędu. W skutek procesów górotwórczych i erozyjnych utwory Permu zalegają na karbonie tylko fragmentarycznie na wschodzie i północy niecki. Trias występuje bezpośrednio na Karbonie w części północnej i częściowo centralnej. Utwory Jury tylko na wschodniej krawędzi natomiast utwory Trzeciorzędowe zalegają bezpośrednio na karbonie w południowej i zachodniej części niecki. Na całej powierzchni niecki zalegają utwory Czwartorzędu o miąższości od 1m na wyniesieniach utworów starszych do 50-60m w dolinach rzek, przy czym w części centralnej i północno-wschodniej niecki bezpośrednio na karbonie. Tektonika w obrębie niecki górnośląskiej wywołana jest głównie ruchami waryscyjskimi oraz późniejszymi alpejskimi przy czym utwory zalegające na węglonośnych utworach karbonu są dużo mniej zuskokowane. Tektonika fałdowa jest słabo rozwinięta. W centralnej części utwory górnego karbonu leżą prawie poziomo. Silniejsze zaburzenia tektoniczne występują w obrzeżeniu niecki. Uskoki, które utworzyły się podczas fałdowań alpejskich; obejmują nie tylko karbon, ale prawie cały nadkład po miocen włącznie.

Z uwagi na dużą zasobność złóż węgla kamiennego w GZW eksploatacja górnicza prowadzona jest już od ponad 250 lat. Początkowo prowadzona była odkrywkowo na wychodniach najbogatszych podkładów, a z upływem czasu objęła głębsze pokłady i prowadzona była już głębinowo poprzez pionowe lub ukośne wyrobiska udostępniające (Jaros 1962). Obecnie czynnych jest 40 kopalń, w tym 34 w części polskiej zagłębia (rysunek 8). Najpowszechniej stosowanym systemem eksploatacji jest system ścianowy z zawałem stropu. Jego powszechne i wieloletnie stosowanie doprowadziło do dużych przekształceń pierwotnego układu naprężeń panujących w górotworze (Dubiński et al. 2019). Zmiany te nastąpiły wskutek usunięcia (węgiel kamienny) lub przemieszczenia (skała płonna) ogromnych mas skalnych w obrębie niecki górnośląskiej, co wywołało zmiany w regionalnym polu grawitacyjnym (Kotyrbka et al. 2005, Kotyrbka 2014). W efekcie tych działań obserwowane jest występowanie wstrząsów sejsmicznych, które z uwagi na antropogeniczną genezę nazywane są indukowanymi (Teisseyre 1983). Wstrząsy te mogą być powiązane bezpośrednio albo pośrednio z prowadzoną eksploatacją górniczną. Wstrząsy sejsmiczne bezpośrednio związane z eksploatacją górniczną występują w bliskim otoczeniu eksploatowanego pola, występują w bardzo dużej ilości w trakcie postępu frontu eksploatacyjnego, ale charakteryzują się energią nie przekraczającą E+07J (do  $M_L = 2.7$ ). Z kolei mniej liczne wstrząsy związane są z regionalnym układem naprężeń, charakteryzują się najczęściej energiami sejsmicznymi od E+08J do E+09J ( $M_L=3.0 - 4.2$ ), ze źródłem bardzo często zlokalizowanym w strefach dyslokacji tektonicznych, które w efekcie zachodzących zmian ulegają ponownej aktywacji (Mutke i Dubiński 2016, Marcak i Mutke 2013). Indukowane

wstrząsy sejsmiczne pod względem zapisów sejsmicznych w zasadzie nie różnią się od zapisów trzęsienia Ziemi, przy czym wywołane są zjawiskami o mniejszej energii sejsmicznej (Gibowicz i Kijko 1994, Marcak i Zuberek 1994). Ich obserwacje z powodzeniem prowadzone są również przy wykorzystaniu grawimetrów pływowych, rejestrujących w sposób quasi-ciągły zmiany przyspieszenia siły ciężkości (Kotyrbka i Kortas 2020) Sejsmiczność indukowana działalnością górniczą obecnie koncentruje się w czterech rejonach GZW (rysunek 8). Największy z nich przebiega przez centralną część basenu górnośląskiego na linii wschód – zachód i wiąże się z obecnością jednej z najważniejszych jednostek tektonicznych – uskoku kłodnickiego. Pozostałe trzy rejony, w północnej, południowo-wschodniej i południowo-zachodniej części basenu, związane są bezpośrednio z koncentracją podziemnej eksploatacji górniczej węgla kamiennego oraz lokalnie występującymi uskokami.

#### 4.2 Mechanizmy wstrząsów indukowanych.

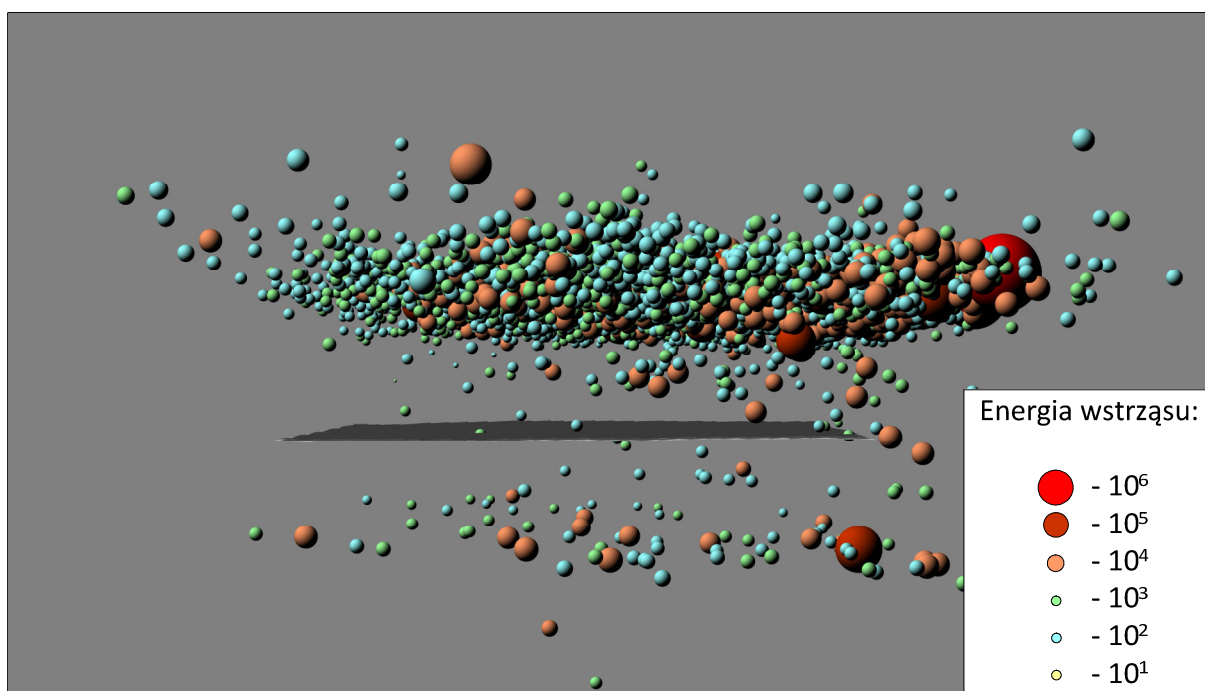
Powstawanie wstrząsów indukowanych, w wyniku prowadzenia eksploatacji górniczej złoża węgla kamiennego w obrębie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, związane jest przekroczeniem warunków brzegowych stanu równowagi mechanicznej górotworu wskutek oddziaływania na pewien jego fragment układu sił wywołanego naprężeniami eksploatacyjnymi, siłami tektonicznymi czy siłami grawitacji (Marczak i Zuberek 1994). Generalnie do źródeł wstrząsów indukowanych w warunkach podziemnej eksploatacji złoża węgla kamiennego można zaliczyć m.in.: obryw skał, pęknięcie górotworu związane z ściskaniem/rozciąganiem skał stropowych, ich rozwarstwianiem związanym z uginaniem się skał nadkładu nad wybraną przestrzenią, reaktywacji wskutek oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych istniejących stref uskokowych, pęknięć w górotworze (Marczak i Zuberek 1994).

Na podstawie wielu analiz zbiorów wstrząsów indukowanych, które wystąpiły w kopalniach GZW (Gibowicz 1989, Zuberek et al. 1996, Zuberek et al. 1997, Dubiński et al. 1999, Idziak et al. 1999, Stec i Drzewiecki 2000, Dubiński i Stec 2001, Wiejacz 2001, Stec 2005, Stec 2007, Stec i Błaszczuk 2008, Stec i Wojtecki 2011, Marcak i Mutke 2013, Rudziński et al. 2016, Dubiński et al. 2020) można wyróżnić dwa zasadnicze rodzaje sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą pokładów węgla w obrębie GZW (za Stec 2009 ):

- wstrząsy górnicze, związane bezpośrednio z prowadzoną eksploatacją górniczą, charakteryzujące się mniejszą energią oraz eksplozywnym lub implozywnym typem mechanizmu ognisk i występujące w bezpośrednim sąsiedztwie prowadzonej eksploatacji,

- wstrząsy regionalne, powstające wskutek złożenia naprężeń eksploatacyjnych i rezydualnych występujących w głębokich strukturach GZW. Są to wstrząsy wysokoenergetyczne, występujące w rejonach dyslokacji tektonicznych. Charakteryzują się ścinającym mechanizmem ognisk a azymut i upad płaszczyzn pęknięcia w ognisku korelują z rozciągłością i upadem uskoku w obrębie których wstrząsy te wystąpiły.

Wstrząsy górnicze, z uwagi na bliskie położenie ich ogniska względem eksploatowanego fragmentu złoża węgla kamiennego (ściany), można podzielić na stropowe, spągowe i pokładowe (Gibowicz 1989). Przestrzenny rozkład wstrząsów zarejestrowanych przez sieć sejsmologiczną PPG KWK ROW w trakcie prowadzenia analizowanej w niniejszej pracy ściany VIII E-1E w pokładzie 703/1 przedstawia rysunek 9. Wstrząsy o poślizgowym i ścinającym mechanizmie ognisk, powstającym w wyniku działania podwójnej pary sił nazywane są wstrząsami stropowymi. Powstają w czasie postępującej eksploatacji na wskutek pęknięcia występujących w stropie pokładu grubych i zwięzłych kompleksów skalnych, o dużej sztywności i wytrzymałości. W większości przypadków azymuty ich płaszczyzn rozrywu oraz ich upady korelują się z rozciągłością frontu eksploatacyjnego lub krawędziami wybranych wcześniej niżej lub wyżej leżących pokładów węgla (Marcak i Zuberek 1994).



Rys. 9. Wizualizacja 3D wstrząsów indukowanych eksploatacją ściany VIII E-1E w pokładzie 703/1 w KWK ROW ruch Rydułtowy. Widok od strony zachodniej. Płaszczyzna odwzorowuje położenie eksploatowanego pokładu

Wstrząsy pokładowe, charakteryzują się nieścinającym typem mechanizmu ognisk. Ten typ wstrząsów odpowiada procesom objętościowego niszczenia struktury pokładu węgla. Wstrząsy o tym typie ognisk są głównie zlokalizowane bezpośrednio w pokładzie węgla i w sąsiedztwie czynnych frontów eksploatacyjnych. Mechanizm ich ognisk odzwierciedla procesy związane z destrukcją

struktury pokładu węgla lub jego bezpośredniego otoczenia. W szczególności sytuacja taka dotyczy wstrząsów prowokowanych strzelaniami wstrząsowymi, mającymi miejsce w pokładzie węgla lub strzelaniami torpedującymi zlokalizowanymi w stropie bezpośrednim lub spągu pokładu, jakie są prowadzone w ramach profilaktyki tąpaniowej. Wstrząsy tego typu mogą także powstawać w wyniku narastającego nacisku nadległych warstw skalnych na pokład węglowy i stanowią największe zagrożenie (Stec i Wojtecki 2011). Wstrząsy spągowe powstają, gdy naprężenia eksploatacyjne prowadzą do powstania maksymalnych naprężeń poziomych (następuje obniżenie pionowych naprężeń). Powstały układ zaburzenia równowagi prowadzi do powstawania pęknięć na istniejących powierzchniach w stropie lub w nienaruszonym górotworze w spągu. (Marcak i Zuberek 1994)

Wstrząsy regionalne charakteryzują się najwyższymi energiami, występują zazwyczaj w strefach tektonicznych, często daleko od czynnych wyrobisk górniczych. Mechanizmem ich ognisk jest mechanizm poślizgowy, normalny lub rewersyjny, często z zaznaczającym się poziomym przesunięciem w ognisku wstrząsu. Dla tej grupy zjawisk, azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady dość dobrze korelują się z rozciągłością i upadem uskoków, w pobliżu których zlokalizowane były ogniska wstrząsów. Najczęściej przyczyną powstawania tych zjawisk jest współdziałanie tektonicznych naprężeń rezydualnych istniejących w analizowanym obszarze z naprężeniami wywołanymi pracami górniczymi. (Stec 2009, Marcak i Mutke 2013; Kozłowska et al. 2016)



## 5 Dotychczasowy stan badań związanych z podejmowaną problematyką

Próby zrozumienia i określenia zależności kierujących zjawiskami będącymi źródłem występowania wstrząsów sejsmicznych są przedmiotem intensywnych rozważań i badań wielu naukowców i ośrodków naukowych na świecie. Do wstrząsów sejsmicznych o dużej intensywności dochodzi wskutek gwałtownego rozładowania naprężeń w górotworze. W naturze wstrząsy sejsmiczne związane są przede wszystkim ze strefami wzajemnego oddziaływania dużych mas skalnych w strefach kontaktów płyt litosferycznych, w rejonach aktywnych stref uskokowych czy obszarach wulkanicznych. Jednym z elementów uznanych za katalizator wstrząsu sejsmicznego są fale pływowe wynikające z grawitacyjnego oddziaływania na Ziemię innych obiektów w przestrzeni kosmicznej. Określenie związku pomiędzy falami pływowymi i występowaniem trzęsień Ziemi jest zagadnieniem rozpowszechnionym i od dawna analizowanym w świecie naukowym. Uzyskiwane i publikowane wyniki prac często są jednak ze sobą sprzeczne i istnienie korelacji pływy – wstrząsy sejsmiczne stanowi źródło dyskusji naukowej.

Pierwsze naukowe prace nad badaniem związku pływów z występowaniem wstrząsów sejsmicznych przeprowadził pod koniec XIX wieku prof. Schuster (Schuster 1897). Jego praca polegała na opracowaniu teoretycznych podstaw analizy harmonicznej, techniki, która stała się jednym z podstawowych narzędzi w identyfikacji częstotliwości istotnych w obserwowanych szeregach czasowych. W pracy z 1897 udowadniał w ten sposób brak okresowości w występowaniu trzęsień Ziemi. Opracowana metoda statystyczna stała się następnie podstawą badań prowadzonych przez późniejszych badaczy i powszechnie określana jest jako „test Schuster’a”. Wyznaczana w metodzie wartość liczby  $p$  jest stosowana do określenia hipotezy zerowej, że trzęsienia występują losowo w odniesieniu do kąta fazowego zmiany pływu. Przyjmuje się iż dla  $p \leq 5\%$  (lub  $p \leq 0.05$ ) badana okresowość jest prawdziwa.

Kolejny etap w badaniu zjawiska stanowią prace Thomasa Heaton'a, który w pracy z 1975 r. (Heaton 1975) wskazuje iż korelacja pływy – wstrząsy, może zależeć od dodatkowych czynników związanych z cechami płaszczyzny uskoku i mechanizmu przemieszczania się po niej mas skalnych. Dokonuje analizy w oparciu o zbiór 107 wstrząsów z czego wnioskuje, iż dla płytkich (<30km) trzęsień w uskokach o ukośnym i stromym mechanizmie przemieszczeń istnieje związek wstrząsów z naprężeniami pływowymi. Natomiast dla głębszych (>30km) oraz bardzo płytkich trzęsień takiego związku nie ma. W 1982 roku Heaton (Heaton 1982) uszczegółowił przeprowadzone badania, szczególnie koncentrując się na grupie wstrząsów, które pozwoliły na wnioskowanie istnienia związku czas wstrząsu - pływy. W pracy tej oparł się na zbiorze 328 trzęsień ziemi, które poddał podobnej analizie statystycznej jak w pracy z 1975r. We wnioskach stwierdza, iż zaobserwowane zależności

czasu wystąpienia wstrząsu w oparciu o zmiany naprężeń wywołane falami pływowymi dla wyselekcjonowanego zbioru trzęsień Ziemi nie znajduje potwierdzenia, wskazując jednocześnie iż nie można wykluczyć istnienia takiej zależności dla lokalnych zbiorów trzęsień, w czym odnosi się do pracy Kleina. Klein (Klein, 1976) opierał się na wynikach testu Schuster'a i obliczeniach prawdopodobieństwa oddziaływania naprężeń pływowych (tidal stress) na wyselekcjonowanych zbiorach trzęsień. W pracy wykorzystał zbiory wstrząsów z 7 regionów świata. Wstrząsy analizowano jako pojedyncze zjawiska oraz pogrupowane w roje (swarms) przez co łącznie analizowano 18 zbiorów danych zawierających od 11 do 6678 wstrząsów. W efekcie przeprowadzonej analizy autor stwierdza istnienie znacznej korelacji wstrząsy sejsmiczne - pływy z wartością liczby  $p < 0.5\%$  testu Shuster'a dwóch zbiorów, przy czym analizowana jest harmonika jednej, półdobowej fali pływowej. Dość dobra zależność ( $p < 5\%$ ) występuje natomiast dla 4 badanych zbiorów. W podsumowaniu autor zaznacza iż korelacja z falą pływową o okresie doby nie daje satysfakcjonujących wyników i sugeruje zastosowanie dłuższych okresów fal dla poszukiwania zależności w rojach wstrząsów. Badania nad dłuższymi okresami pływów są zawarte w publikacji z 1989 r. (Hartzell i Heaton, 1989), gdzie autorzy wskazują generalnie na brak związku wstrząsów z pływami litosfery. Takie podejście do zagadnienia podzielili również między innymi Vidale et al (1998) po przeanalizowaniu zbioru 13042 wstrząsów sejsmicznych z rejonu uskoku San Andreas (Kalifornia, USA) oraz Rydelek et al. (1992) po analizie katalogu 2992 wstrząsów w rejonie wulkanu Campi Flegrei (Włochy). Przeprowadzone w ostatniej pracy analizy, m.in. z zastosowaniem testu Schuster'a wykazały brak związku pomiędzy pływami a trzęsieniami Ziemi. Najwyższą wartość prawdopodobieństwa uzyskano dla naprężenia optymalnego (uzyskanego poprzez kryterium wytrzymałościowe Coulomba) w odniesieniu do złożenia fal  $M_2$  i  $O_1$ .

Jako podsumowanie XX wiecznych prac nad badaniem okresowości występowania trzęsień Ziemi i jego związku z pływami litosfery można przyjąć pracę Emter'a (1997). Wskazuje, iż poszukiwanie okresowości wstrząsów i ich związku z pływami dostarcza rozbieżnych danych. Autor zestawiał w formie tabelarycznej dotychczas przeprowadzone prace, ograniczając się do tych prac, które opierają się na analizie statystycznej zbiorów wstrząsów. Z zestawienia wynika, iż na 36 prac, w 8 przypadkach autorzy wykazują na istnienie związku dla całego badanego zbioru, w 13 przypadkach jedynie dla wyselekcjonowanych części zbiorów a w 15 przypadkach brak jakiegokolwiek związku. Generalnie dzieli dotychczas przeprowadzone badania na dwie zasadnicze grupy tj. związane z badaniem trzęsień Ziemi oraz wstrząsów wulkanicznych. Przytacza, iż w pracach autorzy opisując funkcję czasową pływu posługują się potencjałem pływowym, pionowym przyspieszeniem pływowym ( $g$ ), poziomym albo ukośnym przyspieszeniem pływowym ( $\varphi$ ), odkształceniem pływowym ( $\varepsilon$ ) podobnie jak szybkością zmian tych czynników ( $dg$ ,  $d\varphi$ ,  $d\varepsilon$ ). Wykazuje, iż w wielu wypadkach czasowe funkcje tych zjawisk pływowych ( $g$ ,  $\varphi$ ,  $\varepsilon$ ) nie są wprost proporcjonalne do naprężeń pływowch

ze względu na geometrię zjawiska i tensorowe relacje pomiędzy odkształceniem i naprężeniem. Tematyka oddziaływania naprężeń pływowych na litosferę oraz wielkości naprężeń, które mogą wywołać trzęsienie Ziemi nie jest przedmiotem niniejszej pracy, jednak dla poznania zakresu tego zjawiska warto zapoznać się z pracami Cochran et al. (2004) oraz Varga i Grafarend (1996, 2018).

W 2001 r., Wilcock, na podstawie danych o 1899 wstrząsach z lokalnej sieci sejsmologicznej założonej na śródoceanicznym grzbiecie udowodnił związek trzęsień z pływami. W podsumowaniu autor wskazuje, iż istnienie zależności zachodzi ze względu na fakt, iż wahania poziomu oceanu zwiększają naprężenia pływowe (za Emter 1997). Wnioskuje, iż trzęsienia pojawiają się częściej blisko niskiego pływu, szczególnie najniższego pływu wiosennego, gdy naprężenia rozciągające przyjmują maksymalne wartości we wszystkich kierunkach.

W pierwszych dekadach XXI w. nastąpiła znacząca zmiana w badaniach nad związkami okresowości trzęsień Ziemi i pływów. Wiąże się to przede wszystkim z możliwością prowadzenia analiz statystycznych dużych zbiorów z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi informatycznych. Najczęściej przytaczanymi przez badaczy publikacjami z tego zakresu są prace zrealizowane pod kierunkiem prof. Tanaki z Uniwersytetu Tohoku (Japonia) w 2002 r. W pierwszej pracy (Tanaka et al., 2002a) wykorzystano zbiór 9350 trzęsień z katalogu CMT (Global Centroid Moment Tensor Catalog) (Ekström et al. 2012) z całego globu o magnitudzie 5.5 i większej. Powiązano je z obliczonymi naprężeniem i tensorem naprężeń pływowych. Poprzez wykorzystanie testu Schuster'a autorzy wykazują, iż dla całego zbioru brak jest szukanej korelacji. Wartości liczby  $p$  testu Schustera wyniosły 77% dla naprężenia i 9,5% dla tensora naprężeń. Wobec powyższego dokonano klasyfikacji wstrząsów pod kątem typu uskoku na jakim nastąpiło trzęsienie, ich energii wyrażonej magnitudą oraz głębokości wystąpienia wstrząsów. Okazało się, iż dla globalnego zbioru płytkich trzęsień ( $d < 70\text{km}$ ) dla naprężenia ścinającego istnieje wysoka korelacja z liczbą testu Schuster'a wynoszącym  $p = 0,04\%$ . Podobnie dla tego samego typu naprężeń i wstrząsów, które wystąpiły na uskoku typu odwróconego wartość liczby  $p$  wyniosła 0.20%. Potwierdzeniem uzyskanych wyników jest kolejna praca (Tanaka et al. 2002b) obejmująca silne trzęsienie ziemi ( $M = 7.5$ ) w rejonie subdukcji płyty pacyficznej pod australijską (rów Tonga Kermadec) w 1982 r. wraz z towarzyszącymi mu 385 słabszymi ( $M < 5.5$ ) i płytkimi wstrząsami ( $d < 70\text{km}$ ). Czas wystąpienia wstrząsów ponownie porównano z rozkładem naprężeń pływowych uwzględniających również udział pływów oceanicznych. W wyniku analizy uzyskano bardzo dobre wartości liczby  $p$  dowodzące istnienia zależności czas wstrząsu – pływ litosfery. W podobny sposób zrealizowano kolejne prace: Tanaka et al. 2004, Tanaka et al. 2005 oraz Tanaka 2012, za każdym razem udowadniając, iż płytkie i słabsze trzęsienia Ziemi mogą być generowane oddziaływaniem naprężeń pływowych. Na bazie tych opracowań powstało szereg prac dotyczących regionalnych zbiorów wstrząsów (Cadichaneu et al. 2007; Kasnowa i Tatnall 2009; Metivier et al. 2009; Kolvankar et al. 2010; Kolvankar 2011; Iwata

2012; Chen et al. 2012; Dutilleul et al. 2015; Moncayo et al. 2019;). Rezultaty tych prac przedstawiono w zwięzły sposób poniżej. Wszystkie te prace udowadniają, iż dla odpowiednio zdefiniowanych zbiorów istnieje zależność pomiędzy czasem wystąpienia wstrząsu a przebiegiem fali pływowej, przy czym dotyczy to przede wszystkim największych amplitudowo półdobowych fal  $M_2$  i  $S_2$ . Istnieje też szereg prac, które niezależnymi od sposobu przedstawionego przez Tanakę wykazują istnienie takiej zależności. Duża ich część dotyczy mikrotrzęsień obserwowanych na dnie oceanicznym (Glasby i Kasahara 2001), w rejonach rowów tektonicznych (Wilcock 2001) lub podmorskich wulkanów (Tolstoy et al. 2002) czy wstrząsów sejsmicznych związanych z aktywnością wulkanów (Sottili et al. 2007)

W 2007 zespół badaczy (Cadicheanu et al, 2007) przeprowadził analizę zbioru wstrząsów z regionu Vrancea w południowo-wschodnich Karpatach (Rumunia). Jest to jeden z najbardziej sejsmicznych regionów w Europie. Analizy statystycznej dokonano w oparciu o test Shuster'a, podobnie jak w pracach Tanaki (2002b i 2006) dla blisko 3000 wstrząsów o  $M > 2.5$  i głębokości ogniska od 60 do 300km. Czasy wystąpienia wstrząsów autorzy porównali ze zamianami pola siły ciężkości wywołanymi falami pływowymi  $S_2$  i  $M_2$ . W pracy autorzy wykazują iż dla średnio-głębokich wstrząsów siły grawitacyjne są głównymi, zewnętrznymi siłami, które mogą wywoływać procesy dynamiczne wewnątrz Ziemi. W podsumowaniu wskazują, iż analizując w całości zbiór z okresu 25 lat nie znaleziono zależności wstrząsy – pływy. Przy ograniczeniu do serii obejmujących jeden rok dla fali  $S_2$  zależność ta przyjmuje wartość liczby Schuster'a  $p$  na poziomie 0,86%. Badania przeprowadzone przez Kasnowa i Tatnall (2009) dla południowej części Kalifornii (USA) przebiegały w podobny sposób. O ile cały zbiór 6215 wstrząsów nie pozwala na wyznaczenie związków czas wstrząsu – pływy o tyle dla podzbiorów, szczególnie wstrząsów o energii z przedziału  $3.0 < M < 3.9$  ( $p = 3.01\%$ ) i wstrząsów z głębokości do ok 8km ( $p = 1.16\%$ ). W pracy Metivier et al. (2009), zespół badaczy oparł analizę statystyczną na zbiorze 442412 wstrząsów sejsmicznych o magnitudzie od 2.5 do 9.0 z katalogu NEIC (National Earthquake Information Center) - katalog światowy prowadzony przez amerykańską służbę geologiczną (US Geological Survey). W efekcie wykazali, iż wpływ naprężeń pływowych może odpowiadać za 0,2-0,3% z katalogu zdarzeń. Jednakże zauważyli też, iż dla małych energii ( $M < 4.0$ ) i płytkich ( $< 20$ km) wstrząsów wpływ ten jest anomalnie wysoki ( $p = 0,7\%$ ). Wykazują też, iż nie ma wystarczających dowodów na wpływ mechanizmu wstrząsu w ognisku na występowanie wstrząsów. W pracy zespołu prowadzonego przez Kolvankara (Kolvankar et al. 2010) ponownie przebadano zbiór NEIC, koncentrując pracę na wstrząsach o magnitudzie dochodzącej do 5.0. Autorzy wskazują, iż wstrząsy o magnitudzie mniejszej niż 3.0, które wystąpiły na głębokości mniejszej niż 10km szczególnie blisko fazy nowego Księżyca (nów) są bezpośrednio wywoływane oddziaływaniem Księżyca i Słońca. Praca to stoi w opozycji do stwierdzenia Heaton'a (1975), który wskazuje, iż wstrząsy o  $M \leq 3.0$  nie powinny być wiązane z falami pływowymi. W pracy z 2012 r. zespół chińskich

badaczy (Chen et al. 2012) przeanalizował podobnie do Metivier'a zbiór ponad 420 tys. trzęsień. Autorzy pracy wykazują, iż dla całego zbioru nie obserwuje się wprost zależności pomiędzy wstrząsami a falami pływowymi. Szczegółowej analizie poddano silne trzęsienie ( $M=6.3$ ) z Nowej Zelandii wraz z zbiorem towarzyszących mu wstrząsów wtórnych. W efekcie analiz stwierdzono, że większość wstrząsów wtórnych wystąpiło blisko fazy  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  i  $270^\circ$  fali  $M_2$ , co świadczy o wyraźnej zależności słabszych wstrząsów od półdobowej fali pływowej związanej z oddziaływaniem Księżycy na litosferę Ziemi.

Kolejnym ważnym krokiem stało się zastosowanie specjalistycznych programów (skryptów), napisanych w środowisku MathLab. Jednym z nich jest program *Schuster spectrum* Ader i Avouac, którego obliczenia i efekty zaprezentowali w publikacji z 2013(a, b)r. i który stanowi współczesne rozwinięcie testu Schuster'a. Autorzy pracy wykazują, iż niejednokrotnie niska wartość liczby  $p$  testu Schuster'a może być nieprawdziwa i nie musi oznaczać, że w katalogu wstrząsów istnieje okresowość. Pokazują iż poziom wykrywalności jest w pewnym stopniu zależny od badanego okresu. Wskazują iż większą wiarygodność ma obliczenie widma wartości  $p$  w odpowiednim podzbiore okresów w danym zakresie. Obecnie metody statystyczne są nadal rozwijane, jak chociażby w pracy Dutilleul et al. 2015, gdzie autorzy jako alternatywę dla widma Schuster'a wykorzystują wieloczęstotliwościową analizę okresogramu wystąpień trzęsień.

Przeprowadzona analiza literatury wskazuje, iż zasadniczym przedmiotem prac prowadzonych nad badaniem związków wstrząsów sejsmicznych i trzęsień Ziemi jest wykazanie istnienia okresowości w występowaniu wstrząsów i ich powiązaniu z okresami fal pływowych oddziaływujących na litosferę. Poprzez to, szukana zależność ma pozwolić na predykcję wstrząsów sejsmicznych, szczególnie najsilniejszych, zagrażających ludności żyjącej w najaktywniejszych sejsmicznie regionach świata, a więc w rejonach kontaktowych płyt litosferycznych, aktywnych tektonicznie uskoku czy wulkanów. W wielu pracach, za Emter'em, autorzy posługują się wyznaczoną wartością zmian naprężenia i odkształcenia pływowego w lokalizacjach wstrząsów, dokonują selekcji wstrząsów pod kątem różnych parametrów: lokalizacji, energii, głębokości czy mechanizmu źródła wstrząsu. Opisywane w literaturze katalogi wstrząsów sejsmicznych dotyczą zjawisk naturalnych. Analiza statystyczna tych katalogów opiera się na dwóch aspektach – głębokości ogniska wstrząsu oraz energii wstrząsu (magnituda).

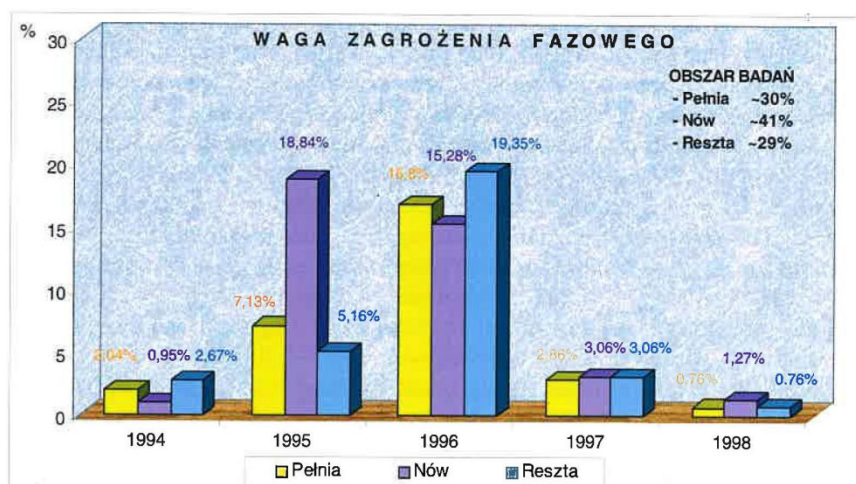
Wnioski z publikacji dających pozytywny wynik na istnienie zależności czas wstrząsu – fala pływowa można zgeneralizować do następujących podpunktów (za Varga i Grafarend 2018):

- wnioski oparte na badaniach statystycznych, czasami uzupełnione o schematyczne modele źródła wstrząsu sejsmicznego,
- korelacje znaleziono w przypadku płytszych niż 50km wstrząsów,

- pływy mogą oddziaływać tylko w przypadku uskoków które są bliskie stanu krytycznego,
- naprężenie normalne i odkształcenie są kluczowymi czynnikami wyzwolenia pływowego (tidal triggering).

Przeprowadzona analiza literatury światowej nasuwa możliwość przeniesienia technik statystycznej analizy katalogów wstrząsów sejsmicznych wywołanych naturalnymi ruchami litosfery na poziom obserwowanych na terenie Górnego Śląska wstrząsów sejsmicznych indukowanych podziemną eksploatacją złóż węgla kamiennego. Sejsmiczność indukowana w obszarze GZW koncentruje się w obrębie pól eksploatacyjnych lub ich bezpośrednim otoczeniu oraz w strefach uskoków położonych zarówno blisko jak i daleko (kilkanaście – kilkadziesiąt km) miejsc prowadzenia eksploatacji.

Zagadnienie związku pływów z występowaniem wstrząsów indukowanych było również przedmiotem prac prowadzonych przez polskich badaczy. Pod koniec XX w., jako dodatkowy element, w rozprawie doktorskiej Henryk Pawełczyk, przeprowadził analizę związku pływu wywołanego oddziaływaniem Księżyca z czasem występowania wstrząsów indukowanych eksploatacją górnictwem w KWK Katowice – Kleofas. Uzyskane wyniki stanowiły następnie element publikacji (Pawełczyk 2009). W swojej pracy Pawełczyk powiązał występowanie związku pomiędzy pływami a wstrząsami indukowanymi w oparciu o główne fazy Księżyca oraz przyjmując założenie, iż w trakcie Nowiu i Pełni pływy zawsze osiągają najwyższe wartości, a w I i III Kwadrze są one najniższe. Jest to uproszczone podejście do przebiegu zmian obciążenia grawitacyjnego jakie przedstawia rysunek 2C. W pracy nie uszczegóławia informacji o wielkości ani jednostkach zmian związanych z pływami (przemieszczenia pionowe, zmiany siły ciężkości czy inny parametr). Na tej podstawie dla wybranego fragmentu złoża KWK Katowice – Kleofas i prowadzonej w latach 1994 – 1998 eksploatacji górnictwem w/w zestawiał czas występowania nowiu i pełni (przyjmując 6-dniowe okresy czasu) z liczbą wstrząsów indukowanych oraz ich sumaryczną energią pojawiających się w trakcie tych faz Księżyca i porównał z danymi dla pozostałych faz (zsumowane Kwadra I i III). W oparciu o zebrany materiał autor wyznaczył *wagi zagrożenia fazowego* będące powiązaniem ilości dni faz nowiu, pełni, I i III kwadry, liczby wstrząsów oraz sumarycznej energii tych wstrząsów (rysunek 10).



Rys. 10. Wagi zagrożenia fazowego (Pawelczyk 2009)

W podsumowaniu autor wskazuje, iż najczęściej wstrząsów wystąpiło w pełni, natomiast w nowiu wystąpiły wstrząsy, których sumaryczna energia była najwyższa. Autor wysuwa wniosek, iż z przeprowadzonych badań wynika, iż podstawowy wpływ na aktywność i intensywność sejsmiczną mają czynniki nie związane z fazami Księżyca. .... Tym niemniej uzyskane wyniki pozwalają na postawienie hipotezy, że w niektórych sytuacjach wpływ Księżyca może stanowić tę przysłowiową „kropkę nad i” inicjacji wstrząsu i decydować o powstaniu zagrożenia (Pawelczyk 2009).

## 6 Metoda i zakres badań

Realizacja części badawczej pracy została podzielona na 3 etapy. W pierwszym etapie przeprowadzono analizę archiwalnych danych o wstrząsach indukowanych (katalog GRSS(1)) i porównano czas ich wystąpienia z wyznaczonymi teoretycznie zmianami przyspieszenia siły ciężkości wywołującymi pływy litosferyczne dla punktu o współrzędnych odpowiadających lokalizacji grawimetru gPhoneX-157 w Katowicach (GOG w Katowicach). Etap ten objął okres 3 lat – od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r. W listopadzie 2018 r. zainstalowano grawimetry pływowe na stanowiskach w GIG-GOG i ICK-Rybnik i rozpoczęto stałe obserwacje zmian przyspieszenia siły ciężkości. Dlatego drugi etap pracy opiera się na danych z obserwacji rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości i jego porównanie z czasem wystąpienia wstrząsów indukowanych w okresie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r. (katalog GRSS(2)) analogicznie jak w etapie I dla stanowiska w Katowicach. Etapy I i II pozwalają na obserwację związku pływy litosfery – wstrząsy indukowane w skali regionalnej, dla obszaru GZW. Do trzeciego etapu wykorzystano dane z KWK ROW ruch Rydułtowy w sąsiedztwie eksploatacji ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1 (katalog ROWR19). Wykorzystano dane z okresu 26.02.2019 r. – 29.01.2020 r. obejmujące okres od momentu uruchomienia eksploatacji w ścianie do dnia jej zakończenia (31.12.2019 r.) oraz 29 dni po jej zakończeniu. Analiza zbioru pozwala określić czy dla wstrząsów zachodzących bezpośrednio w sąsiedztwie frontu eksploatacji, a zatem bezpośrednio generowanych eksploatacją górniczą, czas ich wystąpienia można również wiązać ze zmianami obciążenia litosfery.

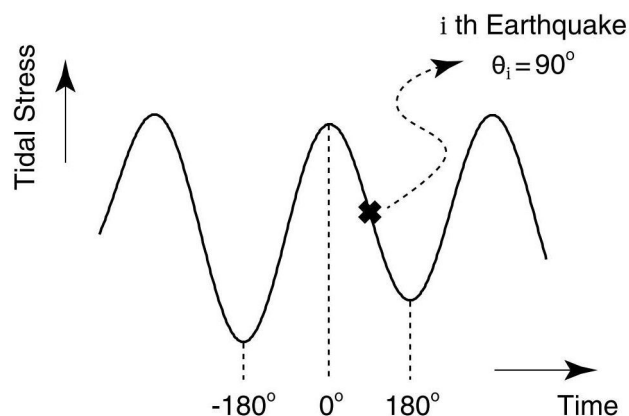
Praca opiera się na zbadaniu dwóch aspektów, po pierwsze czy w przypadku wstrząsów indukowanych możemy mówić o związku czasu wystąpienia wstrząsu z pływową zmianą przyspieszenia siły ciężkości. Ten element opiera się na wyznaczeniu dla każdego wstrząsu jego położenia względem sumarycznej zmiany przyspieszenia siły ciężkości (obciążenia grawitacyjnego). Po drugie zbadanie czy w zarejestrowanych zbiorach wstrząsów indukowanych występuje okresowość, która pozwalałaby na predykcję zdarzeń. Do realizacji drugiej części wykorzystano widmo testu Schuster'a (Ader i Avouauc 2013a).

### 6.1 Metoda analizy statystycznej

Określenie związku pomiędzy pływami Ziemi i występowaniem wstrząsów sejsmicznych, a w przypadku niniejszej pracy wstrząsów indukowanych eksploatacją górniczą na terenie GZW, może być mierzone statystycznie poprzez zastosowanie m.in. testu Schuster'a (patrz rozdział *Dotychczasowy stan badań związanych z podejmowaną problematyką*). Jeśli czas wystąpienia



wstrząsu zostanie wykreślony na przebiegu fali pływowej wyrażonej w tym przypadku zmianą przyspieszenia siły ciężkości, możliwe jest wówczas zdefiniowane jego kąta fazowego  $\theta_i$ . Wartość tego kąta zawiera się w przedziale od  $-180^\circ$  do  $+180^\circ$ , zgodnie z schematem przedstawionym na rysunku 11.



Rys. 11. Definicja pływowego kąta fazowego (Tanaka et al. 2002a). Maksimum i minimum fali pływowej, w tym przypadku wyrażonej przez naprężenie pływowe, położone najbliżej zaistniałego wstrząsu sejsmicznego opisane są poprzez  $0^\circ$  i odpowiednio  $\pm 180^\circ$ . Kąt fazowy pływu wyznaczany jest przez liniowe podzielenie przedziału czasu pomiędzy nimi.

Pomimo iż w pracy Tanaki (Tanaka et al. 2002a), który postąpił zgodnie z podejściem wyznaczonym przez Emter'a (Emter 1997), oparto się na przebiegu wyznaczonego naprężenia pływowego, poprzez analogię można zastosować takie podejście i oprzeć analizę na efekcie grawitacyjnym pływu litosfery, ponieważ grawitacyjne siły pływowe powinny wpływać na procesy dynamiczne zachodzące na niewielkich głębokościach (Cadicheanu et al. 2007). Wiąże się to również z możliwością wykorzystania w pracy danych pomiarowych uzyskiwanych z grawimetrów pływowych (rzeczywiste obciążenie grawitacyjne). Wyznaczenie kątów fazowych wstrząsów indukowanych na syntetycznym (model) i obserwowanym (grawimetr pływowy *gPhoneX*) sumarycznym efekcie grawitacyjnym dostarcza podstawowej informacji o istnieniu związku pomiędzy czasem wystąpienia wstrząsu indukowanego a zmianą obciążenia grawitacyjnego górotworu (niecki górnośląskiej). Wyznaczenie kątów fazowych zazwyczaj ogranicza się do promieni o szerokości  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  lub  $45^\circ$ . W pierwszym etapie, dla zbadania słuszności przyjętych założeń pracy, wyznaczono wartości kątów fazowych w odniesieniu do sumarycznych, teoretycznych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanych pływem litosferycznym (katalog 1 – GRSS(1)). W kolejnych etapach pracy zbadano tą zależność dla rzeczywistego zapisu zmian przyspieszenia siły ciężkości rejestrowanego grawimetrami *gPhoneX* (katalogi 2 i 3), w których surowych obserwacjach (raw gravity) dominuje efekt pływu litosferycznego, co wykazano wcześniej (rozdział *Pływowe zmiany siły ciężkości*). Zestawienie czasu wystąpienia wstrząsu z sumarycznym efektem obciążeniowym pływów ziemskich pozwala ocenić, czy obserwowane wstrząsy sejsmiczne korelują z momentami maksymalnego dociążenia lub odciążenia grawitacyjnego skorupy ziemskiej. Dla badanych w pracy zbiorów

wyznaczono kąty fazowe dla promieni o szerokości 30° a uzyskane wyniki przedstawiono tabelarycznie oraz w postaci wykresów radialnych.

Następnie przeprowadzona została analiza z zastosowaniem testu Shuster'a dla każdego ze zbiorów, w poszukiwaniu okresowości w występowaniu wstrząsów indukowanych i ich związku z przedstawionymi w tabeli 2 falami pływowymi. W teście Shuster'a każdy z wstrząsów sejsmicznych jest jednostkowym wektorem w kierunku zdefiniowanym przez kąt fazowy  $\theta_i$ . Wówczas suma wektorowa  $D$  może być zdefiniowana jako:

$$D^2 = (\sum_{i=1}^n \cos\theta_i)^2 + (\sum_{i=1}^n \sin\theta_i)^2 \quad (16)$$

gdzie  $n$  jest liczbą wstrząsów sejsmicznych w badanym zbiorze. Gdy wartość  $\theta_i$  jest determinowana losowo, wówczas prawdopodobieństwo, że długość sumy wektorowej jest równa lub większa niż  $D$  jest zdefiniowana następująco:

$$p = e^{-\left(\frac{D^2}{n}\right)} \quad (17)$$

Wyznaczana w równaniu wartość prawdopodobieństwa jest określana jako liczba  $p$  testu Schuster'a. Im niższa jest wartość liczby  $p$ , tym większe jest prawdopodobieństwo że rozkład czasowy wystąpienia wstrząsów zależy od badanego okresu  $T$ . Wartość liczby  $p$  zmienia się w zakresie od 0 do 1. Gdy zmierza do 0, istnieje zależność pomiędzy badanym zbiorem wstrząsów a badanym okresem. Zasadniczo przyjmuje się próg 0,05 (5%) tzn. prawdopodobieństwa  $p < 0,05$  (5%) uważa się za nieprzypadkowe, a korelację uznaje się za znaczącą, podczas gdy wartości  $p$  większe niż 5% odpowiadają rozkładowi zdarzeń losowych.

Ponieważ przeprowadzanie testu Shustera wiąże się z określaniem kąta fazowego względem wybranego okresu, dla zbadania zależności występowania wstrząsów od wytypowanych fal pływowych (tabela 2) wykorzystano opracowane przez Ader i Avouac (2013a) z Obserwatorium Tektoniki w California Institute of Technology tzw. widmo testu Shuster'a. Do obliczenia widma testu Shuster'a wykorzystany został program *Schuster spectrum* w postaci skryptu napisanego w środowisku MathLab (<http://www.tectonics.caltech.edu/resources/>). Skrypt stanowi rozwinięcie testu Schuster'a. W uproszczeniu do skryptu wprowadzane są dane katalogu wstrząsów sejsmicznych (czasy wstrząsów) oraz określone dolna ( $T_{min}$ ) i górna ( $T_{max}$ ) granica badanego okresu, na podstawie których wyliczane jest widmo testu Schuster'a – a więc rozkład liczby  $p$  względem szeregu okresów zawartych w wyznaczanych granicach. Skrypt w pierwszej kolejności oblicza podzbiory okresów dla których szukana będzie zależność w zbiorze wstrząsów. Liczba podzbiorów, a zarazem przeprowadzonych w następstwie tego testów Schuster'a określona jest zależnością (Ader i Avouac 2013a):

$$N = \frac{t}{\varepsilon} \left( \frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T_{max}} \right) \approx \frac{t}{\varepsilon T_{min}} \quad (18)$$

gdzie:

$N$  – liczba testów Shuster’a w widmie

$t$  – całkowity czas trwania katalogu

$T_{min}$  – minimalna szukana okresowość w katalogu

$T_{max}$  – maksymalna szukana okresowość w katalogu

$\varepsilon$  – współczynnik dokładności = 1

Wprowadzone uproszczenie równania (18) wynika z faktu, iż zazwyczaj najmniejszy badany okres jest dużo mniejszy niż ten największy ( $T_{min} \ll T_{max}$ ). Współczynnik dokładności  $\varepsilon$  pozwala kontrolować liczbę podzbiorów. Wybierając za wysoką wartość  $\varepsilon$ , w wyznaczanym widmie możliwe jest zgubienie części okresów, podczas gdy przyjmując zbyt małą, możliwe jest wprowadzenie nadmiernej ilości badanych okresów, co zakłóci czytelność wyniku oraz może znacząco spowolnić działanie programu. Przeprowadzona numeryczna symulacja optymalnej wartości współczynnika  $\varepsilon$  (Ader i Avouauc 2013b) wskazuje, iż przy stosowaniu programu dla dowolnego zbioru danych należy przyjmować wartość bliską 1. W niniejszej pracy, przyjmując wartość  $\varepsilon = 1$  dla badanych zbiorów uzyskuje się następujące liczby przeprowadzanych testów Schuster'a:

Tab. 4. Zestawienie parametrów do wyznaczenia liczby  $N$  widma testu Shuster'a dla badanych katalogów.

Katalog	$T_{min}$ [d]	$T$ [d]	$N$
GRSS(1)	0.2587	1096	4234
GRSS(2)	0.2587	365	1410
ROWR19	0.2587	337	1302

gdzie wartość  $T_{min}$  odpowiada najmniejszej wartości okresu fali pływu litosferycznego  $M_4$  (główna fala księżycowa 4-tego rzędu) z katalogu fal przedstawionych w tabeli 2 (rozdział 2.2).

Następnie dla każdego z wyznaczonych okresów przeprowadzany jest test Shuster’a przy wykorzystaniu dodatkowego skryptu *Shuster\_test\_log* na badanym katalogu – określany jest logarytm naturalny liczby  $p$ . Wyniki przedstawiane są w postaci logarytmicznego wykresu wartości  $p$  testu Schuster'a dla badanych okresów z uwzględnieniem progu detekcji istnienia zależności (95%).

Próg detekcji wyznaczany jest zgodnie z równaniem:

$$\delta = 0,05Tt \quad (19)$$

gdzie:

$\delta$  – próg detekcji

$t$  – całkowity czas trwania katalogu

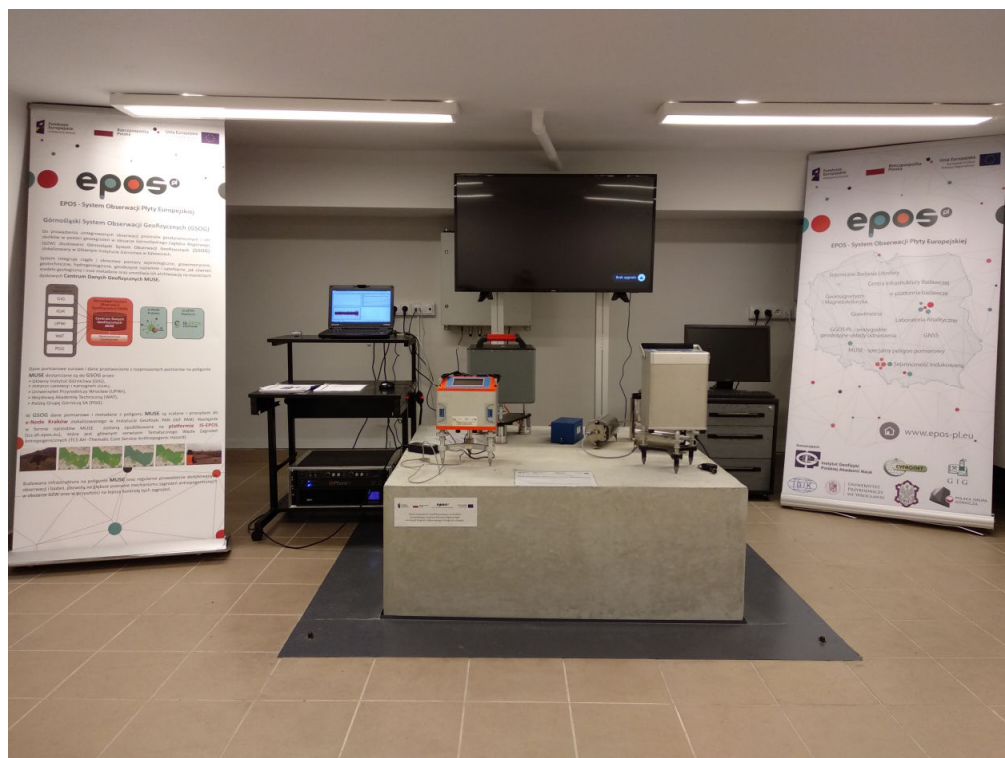
$T$  – okres dla którego wyznaczany jest próg detekcji

Dla wartości liczby  $p$  testu Schuster'a przekraczających wartość progową detekcji uważa się, iż zależność pomiędzy badanym okresem a katalogiem wstrząsów jest nieprzypadkowa.

## 6.2 Dane pomiarowe zmian przyspieszenia siły ciężkości

W niniejszej pracy za Cadicheanu et al, (2007), powiązano zależność czasu występowania wstrząsów z obserwowanymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości (pionowym przyspieszeniem pływowym). Przytaczane w wielu publikacjach parametry naprężenia i odkształcenia nie są parametrami mierzonymi a obliczonymi w wyniku modelowania odpowiedzi skorupy ziemskiej na oddziaływanie fal pływowych. Natomiast zmiany przyspieszenia siły ciężkości, w tym te powodujące pływy Ziemi, można mierzyć w dowolnym punkcie na powierzchni Ziemi przy użyciu specjalistycznej aparatury badawczej. W ramach realizacji projektu European Plate Observing System współfinansowanego przez UE (akronim EPOS-PL), na terenie GZW utworzony został grawimetryczny system monitoringu wstrząsów sejsmicznych. Obejmuje on 2 grawimetry pływowe *gPhoneX* firmy Micro-g LaCoste (USA) o numerach seryjnych 155 i 157 umożliwiających obserwację zmian w polu grawitacji na terenach górniczych i pogórnich (Kotyriba i Kortas 2020, Kortas 2020). W systemie tym prowadzona jest ciągła, z częstotliwością 1 Hz, rejestracja zmian przyspieszenia siły ciężkości (g) w czasie.

System składa się z dwóch stanowisk pomiarowych zlokalizowanych na terenie GZW przy czym jeden zainstalowany jest w obrębie terenu górniczego a drugi w terenie pogórnym. Stanowisko w terenie pogórnym znajduje się w Górnośląskim Obserwatorium Grawimetrycznym w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach (rysunek 12).



Rys. 12. Stanowisko pomiarowe w Górnośląskim Obserwatorium Geofizycznym Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach z grawimetrem *gPhone-X* nr 157 ( $\phi = 50.271596^\circ$ ,  $\lambda = 19.026294^\circ$ ,  $h = 286.73\text{m}$  n.p.m).

Grawimetr umieszczony jest na betonowym postumencie o głębokości ok. 1,5 m osadzonym bezpośrednio na piaskowcu karbońskim (warstwy rudzkie). Zadaniem tego grawimetru jest rejestracja zmian przyspieszenia siły ciężkości ( $g$ ) na terenie, gdzie eksploatacja złóż węgla kamiennego została zakończona i jej wpływy ujawniły się już na powierzchni. Najbliższą czynną kopalnią prowadzącą eksploatację górniczą i generującą wstrząsy sejsmiczne w rejonie tego stanowiska jest KWK „Murcki-Staszic” - ok 5 km na południe. (Mutke et al. 2019)

Natomiast stanowisko w terenie górniczym znajduje się w Industrialnym Centrum Kultury Zabytkowej Kopalni Ignacy w Rybniku – Niewiadomiu. Stanowisko to znajduje się w obrębie obszaru górniczego stale prowadzącej prace górnicze KWK ROW ruch Rydułtowy (rysunek 13).



Rys. 13. Stanowisko pomiarowe w Industrialnym Centrum Kultury Zabytkowej Kopalni Ignacy w Rybniku - Niewiadomiu z grawimetrem *gPhoneX-155* ( $\phi = 50.062540^\circ$ ,  $\lambda = 18.467134^\circ$ ,  $h = 297.07\text{m n.p.m.}$ ).

Grawimetr *gPhone-X* nr 155 pracuje na betonowym postumencie o wymiarach 1100x1100 mm w piwnicy maszyny wyciągowej Szybu „Głowacki”. Postument ma głębokość ok. 1,2 m i podobnie jak dla grawimetru 157 w Katowicach jest posadowiony bezpośrednio na piaskowcu karbońskim (warstwy jakłowieckie). Eksploatacja złoża węgla jest prowadzona systemem ścianowym w odległości 0 – 2,5 km od stanowiska pomiarowego na głębokości około 1000 m w pokładach: 700, 703, 706, 713/12, 714.

Pojedyncze stanowisko pomiarowe grawimetru pływowego *gPhone-X* zbudowane jest z czterech elementów:

- układu pomiarowego z czujnikiem zmian grawitacji - wyposażonym w sprężynę charakteryzującą się zerową zmianą długości (*Zero Length Spring Tension system*)
- platformy ODIN służącej do automatycznego poziomowania układu pomiarowego, (Micro-g LaCoste 2016)
- modułu elektronicznego zawierającego zegar rubidowy rejestrujący uniwersalny czas koordynowany (UTC) za pośrednictwem anteny GPS
- systemu podtrzymywania zasilania UPS i komputera typu laptop do akwizycji danych z oprogramowaniem *gMonitor*. (Micro-g LaCoste 2013b)

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  $0,45 \text{ mGal/Hz}^{\frac{1}{2}}$ . Dryft urządzenia nie powinien przekraczać  $1,5 \text{ mGal/miesiąc}$  i zwykle wynosi  $<500 \mu\text{Gal/m-c}$ . Grawimetry 155 i 157 znajdują się obecnie w fazie stabilizacji dryftu, która trwa około dwóch lat (Micro-g LaCoste 2013a) przy czym już obecnie charakteryzują się bardzo niskim dryftem instrumentalnym.

Oprogramowanie *gMonitor* (Micro-g LaCoste 2013b) stanowi podstawowe narzędzie obsługi grawimetru pływowego po jego instalacji na stanowisku badawczym. Z uwagi na długotrwałą stabilizację urządzenia oraz charakterystykę jego pracy (pomiar ciągły) wskazane jest jak najrzadsze wprowadzanie modyfikacji w pracy urządzenia. Urządzenie rejestruje surową wartość przyspieszenia siły ciężkości, zmiany położenia sprężyny, ciśnienie oraz temperaturę panujące wewnątrz układu pomiarowego jak i w otoczeniu. Wiele z poprawek, można w późniejszym etapie zaimplementować do zgromadzonych, surowych danych pomiarowych. Zastosowanie ich już na etapie rejestracji umożliwia jednak bieżące uzyskiwanie skorygowanej wartości przyspieszenia siły ciężkości, poprzez którą można śledzić zmiany grawitacji związane na przykład z występowaniem wstrząsów sejsmicznych.

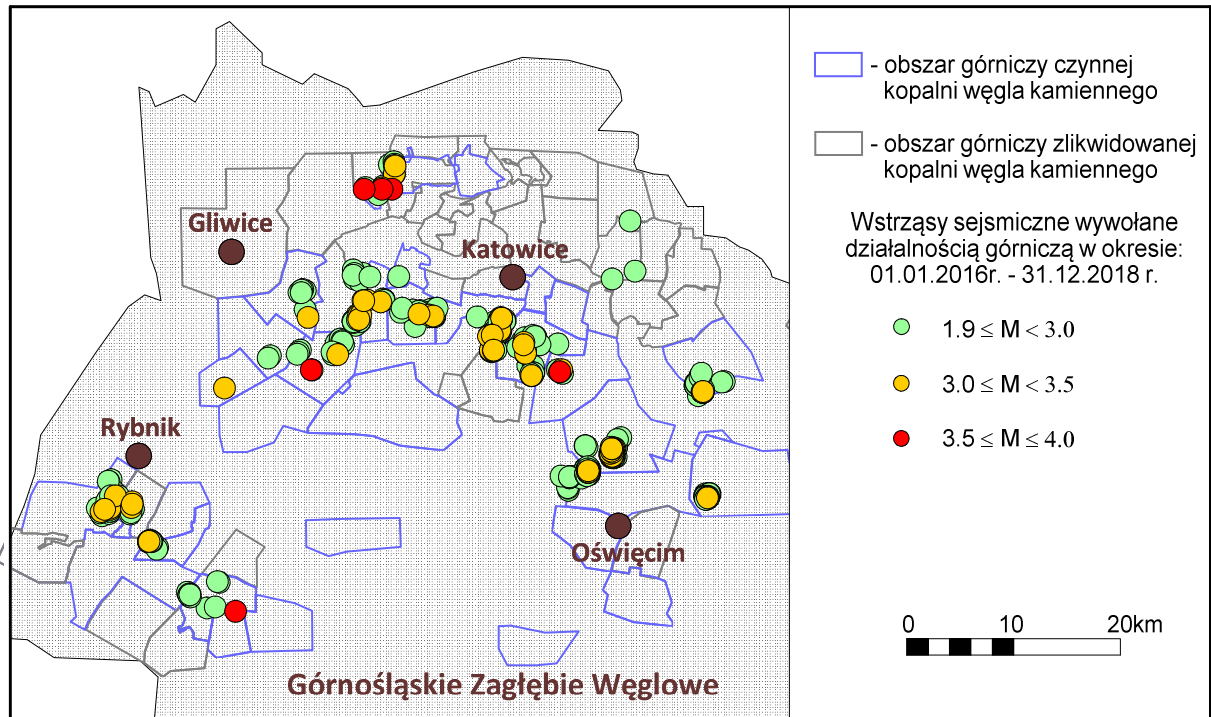
## 7 Analiza i interpretacja danych.

Z uwagi na wykorzystanie w pracy 3 różnych katalogów danych o wstrząsach indukowanych analizę podzielono na 3 części.

### 7.1 Katalog GRSS (1) 2016-2018 - pływy syntetyczne

W pierwszym etapie przeprowadzono analizę archiwalnych danych o wstrząsach indukowanych – katalog GRSS(1) – i porównano czas ich wystąpienia z wyznaczonymi teoretycznie zmianami przyspieszenia siły ciężkości wywołującymi efekt pływu litosferycznego na punkt o współrzędnych odpowiadających lokalizacji grawimetru *gPhoneX -157* w Katowicach (GOG w Katowicach). Etap ten objął okres 3 lat – od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r. W okresie tym na terenie GZW wystąpiły 602 wstrząsy sejsmiczne, które zostały zidentyfikowane jako indukowane eksploatacją złóż węgla kamiennego ([www.grss.gig.eu](http://www.grss.gig.eu)) i których energia przekraczała  $3E+05J$  ( $M_L = 1.9$ )

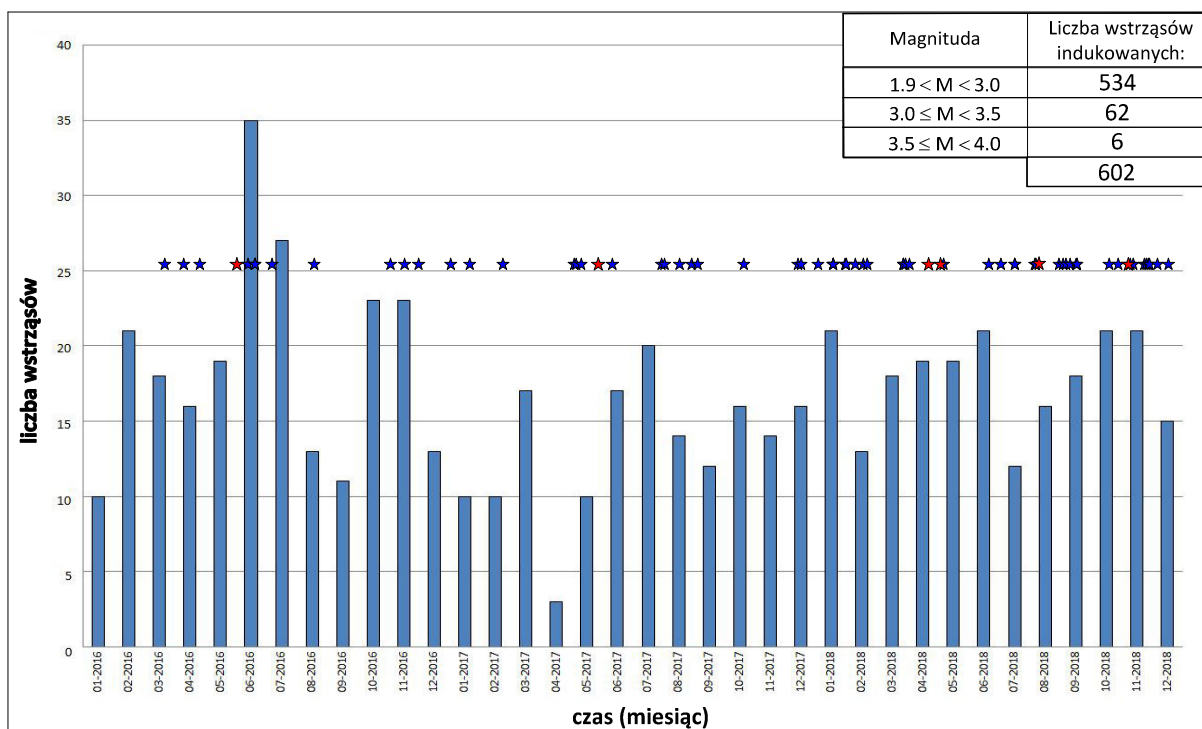
Rozkład przestrzenny zarejestrowanych wstrząsów pokrywa się z tym przedstawionym na rysunku 8 (rozdział *Sejsmiczność w GZW*), a więc koncentruje się wzdłuż największej równoleżnikowej strefy uskoku kłodnickiego oraz w obszarach podlegających wpływom intensywnej eksploatacji górniczej. W analizowanym zbiorze najwyższą magnitudę  $M_L=4.0$  ma wstrząs zarejestrowany 5 maja 2018 r., który wystąpił w obszarze górniczym KWK Zofiówka (JSW S.A.). Z kolei najniższą magnitudę, wykazaną w zbiorze danych,  $M_L = 1,9$  zarejestrowano w obszarze górniczym KWK Piast – Ziemowit ruch Piast (PGG S.A.). W badanym okresie czasu wystąpiło 6 wstrząsów, których magnituda została oszacowana na wyższą niż  $M_L=3.5$ , a więc były to wstrząsy również wyraźnie odczuwalne na powierzchni terenu w odległości kilkunastu – kilkudziesięciu kilometrów od epicentrum wstrząsu. Poza KWK Zofiówka wstrząsy takie wystąpiły w obszarach górniczych kopalń KWK Bobrek-Piekary ruch Bobrek (3 wstrząsy), KWK Mysłowice-Wesoła (1 wstrząs) oraz KWK Budryk (1 wstrząs). Rozkład przestrzenny badanego zbioru przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą (grss.gig.eu) w obszarze GZW w okresie 2016-2018 (zbiór GRSS(1)).

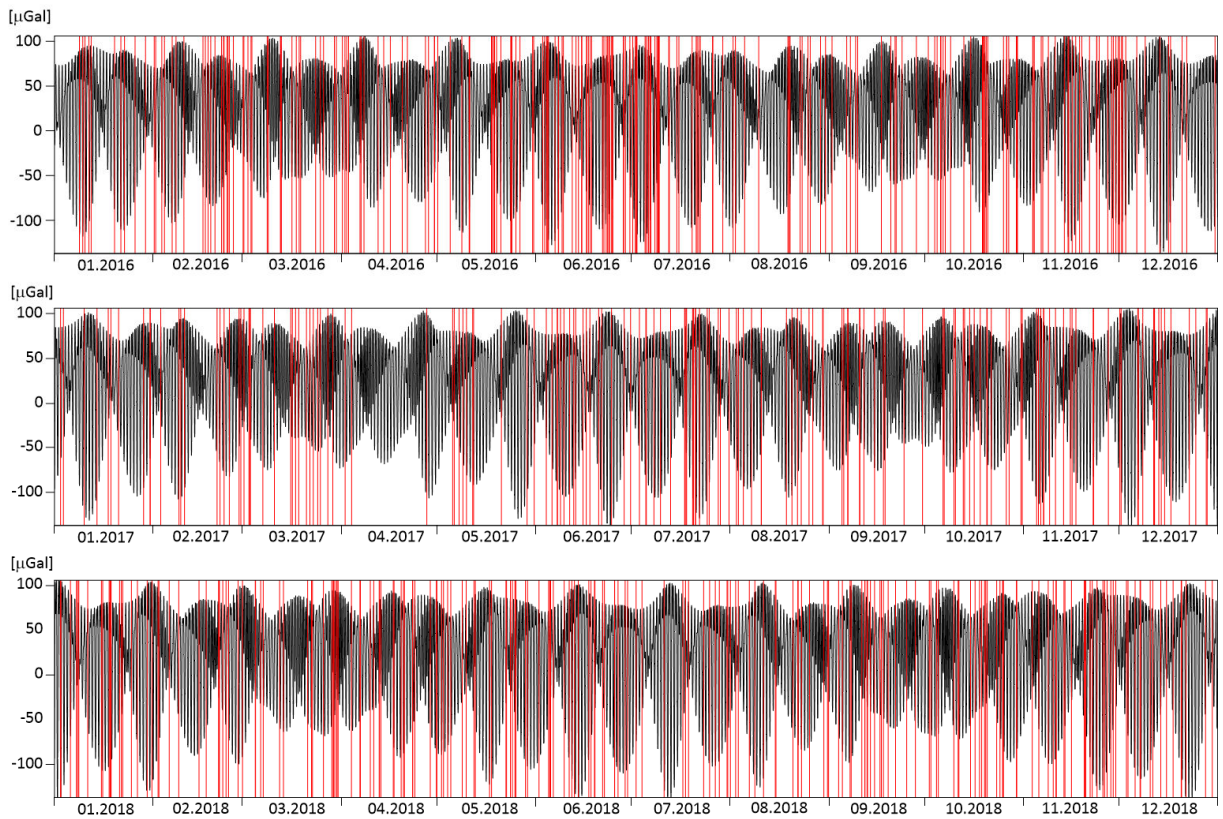
W analizowanym okresie czasu, średnio w miesiącu wystąpiło 16 wstrząsów indukowanych o magnitudzie wyższej niż 2.0, co odpowiada energii  $4E+05J$ . Najwięcej wstrząsów wystąpiło w czerwcu 2016 r., a najmniej w kwietniu 2017 r. Na rysunku 15 przedstawiającym czasowy rozkład zbioru można zauważyć, iż najsilniejsze wstrząsy, związane z regionalną sejsmicznością ( $M_L \geq 3.0$ ) wystąpiły w okresie generalnie wyższej liczby obserwowanych wstrząsów (okresów intensywniejszej aktywności sejsmicznej górniczej w rejonach wydobywczych).





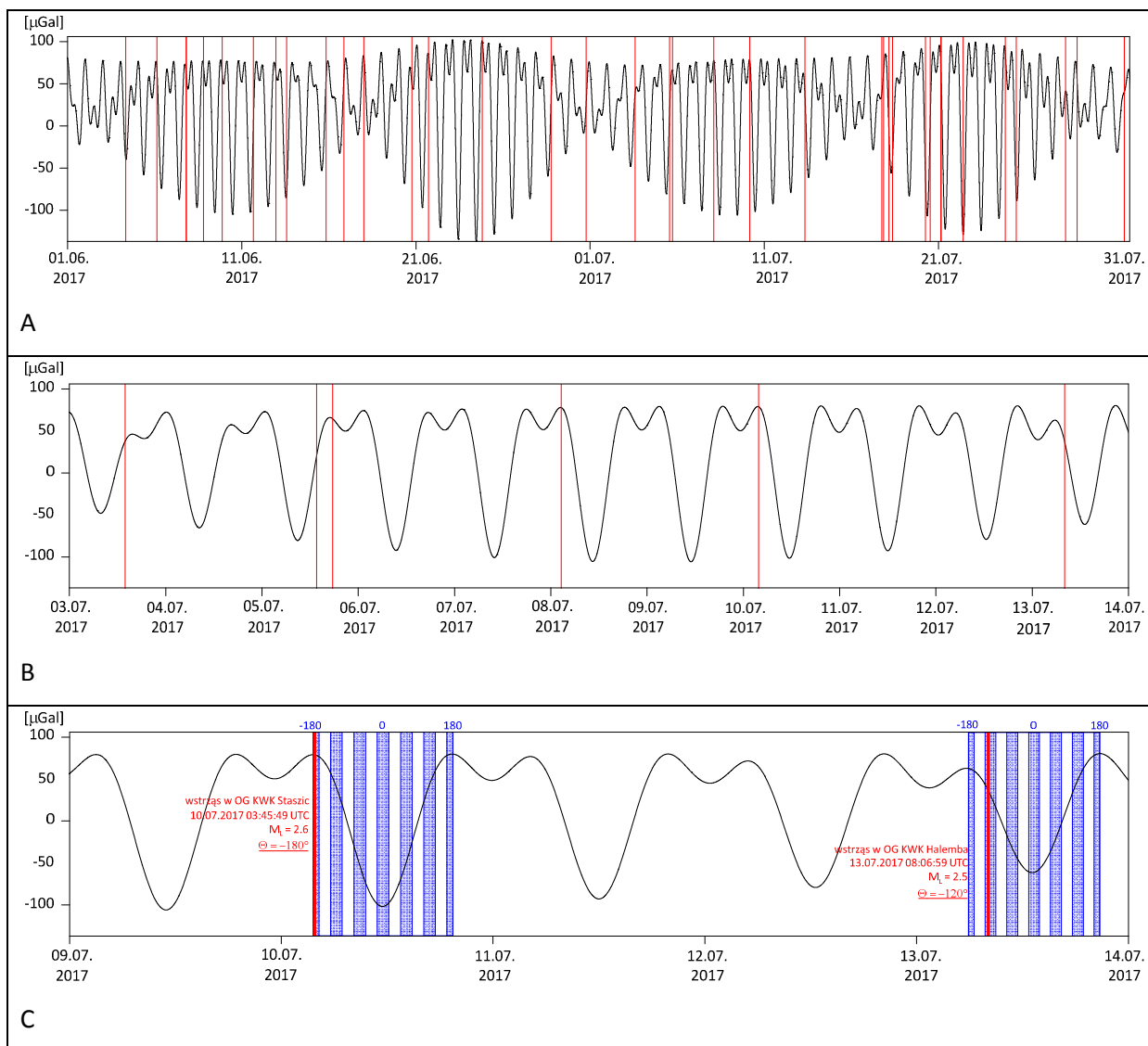
Rys. 15. Rozkład liczby wstrząsów w ujęciu miesięcznym w okresie 01.01.2016 -31.12.2018r – katalog GRSS(1).  
 Niebieskimi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o magnitudzie w przedziale 3.0 – 3.5.  
 Czerwonymi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o magnitudzie w przedziale 3.5 – 4.0.

Realizując pierwszą część pracy na wyznaczone sumaryczne, syntetyczne pływowe zmiany przyspieszenia siły ciężkości nałożono czasy wystąpienia indukowanych wstrząsów sejsmicznych zarejestrowanych w katalogu GRSS w latach 2016-2018. Dla potrzeb prawidłowej kalibracji danych, czasy wystąpienia wstrząsów, podane w serwisie GRSS w czasie lokalnym, przeliczono na czas UTC. Efekt złożenia dla całego zbioru, od 1.01.2016 do 31.12.2018 r. przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górniczą na syntetycznych zmianach przyspieszenia siły ciężkości w okresie 01.01.2016 -31.12.2018r – katalog GRSS(1).

Zgodnie z definicją pływowego kąta fazowego przedstawionego na rysunku 11 w rozdziale 6.1 dla każdego wstrząsu został wyznaczony jego kąt fazowy. Schemat takiego wyznaczenia ilustrują kolejne rysunki 17A, 17B i 17C. Wyznaczany kąt fazowy zawiera się w przedziale  $\pm 180^\circ$ , gdzie dla kąta  $+180^\circ$  oraz  $-180^\circ$  możemy mówić o grawitacyjnym obciążeniu pływowym o maksymalnej amplitudzie, natomiast dla kąta  $0^\circ$  mówimy o maksymalnym jego odciążeniu. Znak „minus” oznacza, iż następuje odciążenie grawitacyjne, a znak „plus” dociążanie. Ponieważ przebieg krzywej stanowiącej sumaryczny efekt grawitacyjny fal pływowych oddziaływujących na litosferę charakteryzuje się dużą zmiennością, przy wyznaczaniu kąta fazowego danego wstrząsu każdorazowo przyjmowano, iż najbliższe wstrząsowi maksima i minima krzywej są maksymalnymi lub minimalnymi obciążeniami związanymi z momentem czasu, w którym wystąpił dany wstrząs.



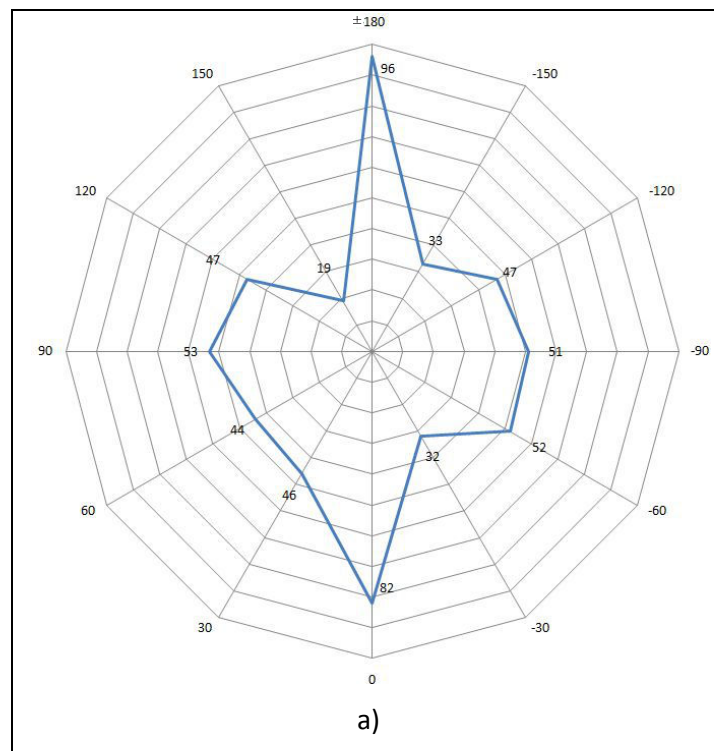
Rys. 17. Rozkład wstrząsów na syntetycznych zmianach przyspieszenia siły ciężkości w okresie 2 miesięcy(A), 11 dni (B) oraz 5 dni (C) – katalog GRSS(1).

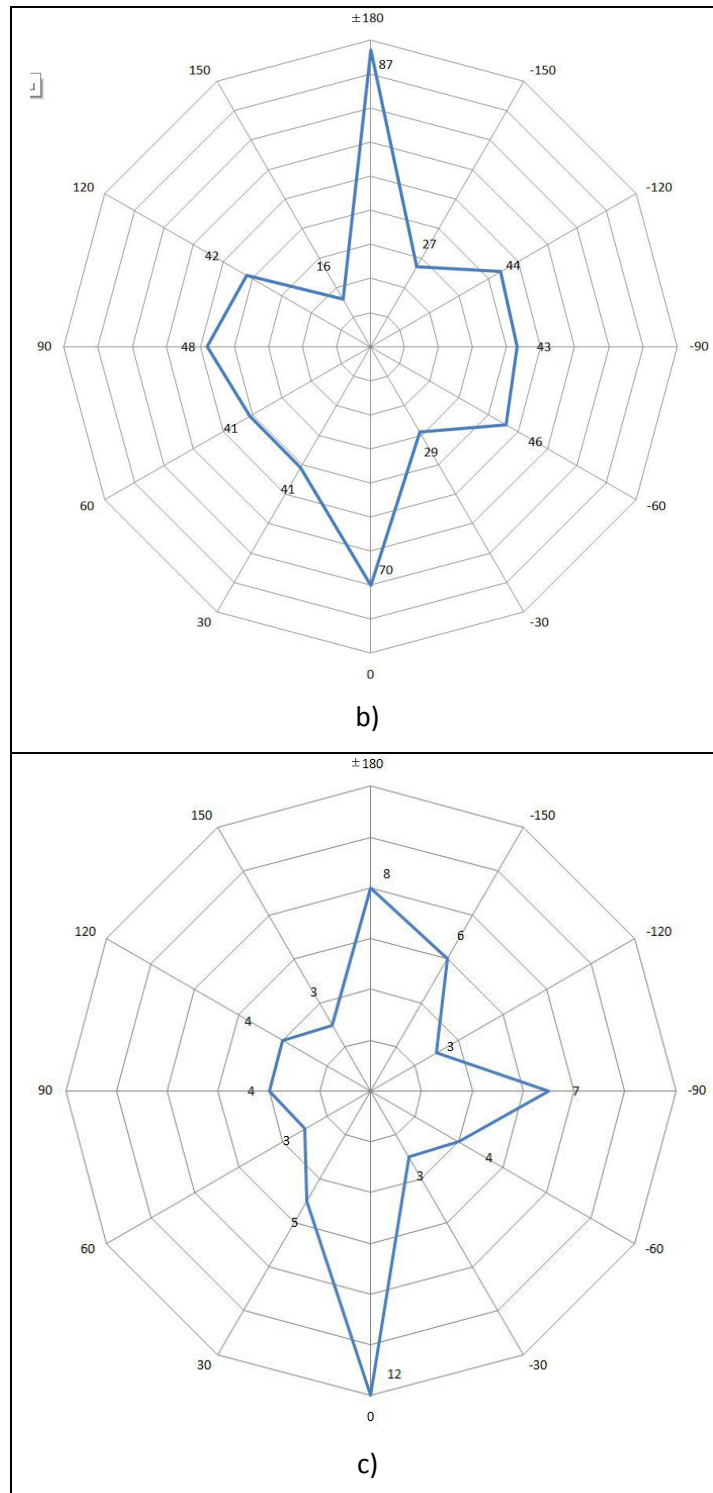
W efekcie analizy całego zbioru uzyskano wartości kąta fazowego  $\vartheta$  dla 602 wstrząsów indukowanych w okresie 2016-2018. Ich rozkład w zakresie od  $+180^\circ$  do  $-180^\circ$  zestawiono w tabeli 5. Ponieważ wartości  $+180^\circ$  oraz  $-180^\circ$  odnoszą się do efektu maksymalnego dociążenia zsumowano je do jednej komórki.

Tab. 5. Zestawienie wyznaczonych kątów fazowych czasu wystąpienia wstrząsu indukowanego działalnością górnictw dla zbioru GRSS(1) względem syntetycznych zmian przyspieszenia siły ciężkości dla całego zbioru (ALL) oraz z podziałem wg magnitudy  $M_L$ .

$\vartheta$	$\pm 180$	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150
$N_{ALL}$	96	33	47	51	52	32	82	46	44	53	47	19
$N_{1.9 \leq M_L < 3.0}$	87	27	44	43	46	29	70	41	41	48	42	16
$N_{3.0 \leq M_L < 3.5}$	8	6	3	7	4	3	12	5	3	4	4	3
$N_{3.5 \leq M_L \leq 4.0}$	1	0	0	1	2	0	0	0	0	1	1	0

Graficzne przedstawienie danych zawartych w tabeli 4 stanowi rysunek 18. Nie uwzględniono w nim danych dla podzbioru najsilniejszych energetycznie wstrząsów o magnitudzie z przedziału  $3.5 \leq M_L \leq 4.0$  (6 wstrząsów). Analizując uzyskane wykresy można zauważyć zróżnicowanie rozkładu zdarzeń w zależności od ich energii. Cały zbiór (rys. 18a) charakteryzuje się tym, iż blisko 30% wstrząsów (29,57%) wystąpiło w czasie maksymalnych amplitud dociążenia lub odciążenia górotworu. Wstrząsy w czasie maksymalnego dociążenia ( $\pm 180^\circ$ ) stanowiły 15,95% wszystkich wstrząsów natomiast w czasie maksymalnego odciążenia ( $0^\circ$ ) 13,62%. Praktycznie identyczny rozkład jest dla najliczniejszego podzbioru, a więc wstrząsów o magnitudzie z przedziału  $1.9 \leq M_L < 3.0$  (534 wstrząsów) (rys. 18b). Natomiast dla podzbioru obejmującego silniejsze wstrząsy  $3.0 \leq M_L < 3.5$  zawierającego 62 wstrząsy (rys. 18c) ponad 19% z nich wystąpiło w czasie maksymalnego odciążenia.





Rys. 18. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górniczą (katalog GRSS(1)) na podstawie wyznaczonego kąta fazowego względem sumarycznych, syntetycznych zmian przyspieszenia siły ciężkości.

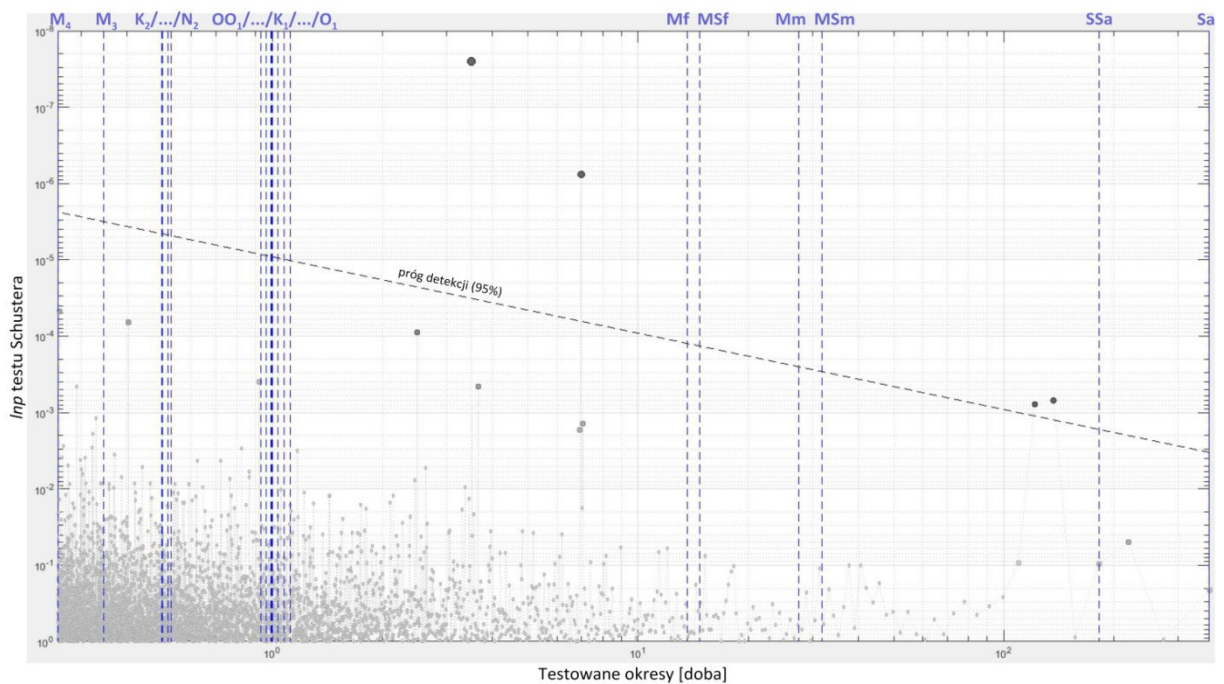
a) dla całego zbioru wstrząsów (ALL); b) dla wstrząsów o  $1.9 \leq M_L < 3.0$ ;

c) dla wstrząsów o  $3.0 \leq M_L < 3.5$ .

Najsilniejsze energetycznie wstrząsy o magnitudzie z przedziału  $3.5 \leq M_L \leq 4.0$  występują w trakcie odciążania (kąty  $\Theta = -90^\circ$  i  $-60^\circ$ ) lub dociążania górotworu ( $\Theta = 90^\circ$  i  $120^\circ$ ) – tab. 5.

W drugim etapie, dla analizowanego zbioru zbadano możliwość istnienia okresowości w występowaniu wstrząsów z zastosowaniem oprogramowania *Schuster\_spectrum*, którym

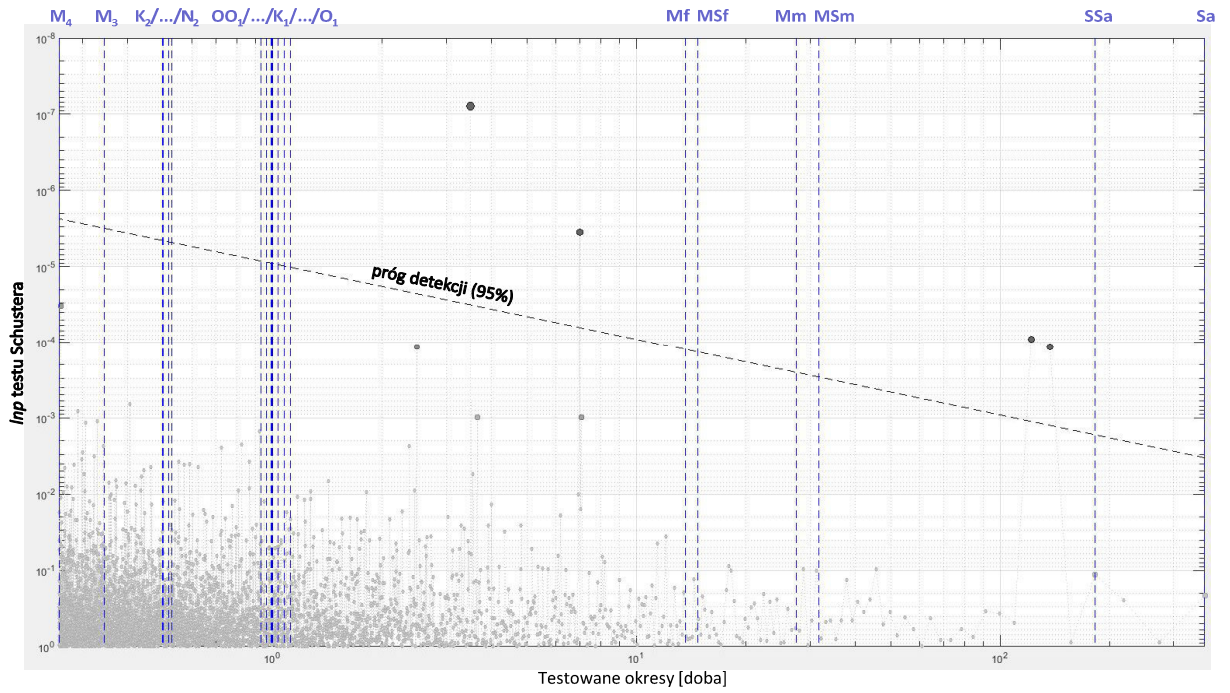
wyznaczono widmo testu Shuster'a. Wykres widma testu Schuster'a przedstawia wartość logarytmu naturalnego liczby  $p$  testu Schustera uzyskaną dla kolejnego badanego okresu  $T$  wyrażonego w dobach. Na wykresach pionową niebieską przerywaną linią zaznaczone są okresy 21 najważniejszych fal pływu litosferycznego wg tabeli 2 w rozdziale 2.2, z pominięciem dwóch długookresowych fal :DC i Long. Widmo uzyskane dla całego zbioru (rysunek 19) pokazuje, że dla 4 wartości okresu  $T$  (ok. 3.5, 7.0, 108,5 i 118 dób) wartość liczby  $p$  testu Schuster'a jest mniejsza niż 0.05, a więc uzyskana okresowość nie jest przypadkowa.



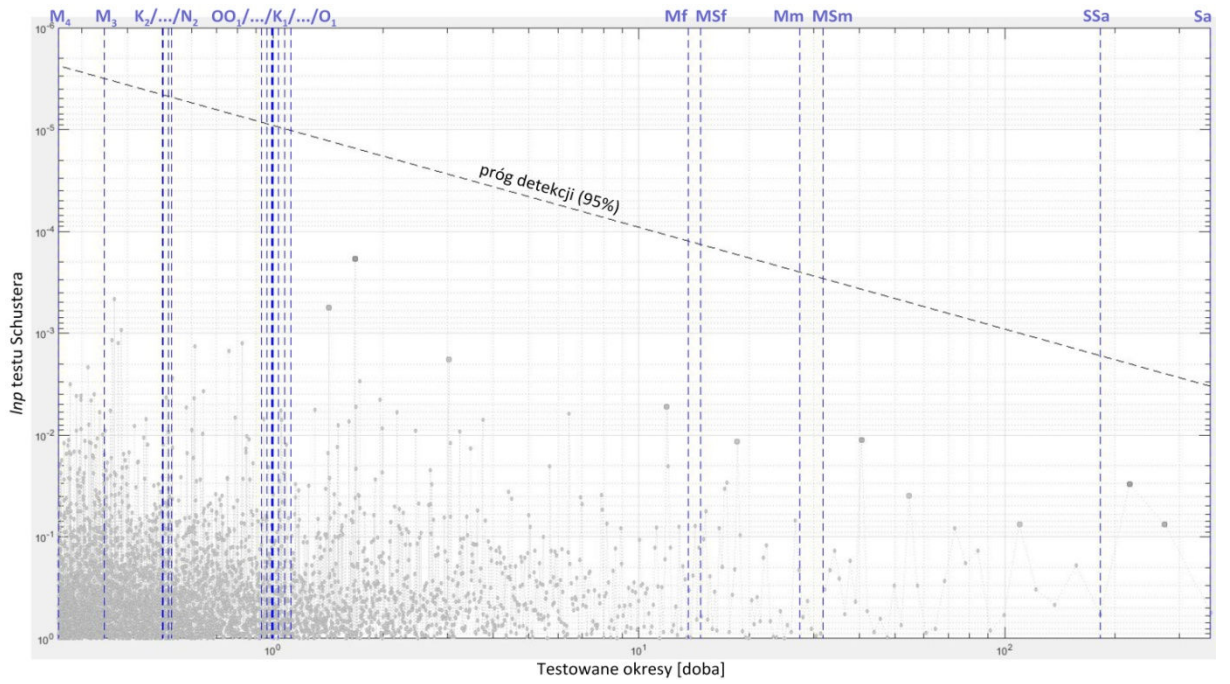
Rys. 19. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o  $1.9 < M_L < 4.0$  które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r.

Żaden z otrzymanych w widmie Schuster'a dla danych z całego zbioru danych okresów nie odpowiada okresom najważniejszych i jednocześnie najsilniejszych fal pływu litosferycznego. Okresy te nie są więc związane z oddziaływaniem fal pływu litosfery wywołanego zmianami przyspieszenia siły ciężkości. W celu uszczegółowienia informacji, analizę widma testu Schuster'a przeprowadzono również dla podzbiorów w różnych klasach energii zarejestrowanych wstrząsów. Uzyskane widma testu Schustera ilustrują rysunki 20 - 22.

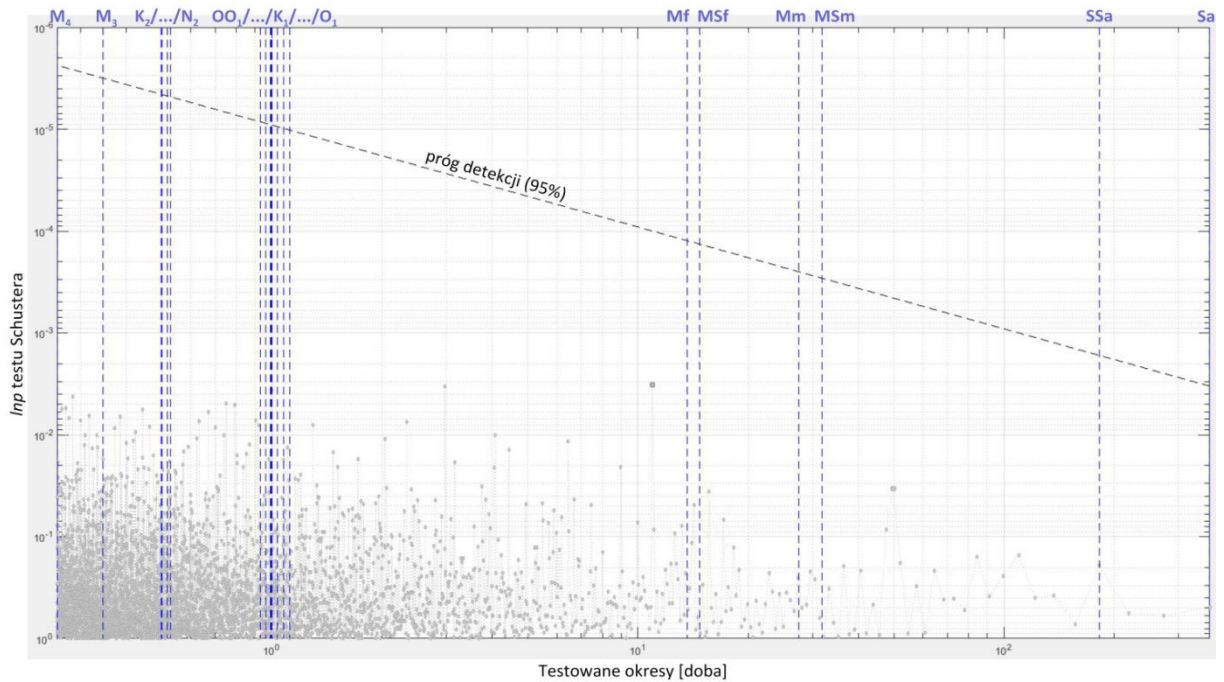




Rys. 20. . Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o  $1.9 \leq M_L < 3.0$  które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r



Rys. 21. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o  $3.0 < M_L \leq 3.5$  które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r.



Rys. 22. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o  $3.5 < M_L \leq 4.0$  które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r.

Z uzyskanych widm wynika, iż zaobserwowane dla całego zbioru okresy, dla których wartość liczby  $p$  testu Schuster'a jest mniejsza niż 0.05 związana jest z podzbiorem wstrząsów o magnitudzie z przedziału  $1.9 \leq M_L < 3.0$ , a więc wstrząsów sejsmicznych bezpośrednio związanych z eksploatacją górniczą występujących w bliskim otoczeniu eksploatowanego pola (Mutke i Dubiński 2016). Jest to jednocześnie podzbiór stanowiący liczebnie 80% całego badanego zbioru, więc ma silne oddziaływanie na widmo całego zbioru.

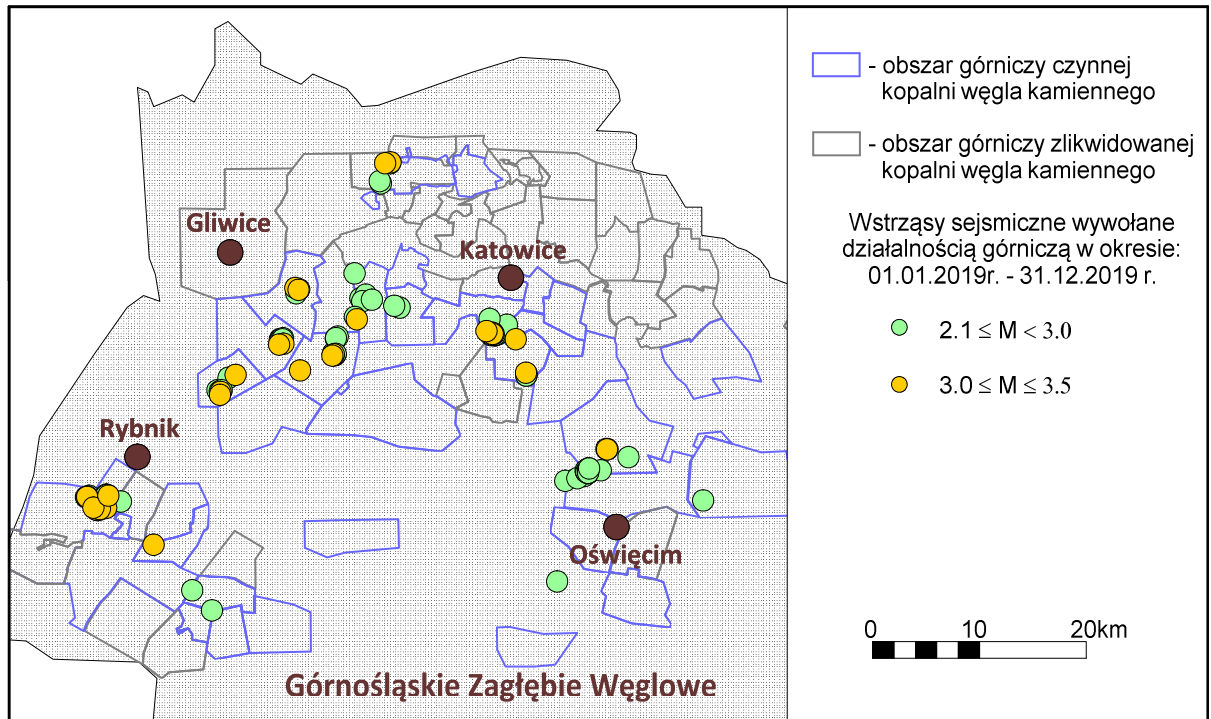
W efekcie wykonanej analizy zbioru GRSS(1) można stwierdzić, iż o ile dla analizowanego zbioru czas wystąpienia około 30% wstrząsów może być powiązany ze zmianą obciążenia wywołanego efektem grawitacyjnym pływu litosferycznego, o tyle brak jest zależności czasu wystąpienia wstrząsów w odniesieniu do okresów przebiegu najważniejszych fal pływu litosferycznego.



## 7.2 Katalog GRSS (2) 2019 – pływy rzeczywiste (gPhoneX-157)

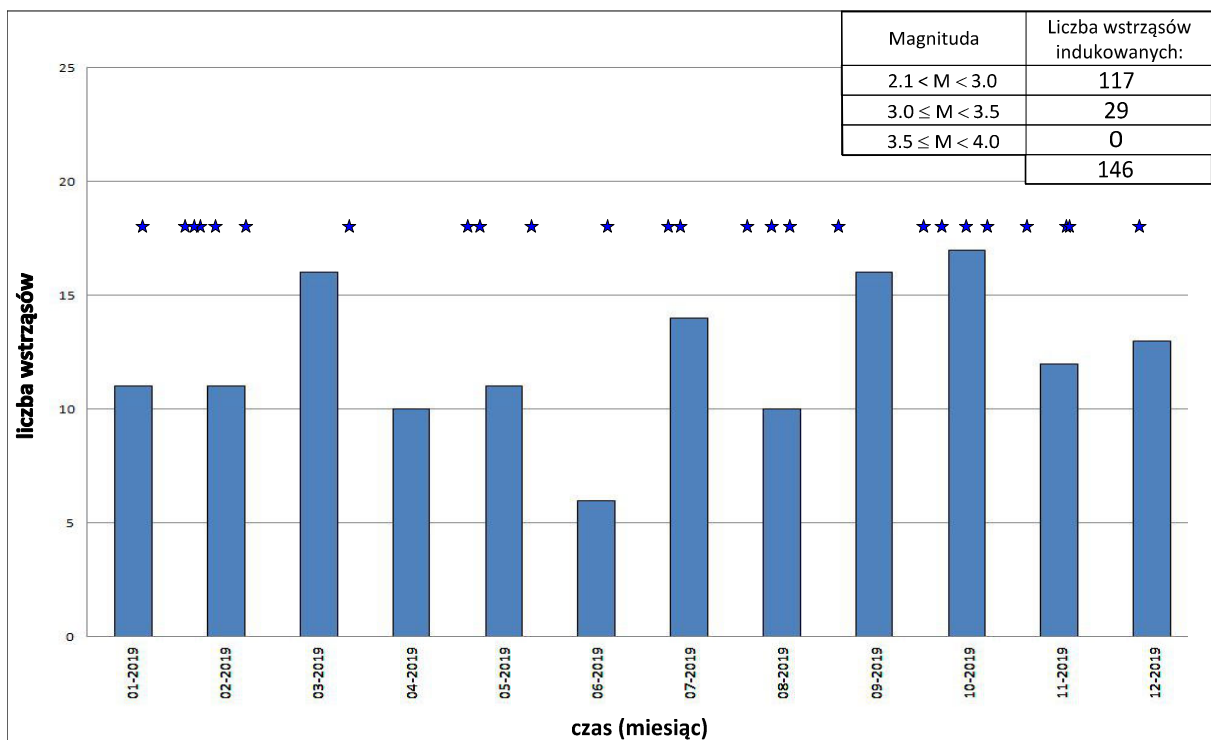
W drugim etapie przeprowadzono analizę danych o wstrząsach indukowanych (katalog GRSS(2)) w 2019 r i porównano czas ich wystąpienia z uzyskanym z pomiarów grawimetrem pływowym *gPhoneX -157* rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości jakie zachodzą w punkcie pomiaru w GOG w Katowicach, a których najważniejszym elementem jest pływ litosferyczny co przybliżono w rozdziale 2. Katalog objął okres 1 roku – od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r. a więc pierwszy pełny rok pracy grawimetru pływowego na stanowisku pomiarowym. W okresie tym na terenie GZW wystąpiły 146 wstrząsy sejsmiczne, które zostały zidentyfikowane jako indukowane eksploatacją złóż węgla kamiennego a których energia była wyższa niż  $6E+05J$  co odpowiada lokalnej magnitudzie  $M_L=2.1$  ([www.grss.gig.eu](http://www.grss.gig.eu)).

Rozkład przestrzenny zarejestrowanych wstrząsów, podobnie jak dla zbioru GRSS(1), pokrywa się z tym przedstawionym na rysunku 8 (rozdział *Sejsmiczność indukowana w GZW*), ale przede wszystkim koncentruje się w obszarach podlegających intensywnej eksploatacji górniczej – kopalń KWK Piast – Ziemowit ruch Ziemowit (PGG S.A.), KWK Murcki – Staszic(PGG Sp z o.o.), KWK Mysłowice Wesoła(PGG S.A.), KWK Bielszowice(PGG S.A.), KWK Bobrek-Piekary ruch Bobrek (Węglokoks Kraj Sp. z o.o.), KWK Sośnica (SRK Sp. z.o.o.), KWK Knurów-Szczygłowice (JSW S.A.) , KWK Pniówek (JSW S.A.), KWK Budryk (JSW S.A.) oraz KWK ROW ruch Rydułtowy (PGG S.A.). W 2019 r. najsilniejszy wstrząs miał magnitudę  $M_L = 3.4$  i wystąpił 22.01.2019 r. w obszarze górniczym kopalni KWK ROW Ruch Rydułtowy. Z kolei najslabszy wstrząs w badanym katalogu, o magnitudzie  $M_L = 2.1$  wystąpił 23.08.2019 r. w obszarze górniczym KWK Bobrek-Piekary ruch Piekary. Rozkład przestrzenny badanego zbioru przedstawiono na rysunku 23.



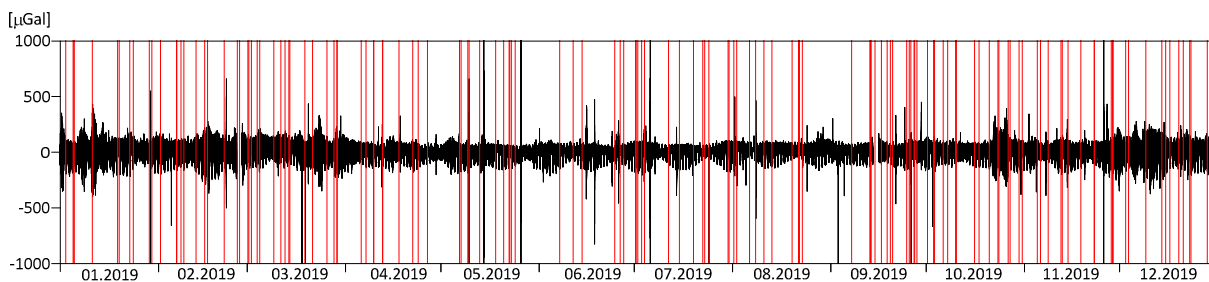
Rys. 23. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą (grss.gig.eu) w obszarze GZW w 2019 roku (zbiór GRSS(2)).

W analizowanym okresie średnio w miesiącu wystąpiło 12 wstrząsów indukowanych. Najwięcej wystąpiło ich w październiku a najmniej w czerwcu 2019 r. Na rysunku 24 przedstawiono czasowy rozkład zbioru.

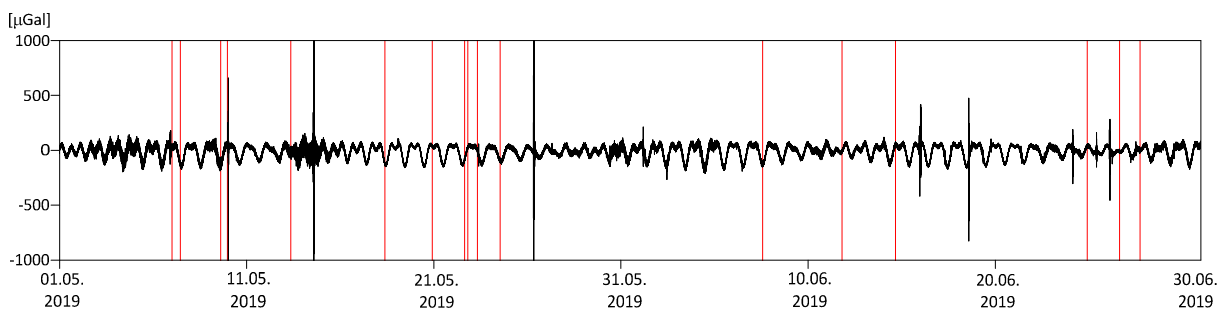


Rys. 24. Rozkład liczby wstrząsów w ujęciu miesięcznym w okresie 01.01.2019 - 31.12.2019r – katalog GRSS(2). Niebieskimi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o  $3.0 \leq M_l \leq 3.5$ .

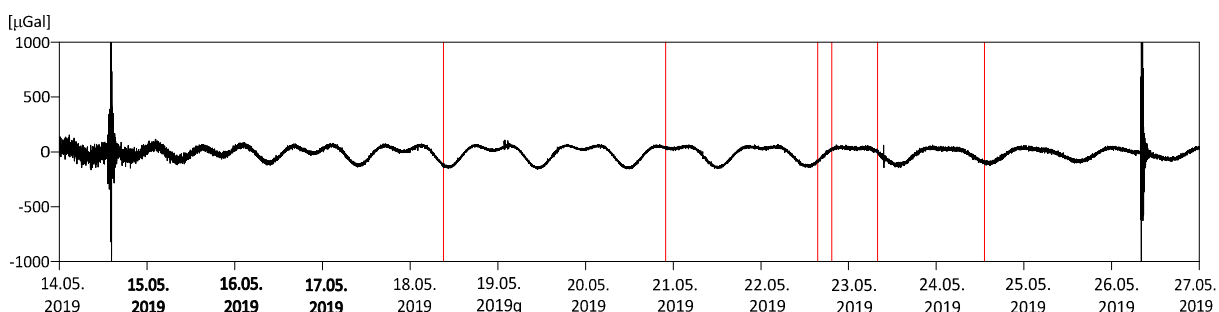
Na uzyskane z pomiarów, rzeczywiste zmiany przyspieszenia siły ciężkości obciążone efektem pływu litosferycznego, jaki jest widoczny w danych surowych (raw gravity data) uzyskiwanych z rejestracji prowadzonych grawimetrem pływowym *gPhoneX-157* nałożono czasy wystąpienia indukowanych wstrząsów sejsmicznych. Dla potrzeb prawidłowej kalibracji danych, czasy wystąpienia wstrząsów, podane w serwisie GRSS w czasie lokalnym, przeliczono na czas UTC. Efekt złożenia dla całego zbioru od 1.01.2019 do 31.12.2019 r przedstawiono na rysunku 25, w powiększeniu do dwóch miesięcy na rysunku 26 a do 13 dni na rysunku 27.



Rys. 25. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 01.01.2019 – 31.12.2019 r. — katalog GRSS(2).

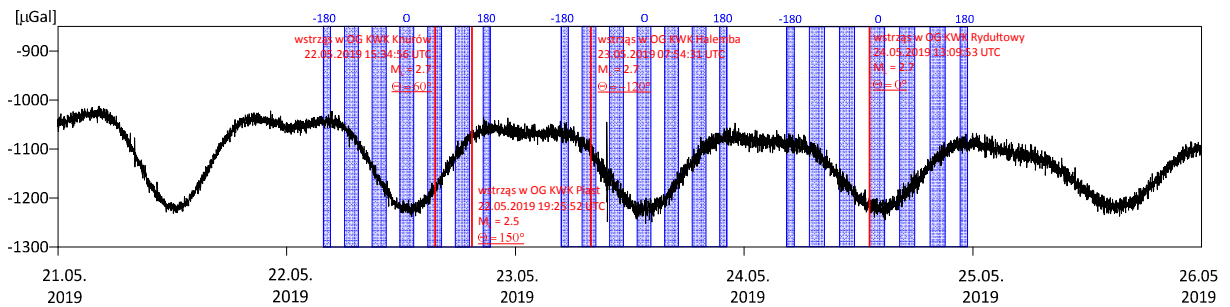


Rys. 26. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru dla okresu 2 miesięcy (01.05.2019 – 30.06.2019) – katalog GRSS(2).



Rys. 27. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 13 dni (14.05.2019 – 27.06.2019) – katalog GRSS(2).

Zgodnie z schematem przedstawionym dla katalogu GRSS(1), dla wstrząsów z katalogu GRSS(2) wyznaczono ich kąty fazowe  $\theta$ . Ich przykładowe wyznaczenie ilustruje rysunek 28.



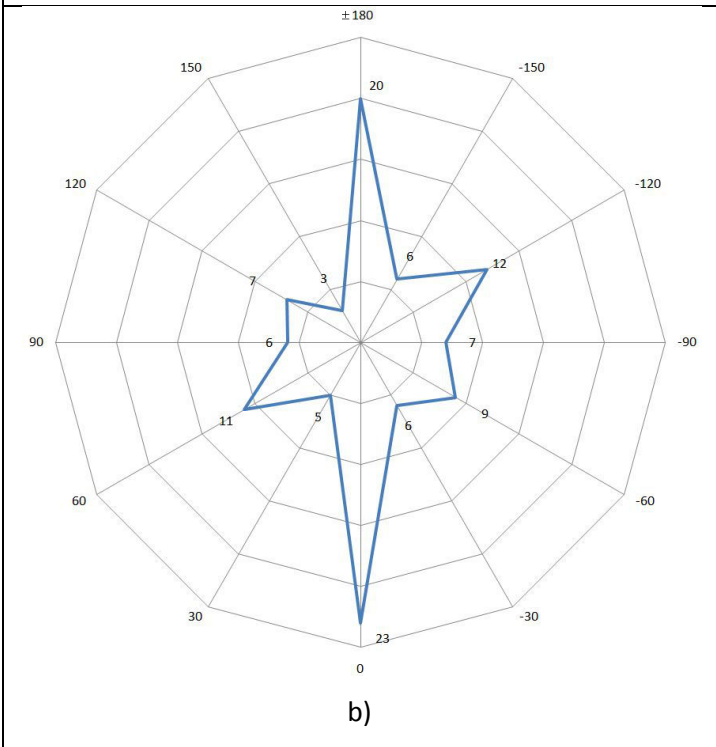
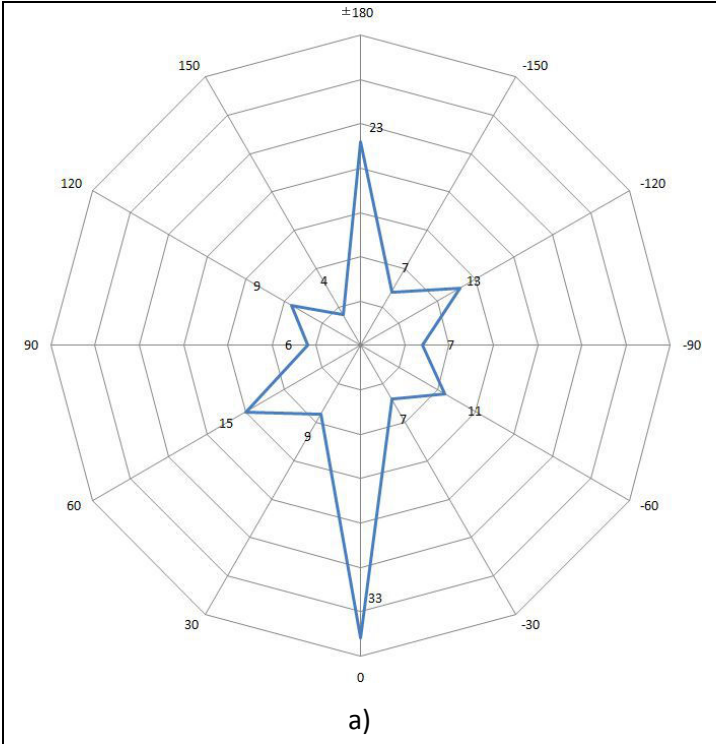
Rys. 28. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 5 kolejnych dni – katalog GRSS(2).

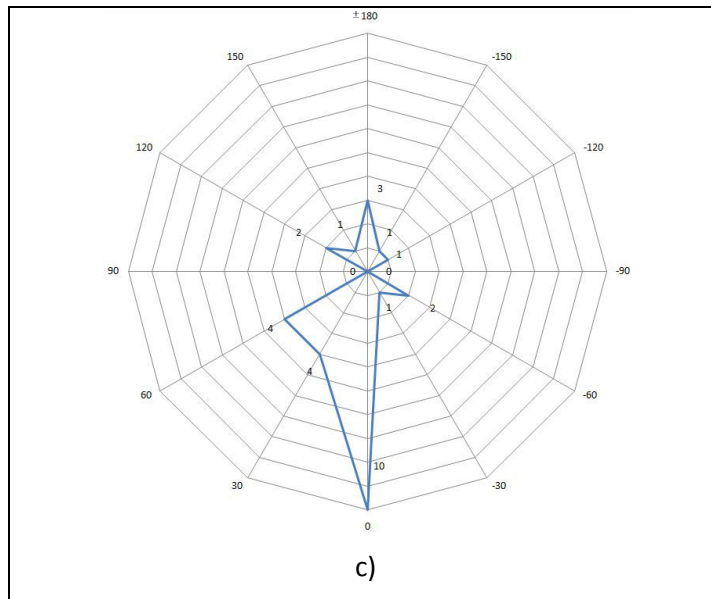
W ramach analizy zinterpretowano łącznie 144 z 146 wstrząsów, które wystąpiły w 2019 r. Dla 2 wstrząsów brak wyznaczenia kąta fazowego wynika z faktu, iż w czasie ich wystąpienia grawimetr gPhone-X 157 nie rejestrował zmian przyspieszenia siły ciężkości (awarie).

Tab. 6. Zestawienie wyznaczonych kątów fazowych czasu wystąpienia wstrząsu indukowanego działalnością górnictwem dla zbioru GRSS(2) względem rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanej pływaniami litosfery.

$\Theta$	$\pm 180$	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150
$N_{ALL}$	23	7	13	7	11	7	33	9	15	6	9	4
$N_{2.1 \leq M_L < 3.0}$	20	6	12	7	9	6	23	5	11	6	7	3
$N_{3.0 \leq M_L < 3.5}$	3	1	1	0	2	1	10	4	4	0	2	1

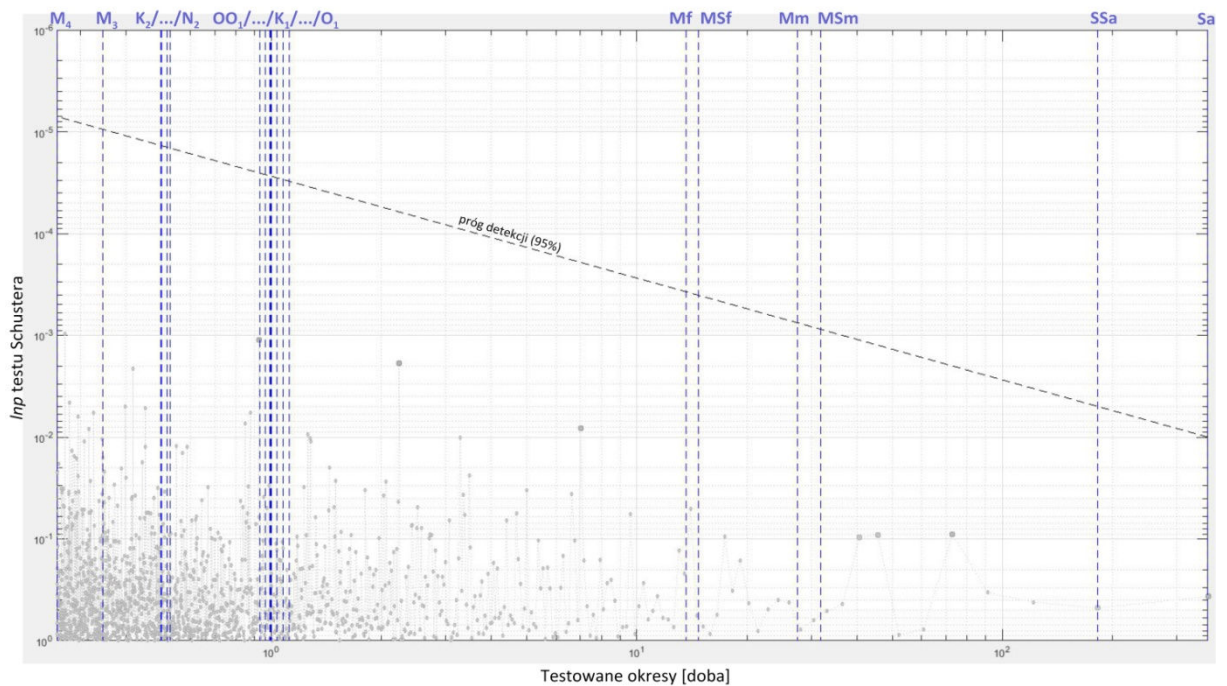
Graficzne przedstawienie danych zawartych w tabeli 6 stanowi rysunek 29. Cały zbiór (rys. 29a) charakteryzuje się tym, iż blisko 39% z 144 wstrząsów (38,89%) wystąpiło w czasie maksymalnego dociążenia lub odciążenia górotworu. Wstrząsy w czasie maksymalnego dociążenia ( $\pm 180^\circ$ ) stanowiły 15,97% wszystkich wstrząsów natomiast w czasie maksymalnego odciążenia ( $0^\circ$ ) - 22,92%. Obserwowany względem katalogu GRSS(1) 9% wzrost liczby wstrząsów związany jest z odciążeniem górotworu. Stanowiące najliczniejszy podzbiór wstrząsy o magnitudzie zawierającej się w przedziale  $2.1 \leq M_L < 3.0$  generalnie stanowią powielenie obrazu dla całego zbioru. Wstrząsy które występują przy maksymalnym dociążeniu lub odciążeniu grawitacyjnym górotworu stanowią 37,39% podzbioru. Dla podzbioru obejmującego najsilniejsze w katalogu GRSS(2) wstrząsy  $3.0 \leq M_L < 3.5$  zawierającego 29 wstrząsy (rys. 29c) blisko 45% (44,83%) z nich wystąpiło w czasie maksymalnego dociążenia/odciążenia grawitacyjnego górotworu.





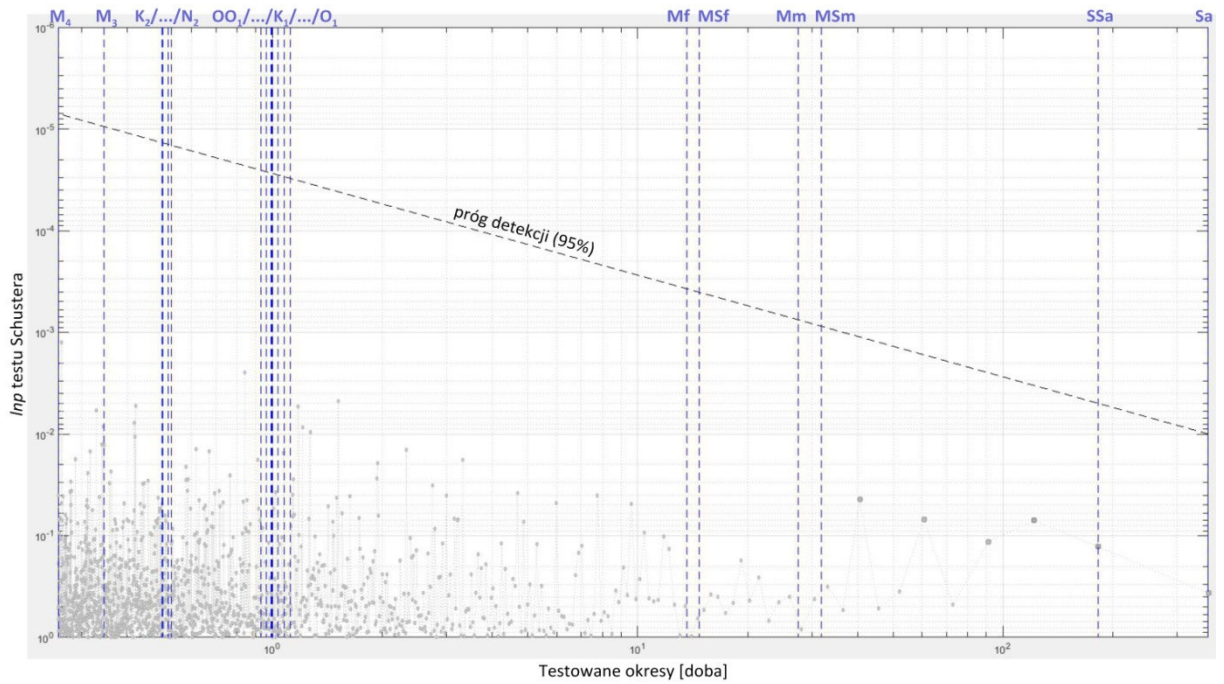
Rys. 29. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górniczą (katalog GRSS(2)) na podstawie wyznaczonego kąta fazowego względem sumarycznych, rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanych pływaniami litosfery.  
 a) dla całego zbioru wstrząsów; b) dla wstrząsów o  $2.1 \leq M_L < 3.0$ ;  
 c) dla wstrząsów o  $3.0 \leq M_L < 3.5$ .

W drugim etapie dla analizowanego zbioru zbadano możliwość istnienia okresowości w występowaniu wstrząsów, szczególnie z uwzględnieniem okresów najważniejszych fal pływowych zestawionych w tabeli 2. Na rysunkach 30 – 32 przedstawiono wyniki wykonanej analizy dla całego zbioru oraz dla wyszczególnionych podzbiorów.

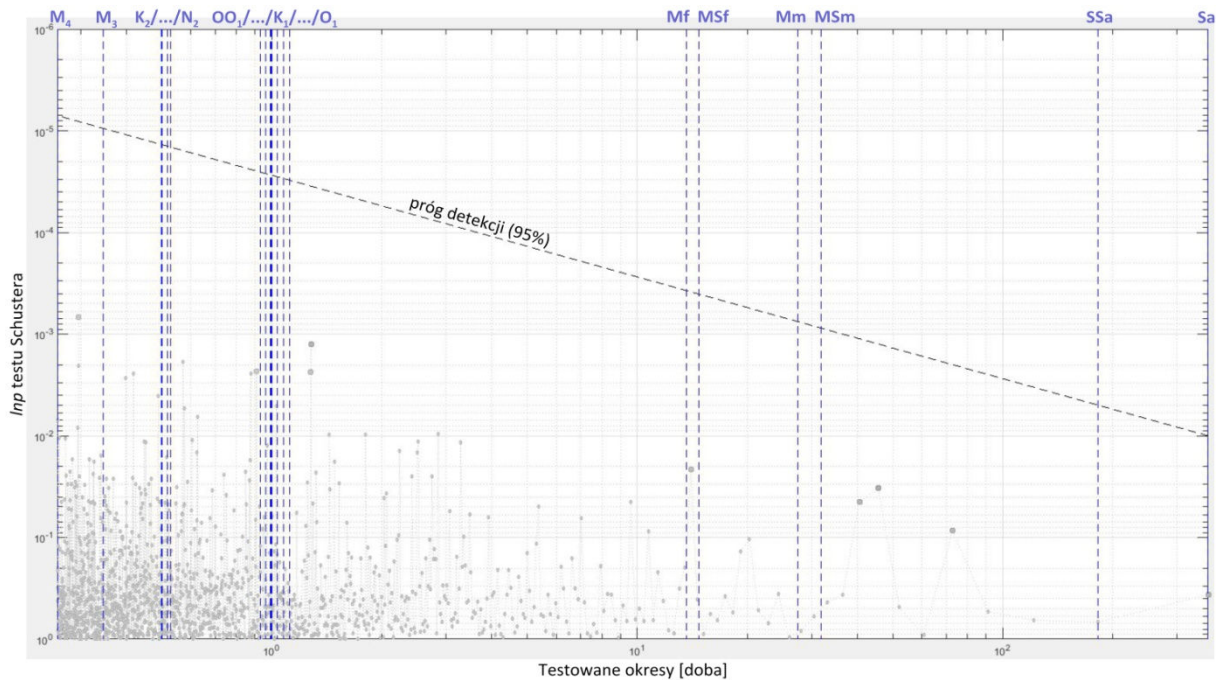


Rys. 30. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o  $2.1 \leq M_L < 3.5$  które wystąpiły w okresie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r.





Rys. 31. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o  $2.1 \leq M_L < 3.0$  które wystąpiły w okresie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r.



Rys. 32. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o  $3.0 \leq M_L < 3.5$  które wystąpiły w okresie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r.

Uzyskane wyniki widm testu Schuster'a dla całego zbioru jak i podzbiorów wyznaczonych w oparciu o energię wstrząsów nie pozwalają na powiązanie czasu wystąpienia wstrząsów z wybranymi okresami głównych fal pływowych. Nie obserwuje się również istnienia okresowości, jaka została wyodrębniona w katalogu GRSS(1) dla podzbioru wstrząsów związanych bezpośrednio

z sejsmicznością indukowaną w rejonie prowadzonej eksploatacji o magnitudzie z przedziału  $1.9 \leq M_L < 3.0$ .



### 7.3 Katalog ROWR19 – pływy rzeczywiste (gPhoneX-155)

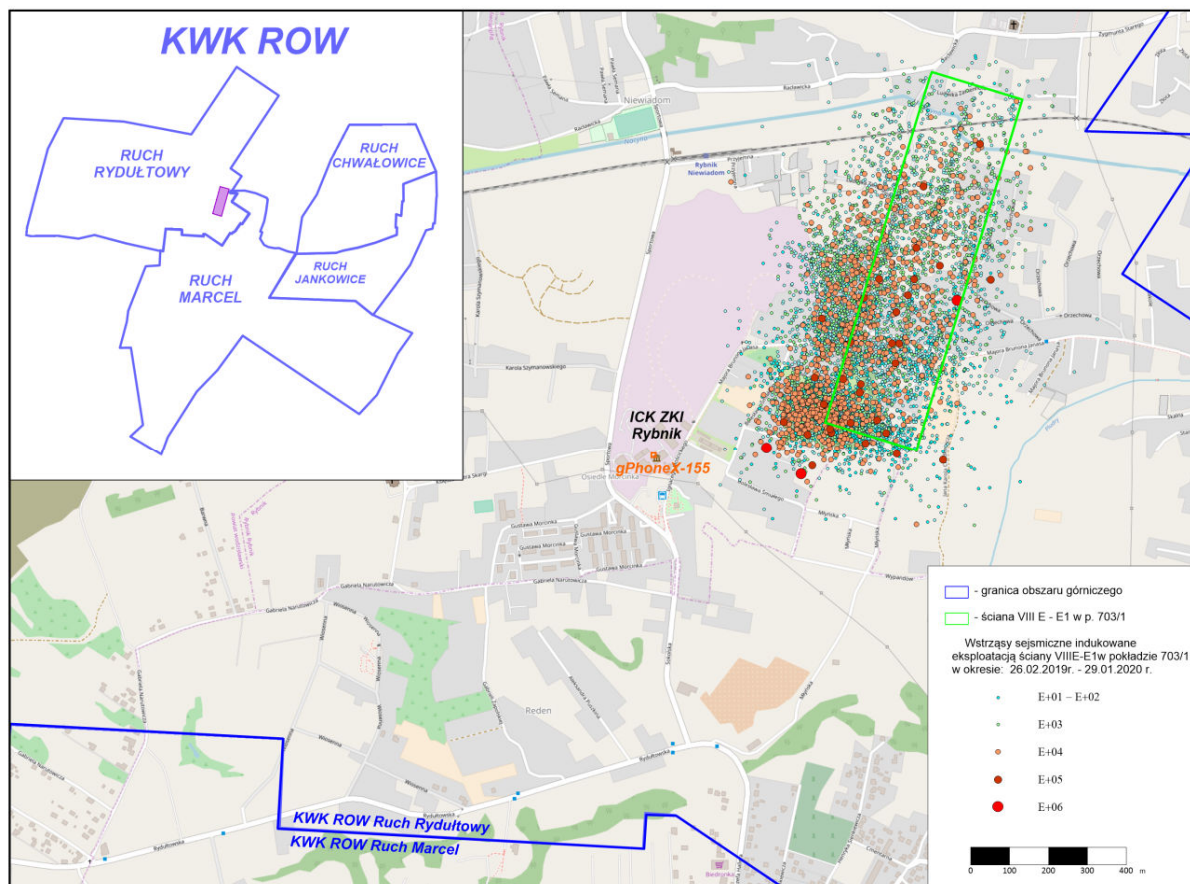
Analiza katalogu zawierającego dane o sejsmiczności indukowanej związanej bezpośrednio z eksploatacją ściany w złożu węgla kamiennego, poza analizą obejmującą elementy jak dla katalogów GRSS(1) i GRSS(2) poddano dodatkowej analizie obrazującej aspekty aktywności sejsmicznej indukowanej eksploatacją złoża węgla kamiennego

Analizowany zbiór wstrząsów indukowanych dotyczy eksploatacji ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1, położonej w północno-wschodniej części złoża w OG Rydułtowy I, którego użytkownikiem górniczym jest PGG Sp. z o.o. KWK ROW ruch Rydułtowy. Ściana ta od zachodu sąsiaduje z filarem granicznym KWK ROW ruch Marcel o szerokości 100m. Od północy ze strefą uskoku kolejowego, który w kopalni Marcel był w przeszłości odpowiedzialny za generowanie bardzo silnych energetycznie wstrząsów sejsmicznych, prowadzących do uszkodzeń infrastruktury górniczej (tąpnięcia). Uskok kolejowy stanowi północną granicę OG Rydułtowy I, zrzucając utwory karbonu o ok. 180m na północ. Na zachód od ściany znajdują się zroby po wyeksploatowanej ścianie VII E-E1, której eksploatacja prowadzona była od grudnia 2015 do maja 2017. Eksploatacja tej ściany została zakończona wcześniej z powodu wystąpienia pożaru złoża.

Eksploatacja ściany VIII-E E1 w pokładzie 703/1, będącym najpłytszym z pokładów węgla należących do warstw jakłowieckich prowadzona była w zmiennych warunkach geologicznych na głębokości ok. 1000 - 1100 p.p.t. Otoczenie pokładu stanowią łupki ilaste (w stropie) oraz mułowce a rzadziej piaskowce (w spągu). Najbliższy wyżej legły pokład węgla 630/2 znajduje się na głębokości ok 900m (ok. 100-200 m płycej). Pokład zapada na północny – zachód pod kątem od 3° do 10°. Rzędne spągu w chodniku 8-E-E1 biegnącym po stronie wschodniej ściany zmieniają się od -741m p.p.m. na południu do -781m p.p.m. na północy. Przebiegający równolegle po stronie zachodniej ściany chodnik 7-E-E1 położony jest ok. 30m niżej (-770 do 810m p.p.m.). Wysokość wybieranej warstwy wynosiła maksymalnie 2,8m. Średnia miąższość węgla w wybieranej warstwie zmieniała się od 1,8 do 2,2m. W początkowej części ściany węgiel był rozdzielony warstwą łupku ilastego o miąższości dochodzącej do 0,5m. W pokładzie, od strony chodnika 7-E-E1 (chodnik zachodni) stwierdzono dwa niewielkie uskoki o zrzutach od h=0.7m do h=1.2m, które nie kontynuowały się w ścianie. Postęp ściany następował z północy na południe.

Katalog ROWR19 zawiera informacje o wstrząsach sejsmicznych, które wystąpiły w okresie od uruchomienia ściany w dn. 26.02.2019 r. do 29.01.2020 r. (a więc około miesiąca po zakończeniu jej ruchu w dn. 31.12.2019 r.). Wstrząsy indukowane działalnością górniczą z bazy KWK ROW ruch Rydułtowy zostały porównane z zapisami zmian przyspieszenia siły ciężkości z grawimetru *gPhoneX-155* zlokalizowanego w odległości od 1.2 km do około 200-300 m od frontu ściany. Rozkład

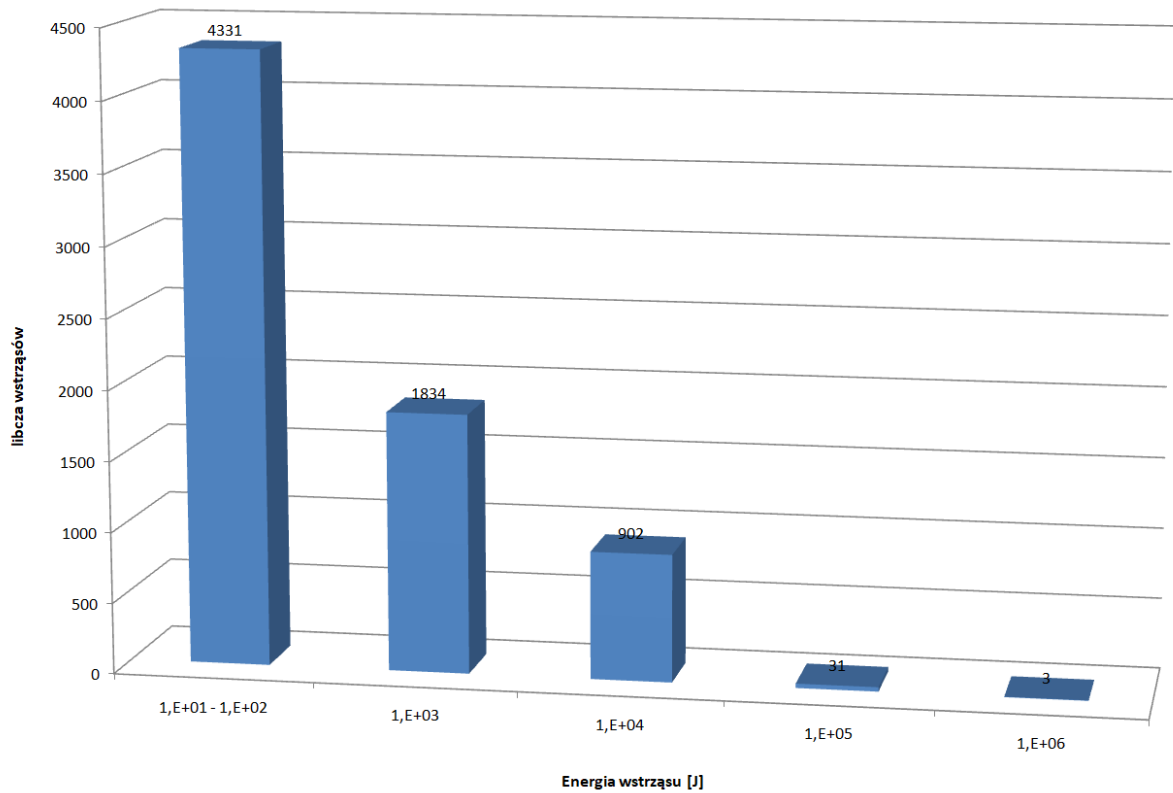
przestrzenny wstrząsów względem eksploatowanej ściany oraz stanowiska pomiarowego grawimetru *gPhoneX-155* ilustruje rysunek 33.



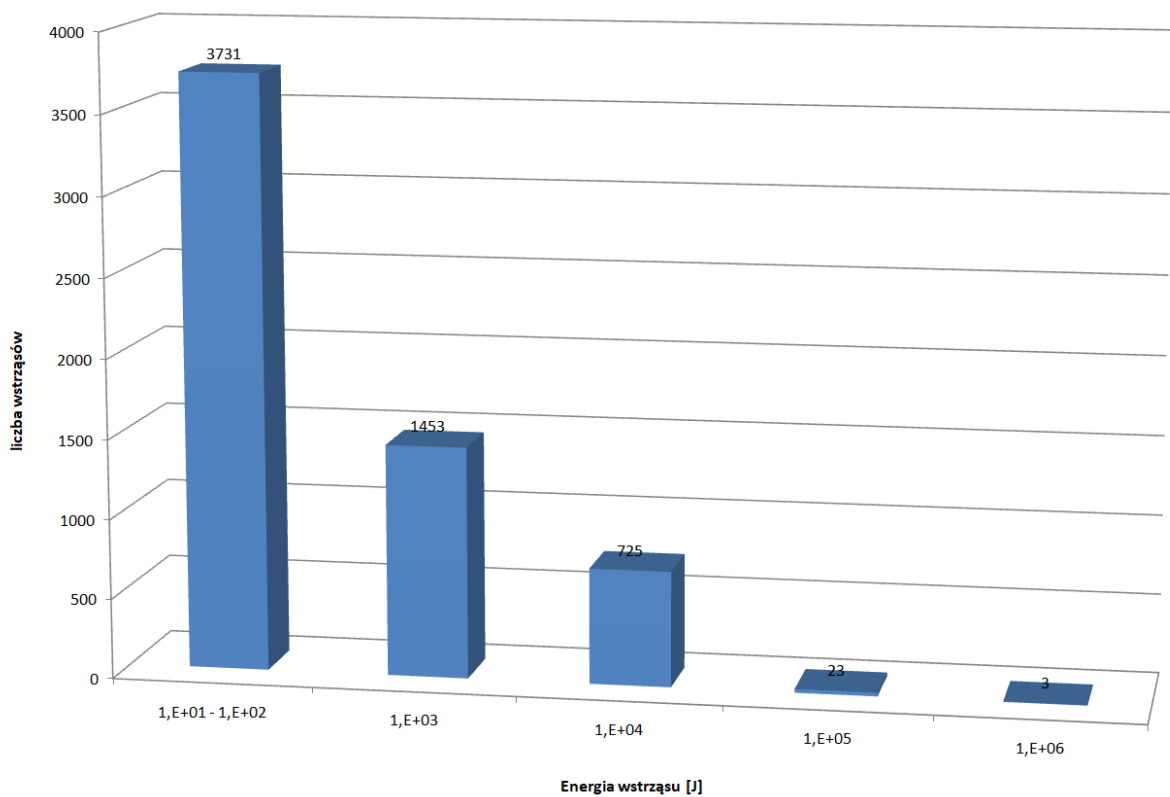
Rys. 33. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych eksploatacją ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1 w KWK ROW ruch Rydułtowy w okresie od 26.02.2019 r. (uruchomienie ściany) do 29.01.2020 r. (ok 30 dni od zakończenia ściany) – katalog ROWR19.

Katalog zawiera wstrząsy o energiach od 4.23J do 6.4E+06J co odpowiada magnitudzie lokalnej w zakresie od ok. 0.05 do ok 2.65. Sumaryczna energia tych wstrząsów wyniosła 6.61E+07J. W katalogu zawierającym 7101 wstrząsów zarejestrowanych w rejonie ściany jedynie 27 wstrząsów (24 o energii większej niż 3E+05J i 3 o energii większej niż 1E+06J) zawiera się w zakresie przebadanych wcześniej grup wstrząsów (1 o  $M = 2,65$  i 26 wstrząsów o  $2.0 \leq M < 2.5$ ). W porównaniu z katalogami GRSS(1) i GRSS(2) katalog ROWR19 zawiera wszystkie rejestrowane kopalnią aparaturą sejsmologiczną wstrząsy związane z eksploatacją jednej ściany w złożu węgla kamiennego. Energia zdecydowanej większości zarejestrowanych wstrząsów (7074 wstrząsów z 7101) jest dużo niższa aniżeli wstrząsów analizowanych wcześniej. W zbiorze dominują wstrząsy o energii E+02J, które stanowią 41,5% wstrząsów.

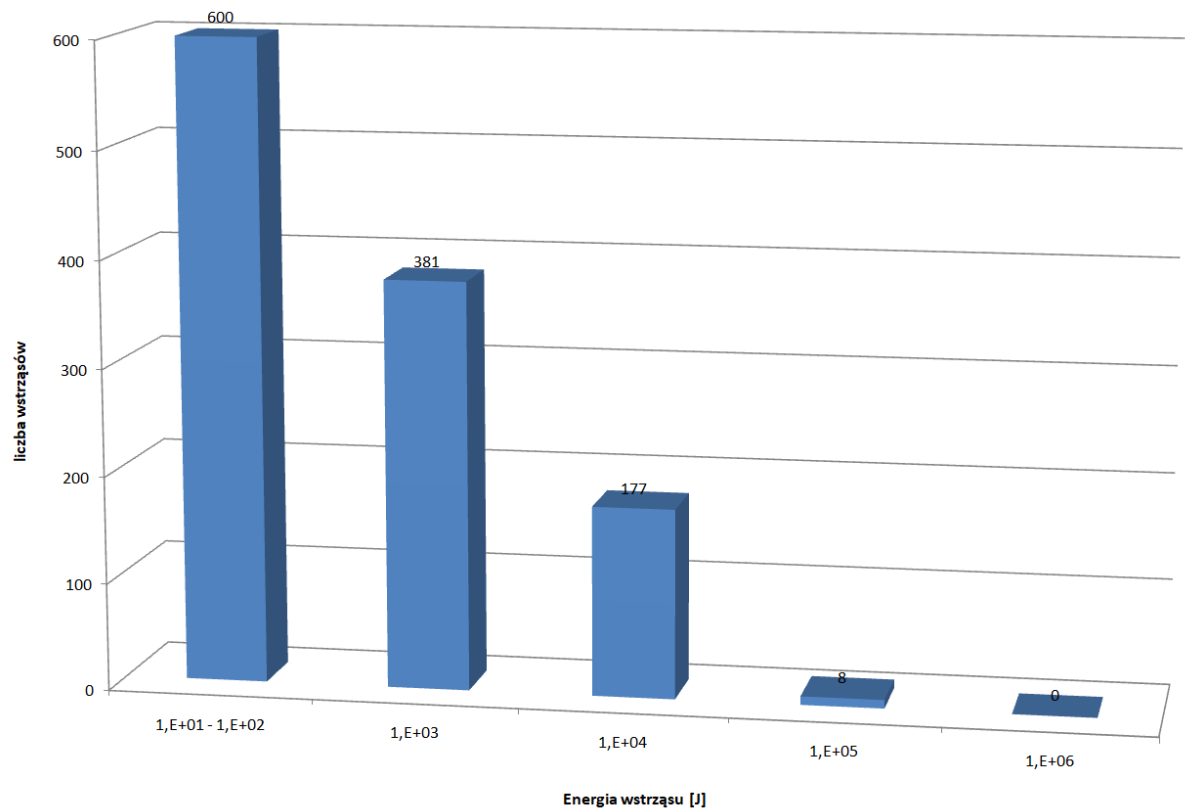
Aktywność sejsmiczną związaną z eksploatacją ściany VIII E-1E ilustrują rysunki 34, 35 i 36.



Rys. 34. Aktywność sejsmiczna w rejonie ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy.



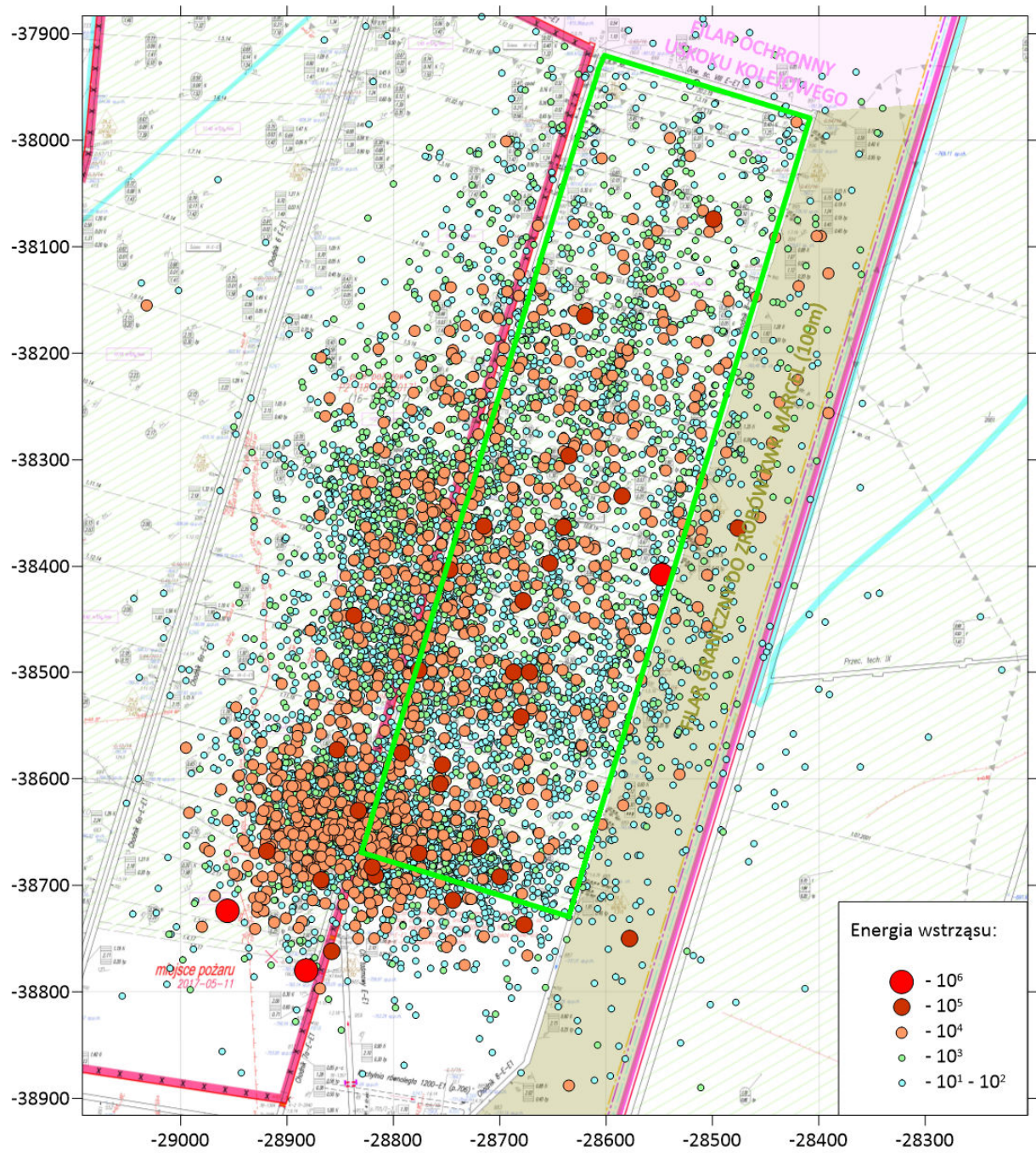
Rys. 35. Aktywność sejsmiczna zarejestrowana przed frontem eksploatacji ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy.



Rys. 36. Aktywność sejsmiczna zarejestrowana za frontem eksploatacji ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy.

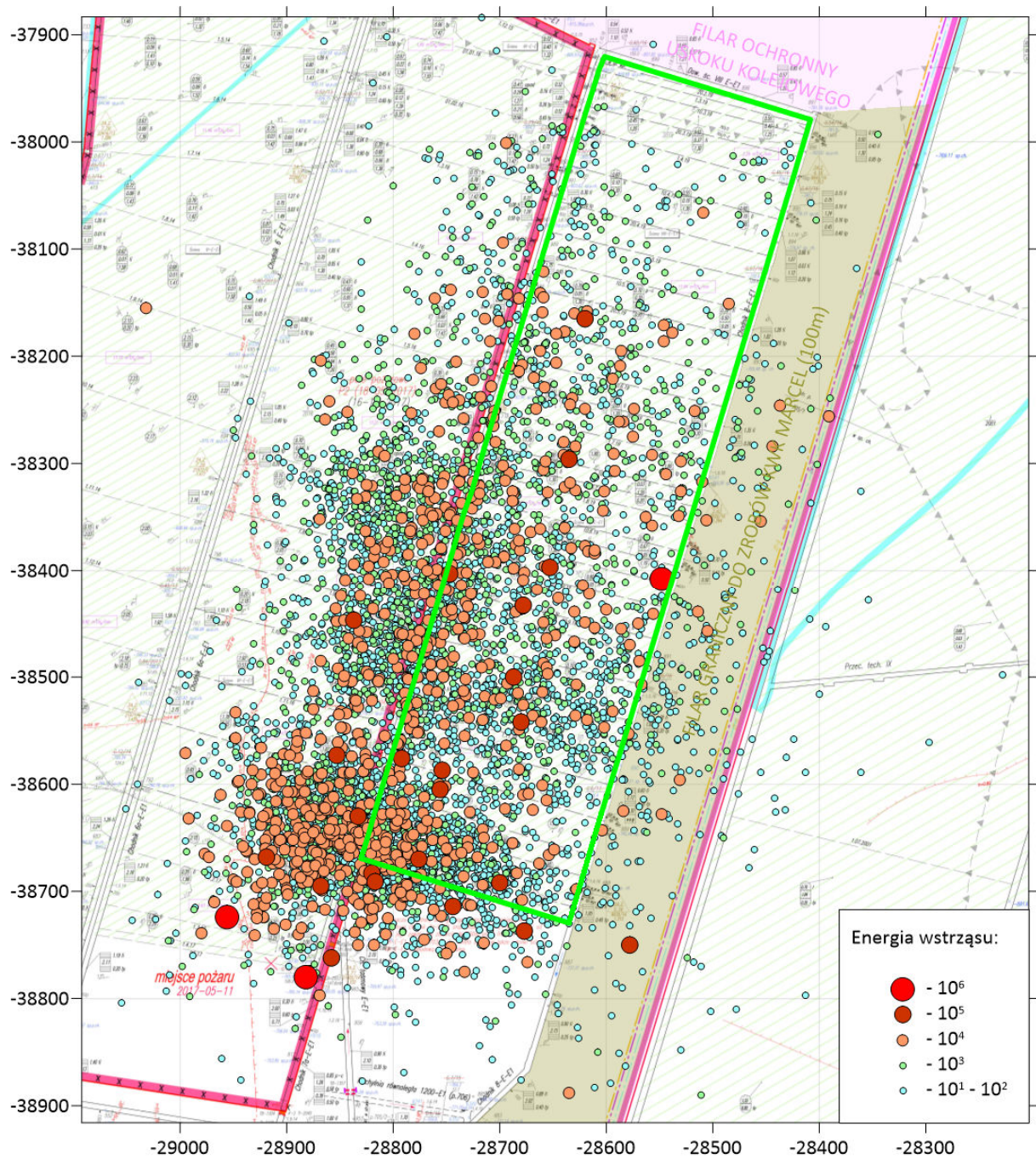
Natomiast ich szczegółową lokalizację względem ściany, z rozbiciem na zbiór wszystkich wstrząsów oraz podzbiory tych wstrząsów które wystąpiły przed oraz za frontem eksploatacji ściany ilustrują rysunki 37, 38 i 39.





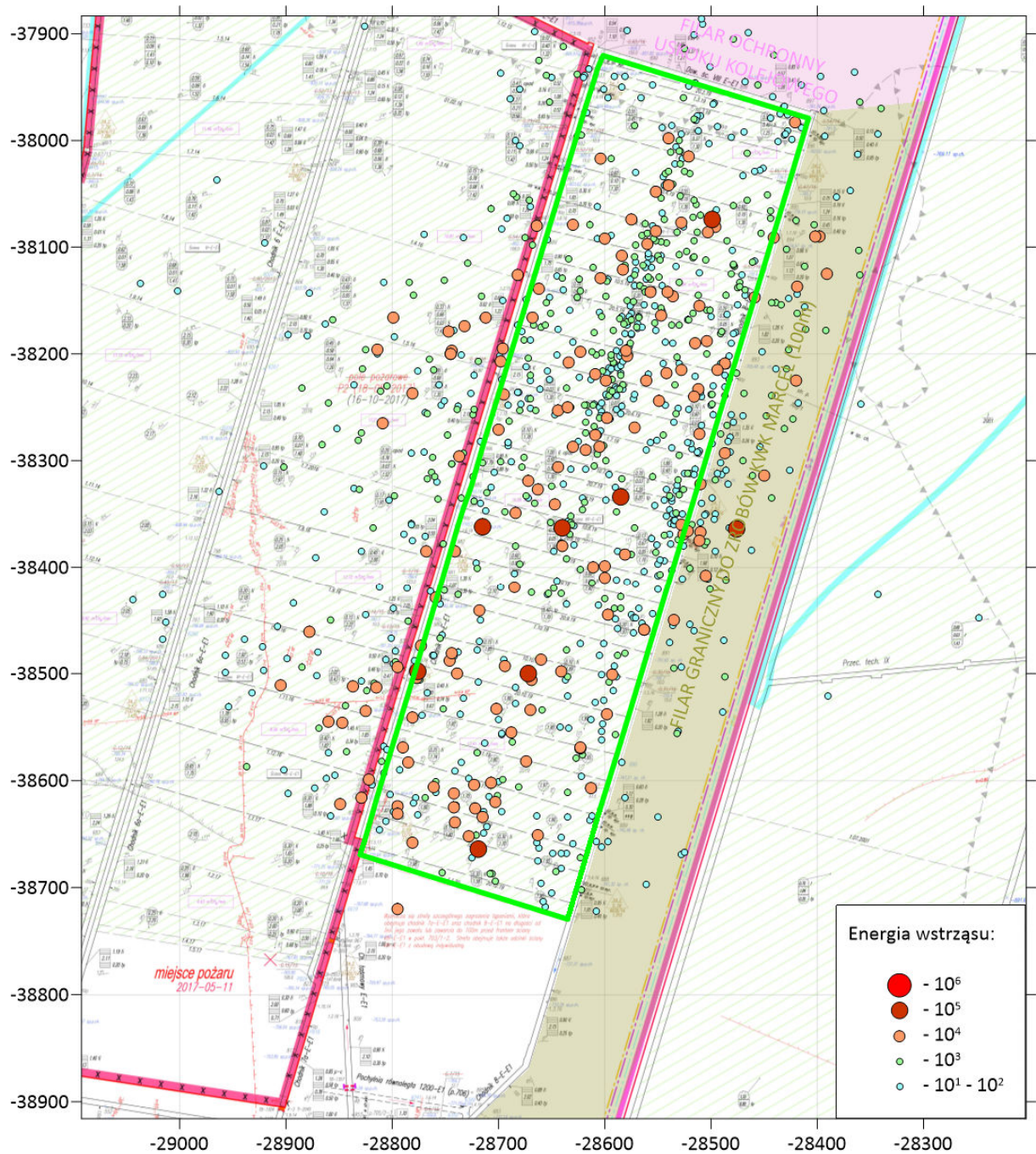
Rys. 37. Lokalizacja wstrząsów indukowanych eksploatacją ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy





Rys. 38. Lokalizacja wstrząsów indukowanych przed frontem eksploatacji ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy





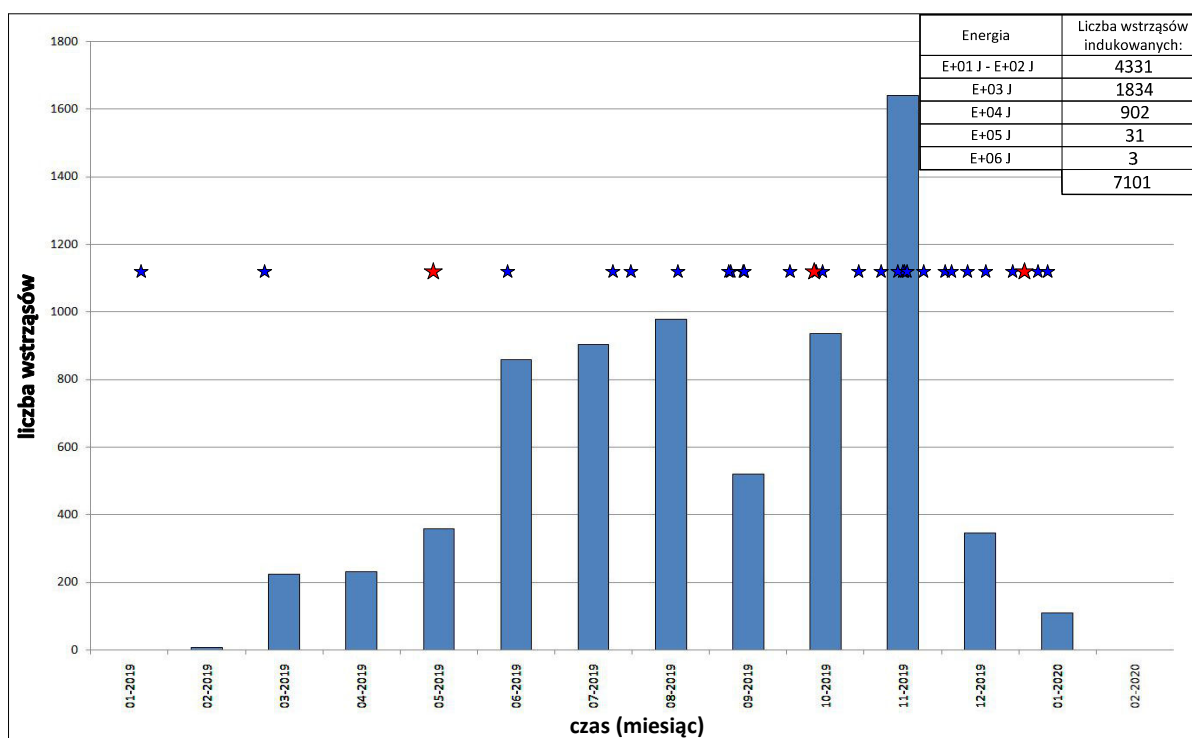
Rys. 39. Lokalizacja wstrząsów indukowanych za frontem ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1.

KWK ROW ruch Rydułtowy

Z rysunków 33 oraz 37, przedstawiających cały katalog wstrząsów wynika, iż generalnie wstrząsy koncentrują się wzdłuż jej zachodniej krawędzi, szczególnie w południowo-zachodnim narożniku położonym na końcu wybiegu ściany VIII E – E1 na kontakcie ze zrobami wcześniej eksploatowanej ściany VII E-E1. Część wstrząsów wystąpiła również w filarze z KWK Marcel. Dotyczy to przede wszystkim wstrząsów, które wystąpiły przed frontem eksploatacji ściany co jest dobrze widoczne na rys. 38. Wstrząsy przed frontem eksploatowanej ściany stanowią 85,5% całego katalogu. 1033 wstrząsów (14,5%) wystąpiło w górotworze za frontem eksploatacji ściany (zrobę), które generalnie

rozkładają się w zrobach eksploatowanej ściany VIII E-1E.. Jednocześnie 98,9% wstrząsów z całego katalogu wystąpiło w stropie pokładu z czego 94% w piaskowcach warstw porębskich zalegających na głębokości -500 – 600 m. p.p.m. 5 wstrząsów wystąpiło na głębokości odpowiadającej położeniu pokładu VIII E-1E, przy czym były one wynikiem strzelań odprężających. 75 wstrząsów wystąpiło w spągu pokładu.

Analizowany zbiór obejmuje okres 337 dni a liczba zarejestrowanych wstrząsów związana jest z postępowaniem eksploatacji i położeniem frontu ścianowego. Czasowy rozkład wstrząsów ilustruje rys. 40. Wraz z przyrostem czasu wzrasta ilość wstrząsów rejestrowanych w ujęciu miesięcznym. Najwięcej zarejestrowano ich w listopadzie 2019 r., gdy położenie frontu eksploatacji odpowiadało ok. 80% wybiegu ściany, przy jednocześnie wysokim dobowym postępie frontu wynoszącym około 3.3mb na dobę. Wzrostowi liczby wszystkich rejestrowanych wstrząsów towarzyszy również wzrastająca ilość wstrząsów najsilniejszych, a więc o energii E+05J i E+06J, które stanowią największe potencjalne zagrożenie tąpnięciem.

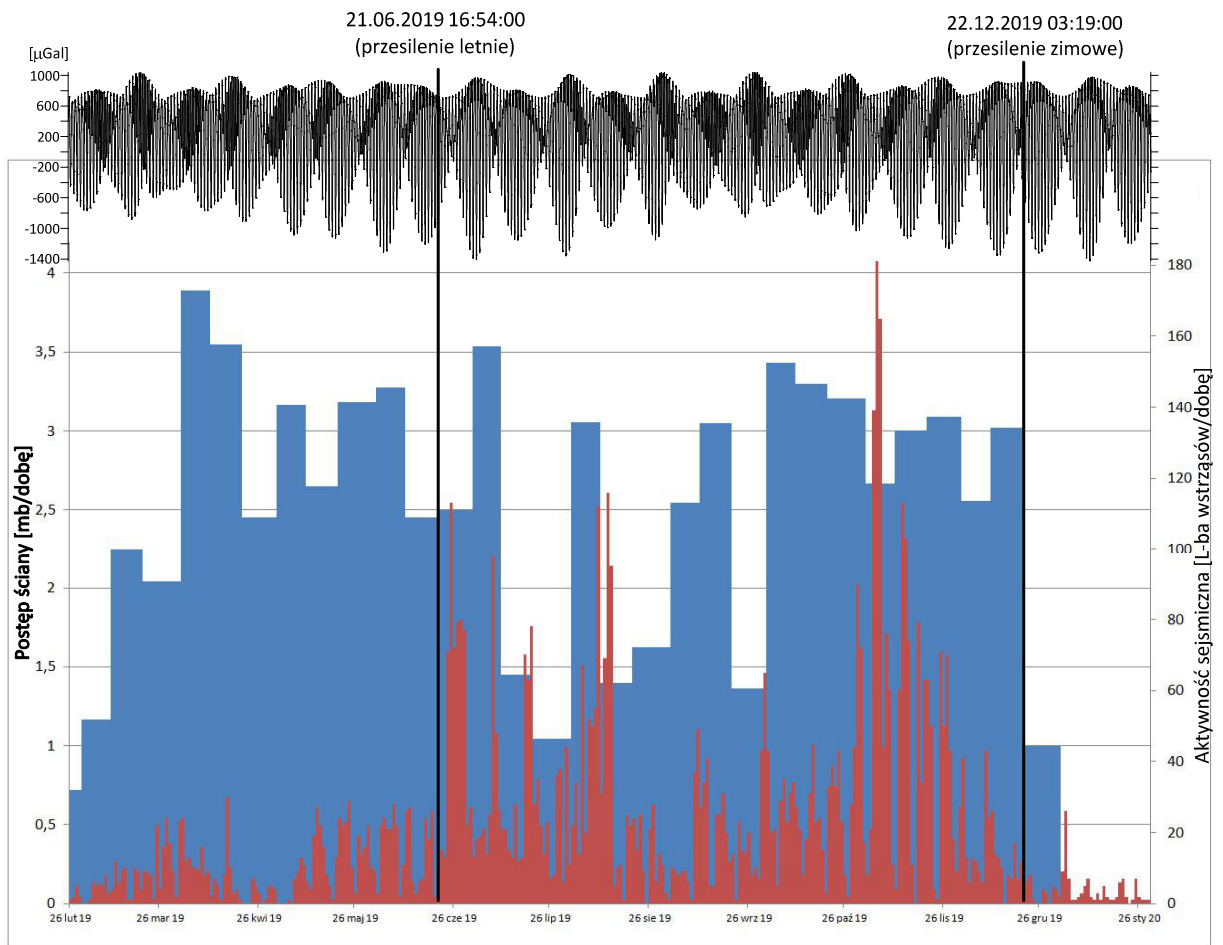


Rys. 40. Rozkład liczby wstrząsów w ujęciu miesięcznym w okresie 26.02.2019 -29.01.2020r – katalog ROWR19. Niebieskimi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o energii E+05 J a czerwonymi wstrząsy o energii E+06 J.

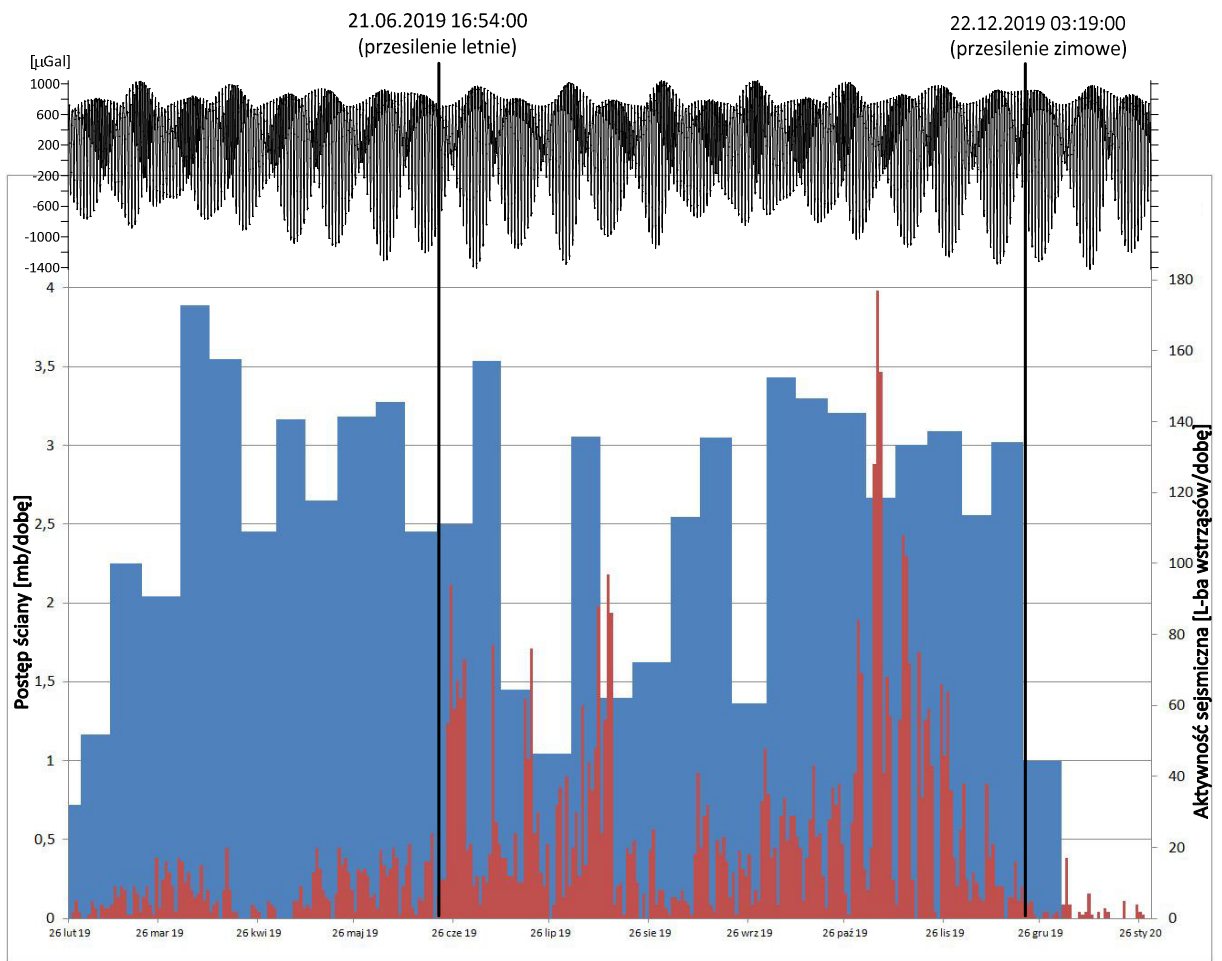
Dodatkowych informacji o aktywności sejsmicznej dostarcza zestawienie liczby wstrząsów z postępowaniem ściany w ujęciu dobowym, co ilustrują rysunki 41, 42 oraz 43 odpowiadające aktywności sejsmicznej całego katalogu oraz podzbiorów wstrząsów, które wystąpiły przed i za frontem ściany. Z uzyskanego obrazu wynika, iż średni postęp eksploatacji ściany VIII E-1E w pokładzie 703/1 wyniósł ok. 2.5mb na dobę. Najwyższy dobowy postęp eksploatacji miał miejsce w pierwszej części kwietnia



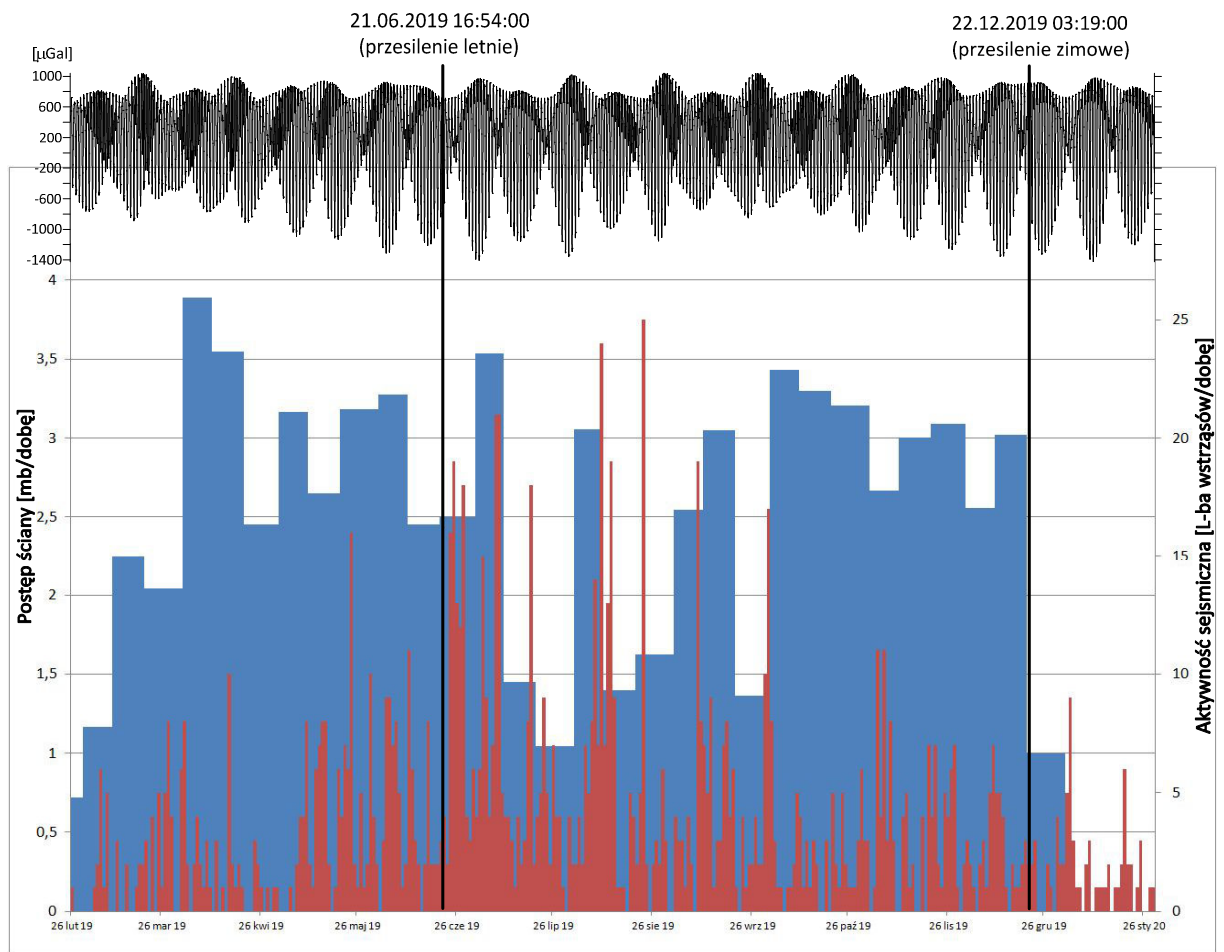
2019r. i wyniósł około 3.8mb/dobę. Spowolnienie wydobywania wystąpiło w okresie lipiec – wrzesień 2019 r. gdy średnio wyniosło około 1.9mb/dobę.



Rys. 41. Aktywność sejsmiczna (kolor czerwony) rejestrowana wraz z postępem frontu eksploatacji (kolor niebieski) ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1 KWK ROW ruch Rydułtowy z nałożonymi syntetycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości (w  $\mu\text{Gal}$ ) wywołanymi pływami litosfery dla stanowiska ICK ZKI w Rybniku.



Rys. 42. Aktywność sejsmiczna (kolor czerwony) rejestrowana przed frontem ściany wraz z postępowaniem frontu eksploatacji (kolor niebieski) ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1 KWK ROW ruch Rydułtowy z nałożonymi syntetycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości (w  $\mu\text{Gal}$ ) wywołanymi płytami litosfery dla stanowiska ICK ZKI w Rybniku.

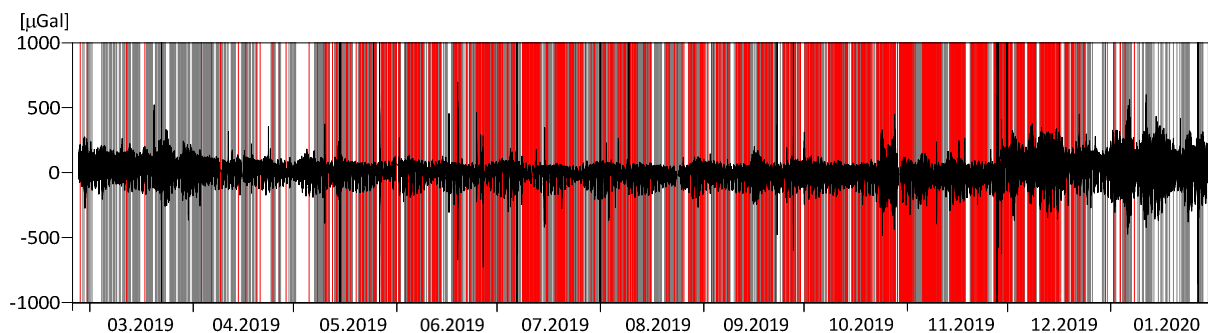


Rys. 43. Aktywność sejsmiczna (kolor czerwony) rejestrowana za frontem ściany wraz z postępem frontu eksploatacji (kolor niebieski) ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1 KWK ROW ruch Rydułtowy z nałożonymi syntetycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości wywołanymi dla stanowiska ICK ZKI w Rybniku.

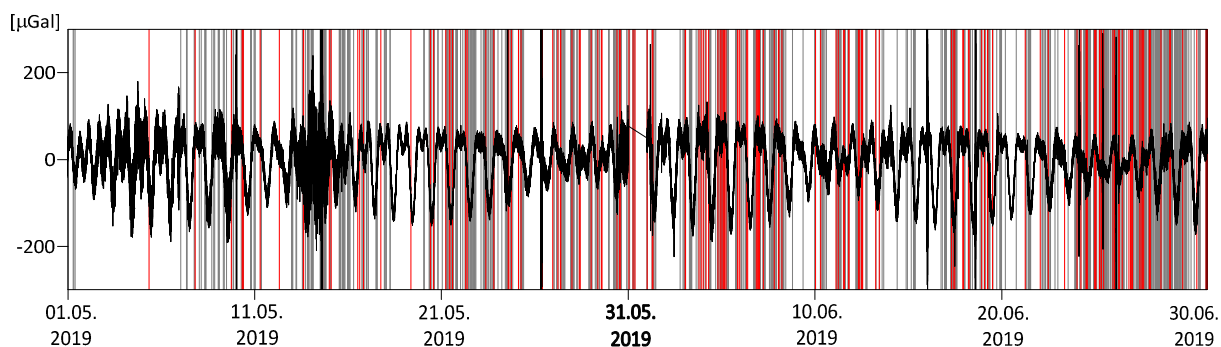
W przypadku rejestrowanej dobowo liczby wstrząsów, najaktywniejszym pod tym względem był dzień 5.11.2019 r. gdy wystąpiło 181 wstrząsów. Dzień wcześniej (4.11.2019r.) oraz dzień później (6.11.2019r.) wystąpiło kolejno 139 i 165 wstrząsów. Średnia dobowo liczba wstrząsów w całym analizowanym okresie wyniosła ok. 20 wstrząsów na dobę. Na wykresach obrazujących rozkład dla całego zbioru oraz wstrząsów przed frontem eksploatacji ściany charakterystycznym jest iż wzrost aktywności sejsmicznej wystąpił 24.06.2019 r. a więc w trzeciej dobie po przesileniu letnim, gdy obserwowane są najwyższe amplitudy zmian przyspieszenia siły ciężkości. Uwidacznia to przebieg syntetycznych zmian przyspieszenia siły ciężkości wyznaczonych dla stanowiska grawimetru *gPhoneX-155* nałożony na rysunki 41 – 43.

Na uzyskane z pomiarów, rzeczywiste zmiany przyspieszenia siły ciężkości wywołującymi efekt pływu litosferycznego, jaki jest widoczny w danych surowych (raw gravity data) uzyskiwanych z rejestracji prowadzonych grawimetrem pływowym *gPhoneX-155* na stanowisku w Industrialnym Centrum Kultury Zabytkowej Kopalni Ignacy w Rybniku Niewiadomiu nałożono czasy wystąpienia indukowanych wstrząsów sejsmicznych. Dla potrzeb prawidłowej kalibracji danych, czasy wystąpienia

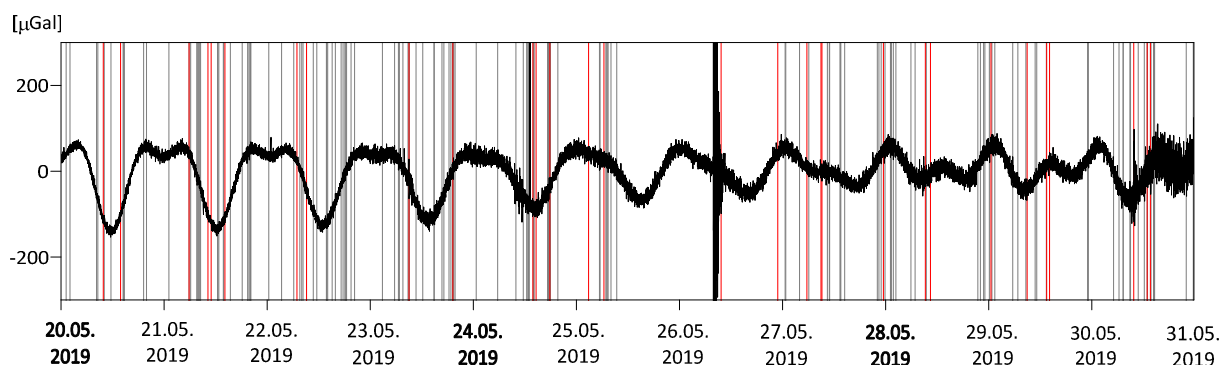
wstrząsów, podane w katalogu kopalni KWK ROW ruch Rydułtowy w czasie lokalnym, przeliczono na czas UTC. Efekt złożenia dla całego zbioru od 26.02.2019 do 29.01.2020 r przedstawiono na rysunku 44 natomiast na rysunkach 45 i 46 przedstawiono kolejne powiększenia dla okresu 2 miesięcy oraz 11 kolejnych dni. Najślabze wstrząsy o energii E+01 J, E+02 J oraz E+03 J oznaczono kolorem szarym, silniejsze o energii E+04, E+05 oraz E+06J kolorem czerwonym.



Rys. 44. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 26.02.2019 -28.01.2020r – katalog ROWR19.

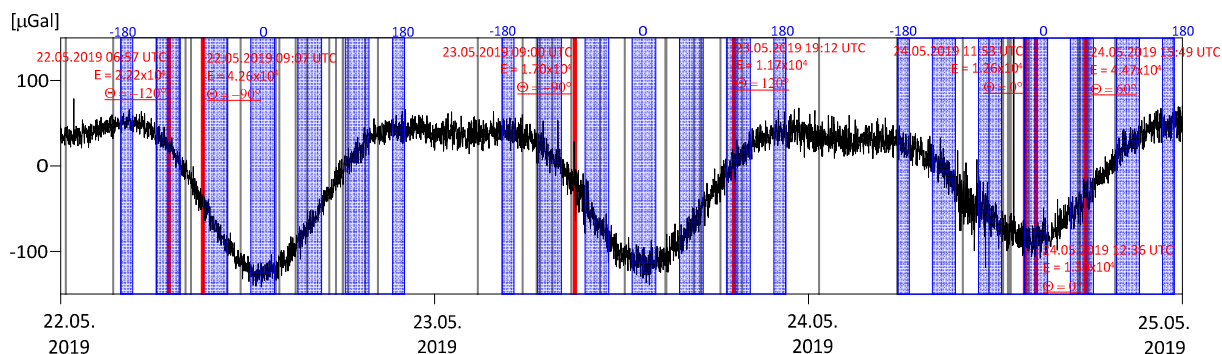


Rys. 45. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 2 miesięcy (01.05.2019 – 30.06.2019) – katalog ROWR19.



Rys. 46. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 11 kolejnych dni – katalog ROWR19.

Dla wszystkich 7101 wstrząsów wyznaczono ich kąty fazowe  $\Theta$  zgodnie z schematem jaki zastosowano dla katalogów GRSS(1) i GRSS(2). Ich przykładowe wyznaczenie ilustruje rysunek 47. Na wykresie, obejmującym okres 3 kolejnych dni, podano czasy wystąpienia, energię oraz wyznaczony kąt fazowy dla najsilniejszych w tym przedziale czasu wstrząsów ( $E > 1E+04$  J).



Rys. 47. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 3 kolejnych dni – katalog ROWR19.

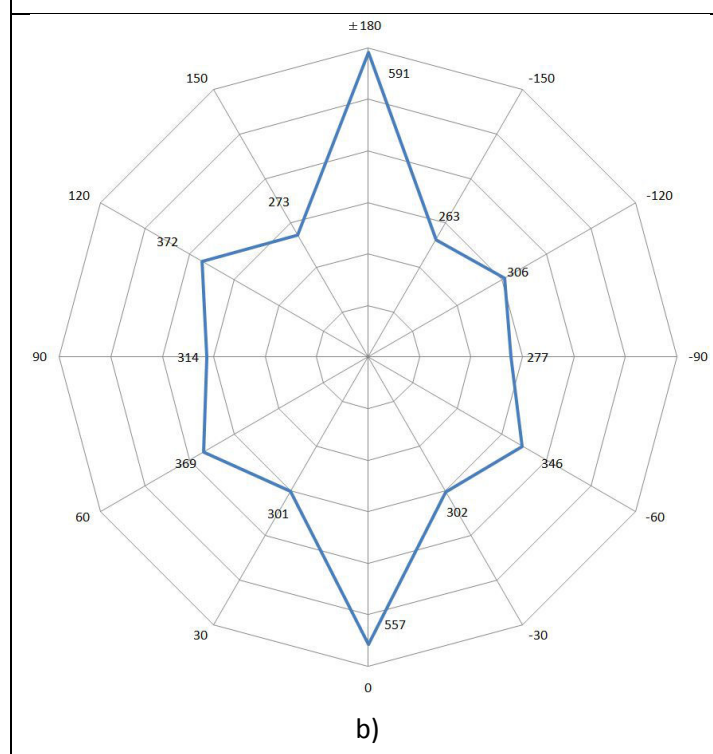
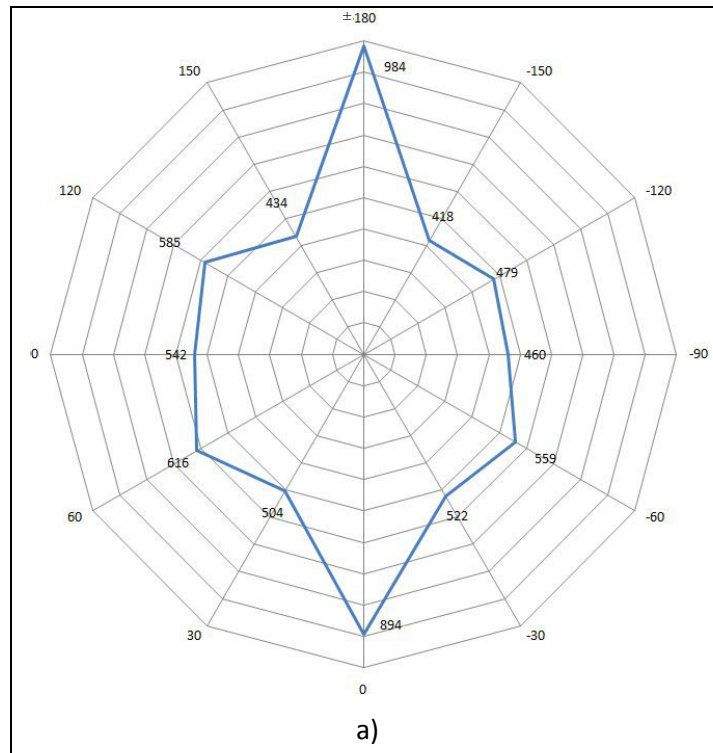
W ramach analizy metodą Schuste'ra zinterpretowano łączenie 6997 z 7101 wstrząsów które wystąpiły w okresie eksploatacji ściany VIII E-E1 r. Dla 104 wstrząsów brak wyznaczenia kąta fazowego wynika z faktu, iż w czasie ich wystąpienia grawimetr *gPhoneX-155* nie rejestrował zmian przyspieszenia siły ciężkości (awarie).

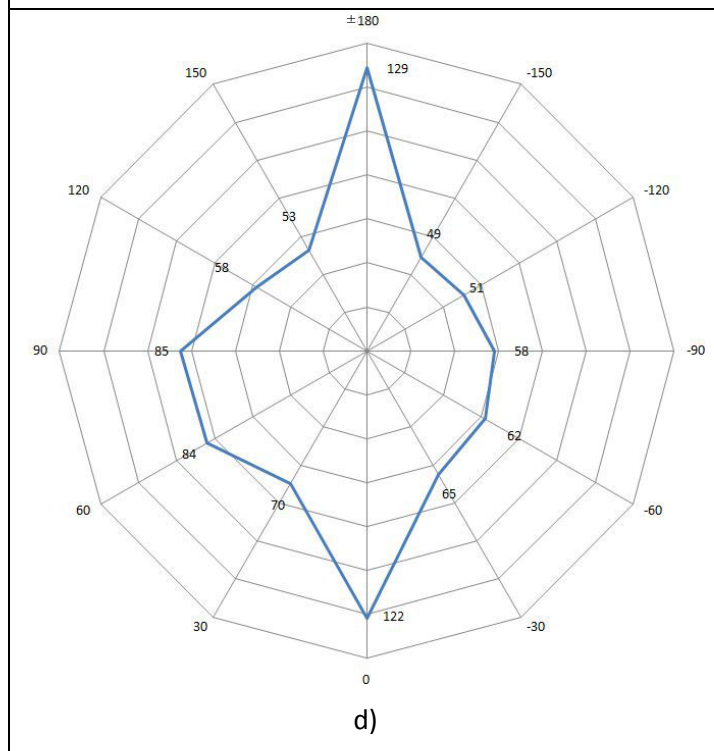
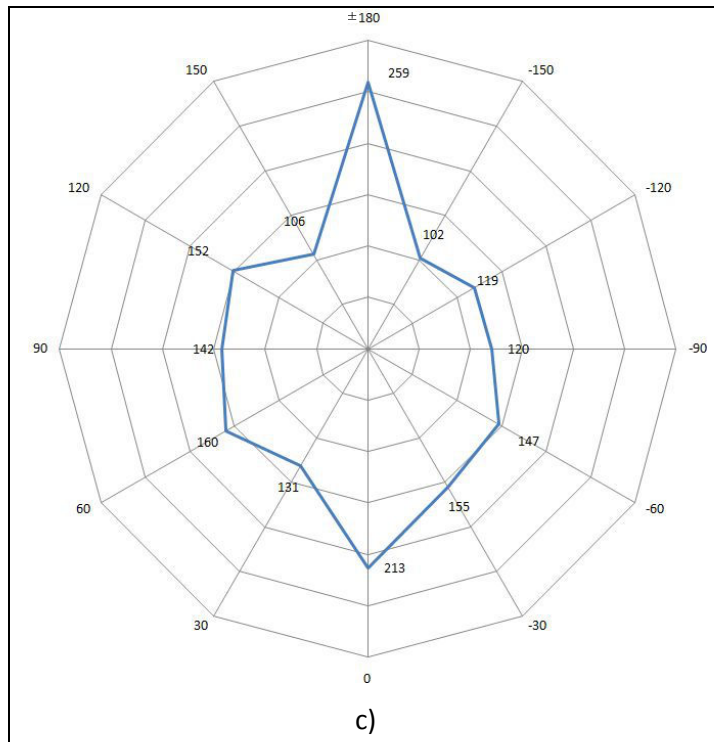
Tab. 7. Zestawienie wyznaczonych kątów fazowych czasu wystąpienia wstrząsu indukowanego działalnością górnica dla zbioru ROWR19 względem rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanych pływami litosfery.

$\Theta$	$\pm 180$	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150
$N_{E+01 - E+06}$	984	418	479	460	559	552	894	504	616	542	585	434
$N_{E+01 - E+02}$	591	263	306	277	346	302	557	301	369	314	372	273
$N_{E+03}$	259	102	119	120	147	155	213	131	160	142	152	106
$N_{E+04}$	129	49	51	59	62	65	122	70	84	85	58	53
$N_{E+05 - E+06}$	5	4	3	5	4	0	2	2	3	1	3	2

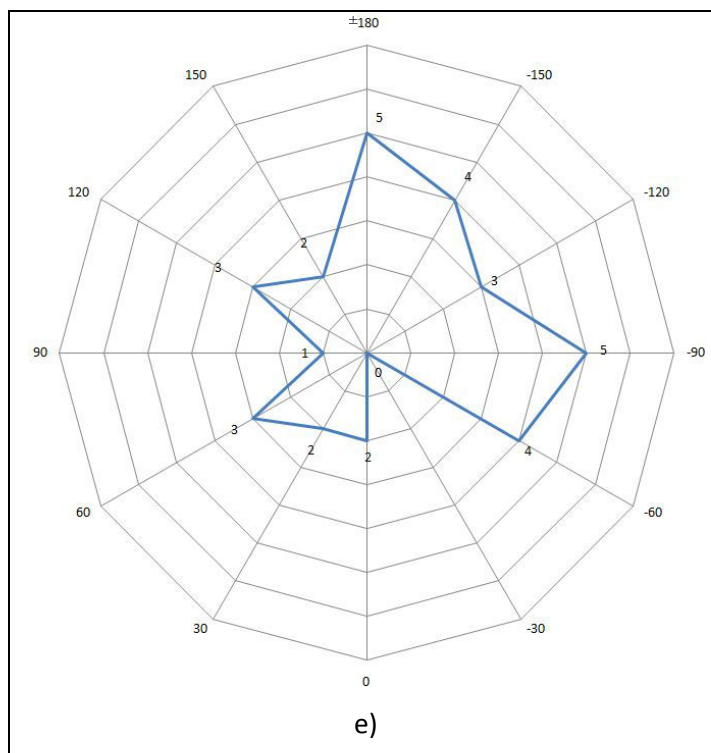
Analogicznie do zbiorów GRSS(1) i GRSS(2), dane zawarte w tabeli nr 7 zostały przedstawione graficznie na rysunku nr 48. Cały zbiór (rys. 48a) charakteryzuje się tym, iż blisko 27% wstrząsów wystąpiło w czasie maksymalnego dociążenia lub odciążenia górotworu. Wstrząsy w czasie maksymalnego dociążenia ( $\pm 180^\circ$ ) stanowiły 14.06% wszystkich wstrząsów natomiast w czasie maksymalnego odciążenia ( $0^\circ$ ) – 12.78%. Jest to więc najniższy procentowy udział w badanych katalogach, związany z momentami maksymalnego dociążenia i odciążenia górotworu przy czym badany katalog wstrząsów w rejonie ściany VIII E-E1 charakteryzuje się tym, iż tylko 27 najsilniejszych

wstrząsów odpowiada energetycznie wstrząsom ze zbiorów GRSS(1) i GRSS(2). Najsilniejsze wstrząsy, o energii E+05J i E+06J (rys. 50f) występowały szczególnie przy maksymalnym dociążeniu i stopniowym odciążaniu górotworu (wartości kąta fazowego  $180^\circ > \Theta > -60^\circ$ ) co stanowi 62% wstrząsów tego podzbioru. Najliczniejszy podzbiór wstrząsów stanowią te o energii E+02J (rys. 50c) - 2914 wstrząsów – co stanowi blisko 42% całego katalogu i przez to znacząco wpływa na całosciowy rozkład katalogu.





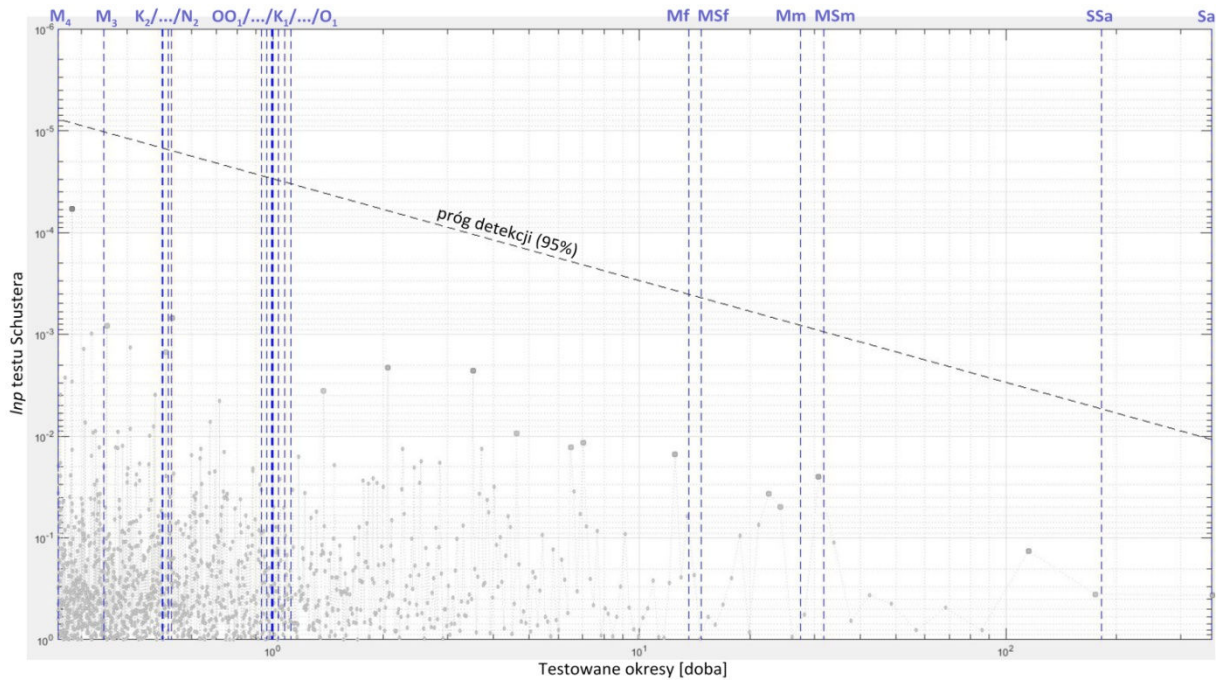




Rys. 48. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górniczą (katalog ROWR19) na podstawie wyznaczonego kąta fazowego względem sumarycznych, rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanych pływym litosfery.  
 a) dla całego zbioru wstrząsów E+01 – E+06J ; b) dla wstrząsów o E+01 – E+02J;  
 c) dla wstrząsów o E+03J, d) dla wstrząsów o E+04J;  
 e) dla zsumowanych wstrząsów E+05 – E+06J.

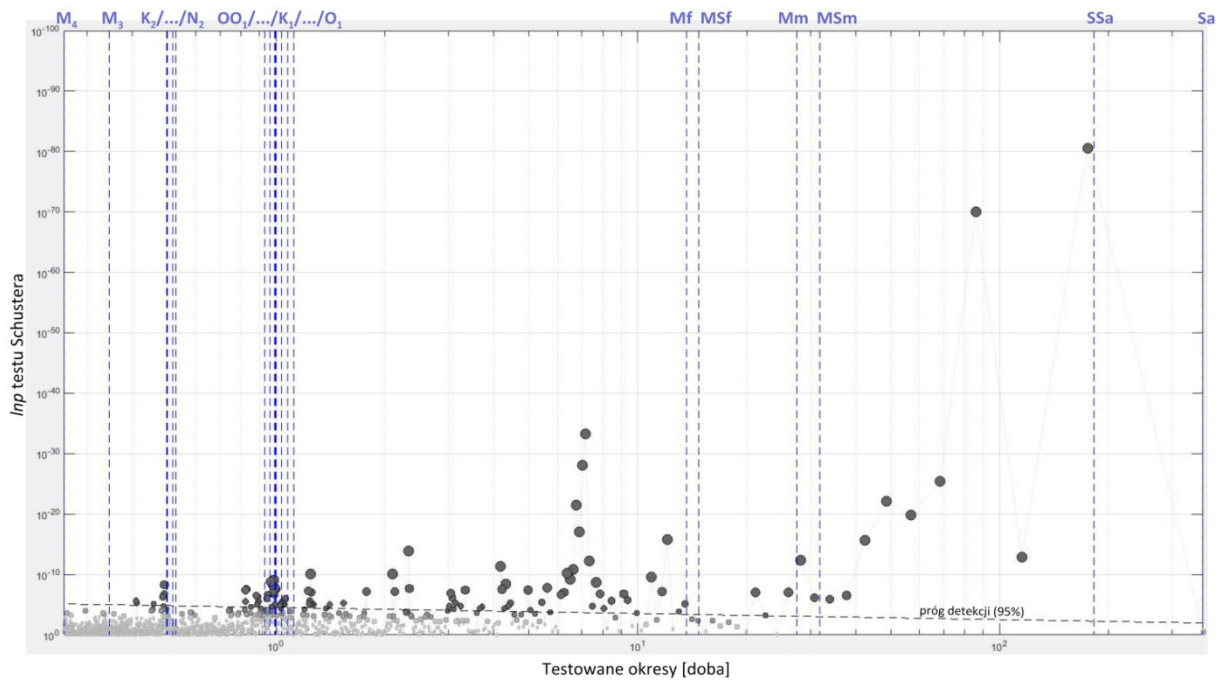
W drugim etapie dla analizowanego katalogu zbadano możliwość istnienia okresowości w występowaniu wstrząsów, szczególnie z uwzględnieniem okresów najważniejszych fal pływowych zestawionych w tabeli 2. W uzyskanych rozkładach widma Schuster'a obraz analogiczny do obserwowanych dla zbiorów GRSS(1) i GRSS(2) uzyskuje się dla grupy najsilniejszych wstrząsów o energii E+05J i E+06J a więc wstrząsów, które energetycznie odpowiadają danym analizowanym w tych katalogach. Podobnie jak dla poprzednich katalogów tak i w tym przypadku uzyskane wartości logarytmu liczby  $p$  testu Schuster'a dla okresów odpowiadających głównym falom pływu litosferycznego nie wykazują związku pomiędzy badanymi okresami fal pływowych a czasem wystąpienia tych najsilniejszych wstrząsów (rysunek 49).





Rys. 49. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o E+05J i E+06J które wystąpiły w okresie od 26.02.2019 r. do 29.01.2020 r.

Pozostałe grupy wstrząsów (E+01J-E+02J, E+03J, E+04J) charakteryzują się niższą niż dotychczas badane zbiory energią. Jednocześnie liczba zarejestrowanych zdarzeń jest bardzo wysoka. W literaturze światowej w analizie związków pływowych grupy słabszych energetycznie wstrząsów traktowane są zwykle jako tzw. roje wstrząsów albo wstrząsy towarzyszące silnym trzęsieniom i w analizie są traktowane są jako pojedyncze zdarzenie o uśrednionej energii i czasie wystąpienia. Powoduje to iż uzyskane w niniejszej pracy widma testu Schuster'a dla grup wstrząsów E+01J-E+02J, E+03J, E+04J a tym samym całego katalogu ROWR19 są bezużyteczne (rys. 50). Wskazuje to jednocześnie, iż słabsze wstrząsy zarejestrowane w katalogu ROWR19 wynikają bezpośrednio z odkształcania się skał w związku z prowadzoną eksploatacją górnictw.



Rys. 50. Widmo Shuster'a dla całego zbioru wstrząsów E+01 – E+06 J które wystąpiły w okresie od 26.02.2019 r. do 29.01.2020 r.

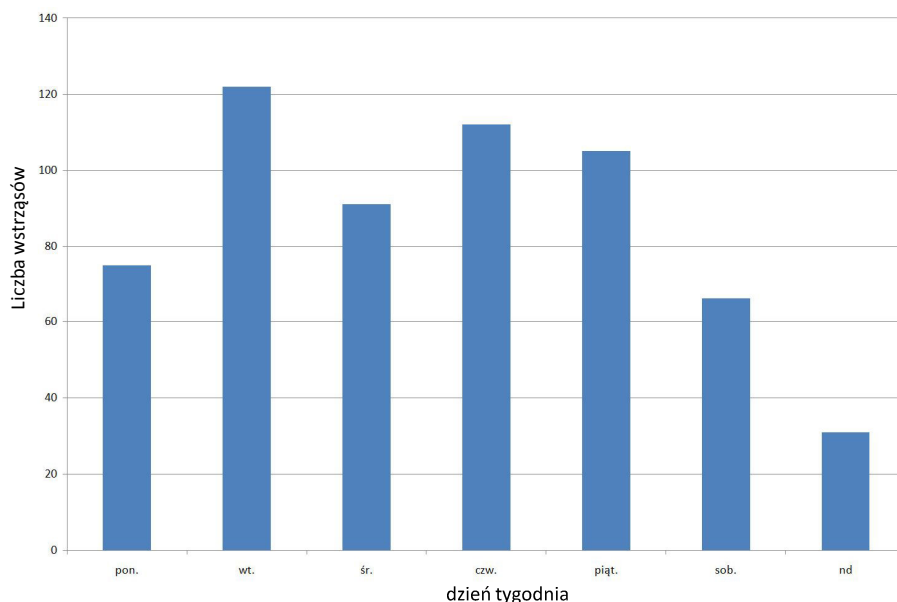
## **8 Analiza możliwości wykorzystania związków pływy – wstrząsy antropogeniczne dla obszaru GZW**

W pracy przeanalizowano trzy katalogi wstrząsów indukowanych działalnością górniczą kopalń węgla kamiennego na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Katalogi GRSS(1) i GRSS(2) zawierają dane o wstrząsach, które wystąpiły w okresie od 2016 do 2019 roku w obszarze niecki górnośląskiej. Katalogi te zawierają wstrząsy zarówno górnicze jak i regionalne, których wychwycenie jest możliwe poprzez geometrię sieci stanowisk seismologicznych GRSS GIG. Katalog ROWR19 (3) udostępniony przez PGG S.A. zawiera przede wszystkim dane o zdarzeniach sejsmicznych, które wystąpiły w trakcie eksploatacji jednej ściany wydobywczej w rybnickim okręgu węglowym i został utworzony na podstawie zdarzeń zarejestrowanych przez kopalnianą sieć seismologiczną KWK Rydułtowy. Zdecydowaną większość zdarzeń w tym katalogu stanowią wstrząsy związane z eksploatacją ściany, jednak część zdarzeń ma trudną do określenia genezę z uwagi na znaczną odległość od stanowisk seismologicznych zainstalowanych w rejonie ściany.

W pierwszym etapie analizy katalogów zbadana została zależność pomiędzy czasem wystąpienia wstrząsów (regionalnych i górniczych) a zmianą obciążenia grawitacyjnego górotworu. W toku pracy przyjęto iż związek taki może istnieć w sytuacji wstrząsów które występują w momencie maksymalnego dociążenia lub odciążenia grawitacyjnego skorupy ziemskiej. Na przebieg krzywych wyznaczonych teoretycznie (dla katalogu GRSS(1) oraz zaobserwowanych pomiarami grawimetrami pływowymi (dla katalogów GRSS(2) i ROWR19 (3) zmian przyspieszenia siły ciężkości, na których surowy zapis nałożono czasy wystąpienia wstrząsów indukowanych. W efekcie uzyskano dane z których wynika, że dla zbioru GRSS(1) blisko 30% (29,57%) wstrząsów indukowanych wystąpiło w momencie maksymalnego dociążenia lub odciążenia grawitacyjnego skorupy ziemskiej. O niecałe 3% gorszy wynik uzyskano dla zbioru ROWR19(3) t.j 29,84%) a o ponad 9% lepszy dla katalogu GRSS(2) – 38,89%. Różnica pomiędzy katalogami GRSS(1) i GRSS(2) może wynikać z powiązania w pierwszym przypadku czasów wstrząsów z teoretycznym a w drugim przypadku z rzeczywistym, obserwowanym za pomocą grawimetru pływowego przebiegiem zmian przyspieszenia siły ciężkości. Generalnie uzyskane z tej części pracy wyniki świadczą o tym, iż czas wystąpienia z około 1/3 wszystkich wstrząsów z danego katalogu wstrząsów indukowanych może mieć związek z oddziaływaniem zmian pola grawitacji na znajdujący się w stanie chwilowej równowagi górotwór.

Na podstawie wyników etapu I przeprowadzono drugą część pracy (etap II), która polegała na poszukiwaniu okresowości w występowaniu wstrząsów indukowanych i ich powiązaniu z okresami charakterystycznymi dla fal pływowych, które zestawione są w tabeli nr 2 niniejszej pracy. W przypadku katalogu GRSS(1) obejmującego 602 wstrząsy z lat 2016 – 2018 z terenu całego GZW uzyskano wyniki wskazujące na istnienie okresowości w ich występowaniu dla okresów

3.5 doby, 7.0 dób, 108.5 doby oraz 118 dób. Okresy te nie odpowiadają żadnemu z okresów najważniejszych i mogących znacząco oddziaływać na górotwór fal pływu litosferycznego. Uzyskane okresy 3.5 oraz 7.0 dób nasunęły możliwość ich związku z charakterystyką czasu pracy zakładów górniczych a szczególnie cotygodniowymi, sobotnio-niedzielnymi przestojami w produkcji. Zestawienie czasu wystąpienia wstrząsów z odpowiadającymi im dniami tygodnia nie dostarcza potwierdzenia takiego założenia, co ilustruje rys. 51.



Rys. 51. Zestawienie liczby wstrząsów zarejestrowanych w kolejnych dniach tygodnia w latach 2016 – 2018 (katalog GRSS(1))

Wyjaśnienie genezy wyznaczonych okresowości w katalogu GRSS(1) stanowić będzie element dalszej pracy naukowej. Dla katalogu GRSS(2) obejmującego 146 wstrząsów indukowanych na terenie GZW w 2019 roku nie uzyskano żadnych okresów charakteryzujących się wartością liczby  $p$  testu Schuster'a mniejszą niż 0.05.

W przypadku katalogu ROWR19 obserwuje się odmienne zależności. Charakteryzujący się stosunkowo niewielkim przedziałem czasu (337 dni) oraz dużą liczbą wstrząsów (7101) z których zaledwie 27 odpowiada silniejszym energetycznie wstrząsów z wcześniej analizowanych katalogów, w analizie okresowości obserwuje się istnienie wielu okresów dla których wartość liczby  $p$  testu Schuster'a było dużo niższa od 0.05, zarówno dla okresów pokrywających się z okresami fal pływu litosferycznego jak i innych. Taki stan rzeczy można wiązać z faktem, iż w analizach wstrząsów naturalnych uwzględniane są katalogi o długim przedziale czasowym (dziesięciolecia, setki lat) a grupy blisko występujących słabszych wstrząsów traktowane są jako tzw. roje i w analizie występują jako pojedyncze zdarzenie o uśrednionej energii i czasie wystąpienia. Wyznaczone oddzielnie dla podzbioru najsilniejszych wstrząsów widmo testu Shuster'a przyjmuje obraz podobny jak przy wcześniej analizowanych katalogach i nie pozwala na powiązanie z falami pływu litosferycznego.

## 9 Wnioski

Wyniki badań i analiz przedstawionych w niniejszej pracy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. W niniejszej pracy z sukcesem zastosowano element tzw. testu Schuster'a, jednego z podstawowych narzędzi analizy harmonicznej szeregów czasowych, do badania związku pomiędzy zmianą obciążenia grawitacyjnego litosfery a czasem występowania wstrząsów górniczych w GZW. Dodatkowo dla analizowanych zbiorów danych zbadano okresowość w występowaniu wstrząsów indukowanych wykorzystując tzw. widmo Schustera.
2. W zbiorach danych zawartych w analizowanych katalogach wstrząsów indukowanych podziemną eksploatacją złóż węgla kamiennego, blisko 30% z nich wystąpiło w momencie maksymalnego dociążenia lub odciążenia grawitacyjnego skorupy ziemskiej wynikającego z obliczeń teoretycznych. Pozwala to sformułować wniosek iż dla części wstrząsów indukowanych czas ich wystąpienia związany jest ze zmianami wartości przyspieszenia siły ciężkości genezy pływowej.
3. Po uruchomieniu w obszarze Górnego Śląska w ramach realizacji projektu European Plate Observing System - Poland (akronim EPOS-PL) ciągłego pomiaru zmian przyspieszenia siły ciężkości poprzez dwa grawimetry pływowe (*gPhone-X*) na stanowiskach w Katowicach i Rybniku, możliwe stało się porównanie wyznaczonych teoretycznych oraz uzyskiwanych z pomiarów rzeczywistych zmian obciążeń grawitacyjnych. Analiza związku czasu maksymalnego dociążenia/odciążenia górotworu pływem grawitacyjnym z czasem wystąpienia wstrząsu górniczego na podstawie zbiorów danych pomiarowych i teoretycznych wykazała o ok. 9% wyższą jego zgodność dla zbioru danych pomiarowych, czyli w efekcie około 40%. Rzeczywiste zmiany siły grawitacji w punkcie obserwacji odbiegają od wyznaczanych na podstawie modeli Ziemi zmian teoretycznych. Wynika to między innymi z uogólnienia modeli teoretycznych oraz przede wszystkim nieuwzględniania w nich informacji o zmianach wywołanych podziemną eksploatacją węgla kamiennego w obszarze GZW.
4. Przeprowadzone badania pozwoliły zrealizować cel rozprawy, a mianowicie określić zależność okresowych zmian pola siły ciężkości powodujących zmienne w czasie odkształcenia górotworu z aktywnością sejsmiczną w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Dla zbioru danych z okresu rocznego ciągłego monitoringu grawimetrycznego i sejsmicznego, udokumentowano ok.40 procentową zgodność czasową pomiędzy maksymalnym odciążeniem lub dociążeniem grawitacyjnym górotworu a czasem wystąpienia silnego wstrząsu górotworu.

5. Poszukiwanie okresowości w katalogach, szczególnie dla okresów odpowiadających głównym falom pływu litosferycznego nie dostarczyło jednoznacznej informacji o istnieniu lub braku takiej zależności dla badanych katalogów. Zastosowane do analizy okresowości narzędzie, widmo testu Schuster'a okazało się narzędziem wymagającym specjalnie dostosowanego zbioru danych. Zastosowanie zbioru o dużej liczbie danych dla stosunkowo krótkiego okresu czasu może prowadzić do nadinterpretacji zbioru. Uzyskane dla katalogu silnych wstrząsów z obszaru GZW w latach 2016 – 2018 cztery okresy powtarzalności ( $T= 2.5, 6.0, 108.5$  i  $118$  doby), nie są związane z okresami fal pływu litosferycznego. Dla większego zbioru danych monitoringowych w GZW, w przyszłości możliwe będzie wyjaśnienie genezy tych okresowości z uwzględnieniem lokalnych uwarunkowań zmian obciążenia grawitacyjnego indukowanego eksploatacją górniczą.

W niniejszej pracy zostały wykorzystane dane wytworzone w ramach 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). Nr Projektu: POIR.04.02.00-14-A003/16-00.

## 10 Literatura

1. Ader T.J., Avouac J.-P. 2013a. *Detecting periodicities and declustering in earthquake catalogs using the Schuster spectrum, application to Himalayan seismicity*. Earth and Planetary Science Letters <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.06.032>.
2. Ader T.J., Avouac J.-P. 2013b. *Detecting periodicities in earthquake catalogs using the Schuster test – Auxiliary material*. Earth and Planetary Science Letters <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.06.032>.
3. Agnew D.C. 2007. *Earth Tides* w *Treatise on Geophysics* (red. T.A. Herring) wyd. Elsevier Nowy Jork pp. 163 - 195
4. Agnew D.C. 2013. *SPOTL: Some Programs for Ocean-Tide Loading*. Technical Report Scripps institutoin of Oceanography.
5. Barlik M. 2001. *Pomiary grawimetryczne w geodezji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa pp. 90 -115.
6. Bogusz J., Figurski M. 2010. *Model pływowy IERS2003 i ocena możliwości jego weryfikacji na podstawie wyników opracowania obserwacji GNSS*. Biuletyn WAT, vol. LIX, nr 3, pp. 421-441
7. Buła Z., Kotas A. 1994. *Atlas Geologiczny Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w skali 1:100 000*. Państwowy Instytut Geologiczny, Polska Agencja Ekologiczna S.A.
8. Cadicheanu N., van Ruymbeke M., Zhu P. 2007. *Tidal triggering evidence of intermediate depth earthquakes in the Vrancea zone (Romania)*. Nat. Hazards Earth Sys. Sci., 7, 733-740,
9. Cartwright D.E., Tayler R.J. 1971. *New computations of the Tide Generating Potential*. Geophys. J. R. Astron. Soc. 23, pp 45 – 74.
10. Cartwright D.E., Eden C.A. 1973. *Corrected Tabled of Tidal Harmonics*. Geophys. J. R. Astron. Soc. 33, pp 253 – 264.
11. Chen L., Chen J.G., Xu Q.H. 2012. *Correlation between solid tides and worldwide earthquakes  $M_s \geq 7.0$  since 1900*. Natural Hazards and Earth system Sciences 12 pp. 587-590.
12. Cochran E.S., Vidale J.E., Tanaka S. 2004. *Earth tides can trigger shallow thrust fault earthquakes* Science 306 (5699) pp. 1164-1166
13. Czarnecki K. 2014. *Geodezja współczesna*. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa. Pp 68 – 173.
14. Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M. 1999. *Tides for a convective Earth*. Journal of Geophysical Research vol. 104 no. B1, pp. 1035 – 1058.
15. Doodson A.T. 1921. *The harmonic development of the tide generating potential*. Proceeding Royal Society London A 100, pp. 305-329.
16. Dubiński J., Mutke G., Stec K., 1999. *Rozwiązania w sejsmologii górniczej poprawiające efektywność oceny stanu zagrożenia tąpnięciami*. Geologia, T.25 Wyd. AGH Kraków, pp. 45-58.
17. Dubiński J., Stec K. 2001. *Ralationship between focal mechanism parameters of mine tremors and local strata tectonics* Dynamics rock mass response to mining pod red. G. Van Aswegen, R.J. Durrheim W.D. Ortle The South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, pp. 113-118.
18. 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), pp. 163-180

19. Dubiński J., Mutke G., Chodacki J. 2020. *Distribution of peak ground vibration caused by mining induced seismic events in the Upper Silesian Coal Basin in Poland* .Arch. Min. Sci. 65(2020), 3, 419-432. doi: 10.24425/ams.2020.133200
20. Dutilleul P., Johnson C.W., Burgmann R., Wan Y., Shen Z.K. 2015 *Mulifrequential periodogram analysis of earthquake occurrence: An alternative approach to the Schuster spectrum, with two example in central California*. American Geophysical Union, Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Doi: 10.1002/2015JB012467.
21. Dykowski P. 2020. *Raport za rok 2020 z realizacji przez IGIK zadania 9 projektu EPOS-PL*. Warszawa. Praca niepublikowana.
22. Emter D. 1997. *Tidal triggering of earthquakes and volcanic events* w *Tidal Phenomena Lecture Notes in Earth Sciences* pod red. Wilhelm, Zurn i Wenzel (vol. 66) Springer-Verlag, Berlin, pp. 293 – 310.
23. Ekström G., Nettles M., Dziewonski A. M. 2012. *The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes*, Phys. Earth Planet. Inter., 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002
24. Gibowicz S. 1989. *Mechanizm ognisk wstrząsów górniczych*. Publikacje IGFPAN, M-13 (221) PWN Warszawa.
25. Gibowicz S., Kijko A. 1994. *An introduction to mining seismology*. New York, Academic Press.
26. Glasby G.P., Kaahara J. 2001 *Influence of tidal effects on the periodicity of earthquake activity in diverse geological settings with particular emphasis on submarine hydrothermal systems*. Earth-Science Reviews 52 pp. 261-297.
27. Hartmann T., Wenzel H.-G. 1995. *The HW95 potential catalogue*, Geophysical Research Letters 22, pp. 3553-3556.
28. Hartzell S. Heaton T.H. 1989. *The fortnightly tide and the tidal triggering of earthquakes* Bull. Seismol. Soc. Am. 79, 1282 – 1286,
29. Heaton T.H. 1975. *Tidal triggering of earthquakes* Geophys. J. R. Astron. Soc. 307 – 326,
30. Heaton T. H. 1982 *Tidal triggering of earthquakes* Bull. Seismol. Soc. Am. 72, 2181 – 2200,
31. Idziak A.F., Teper L., Zuberek W.M. 1999. *Sejsmiczność a tektonika Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Katowice, Wydaw. Uniwersytetu Śląskiego.
32. Iwata T. 2012. *Earthquake triggering caused by the external oscillation od stress/strain changes*. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, Doi:10.5078/corssa-65828518.
33. Jaros J. 1962. *Historia kopalni Król w Chorzowie (1791 do 1945)*.Wyd. Górnictwo-Hutnicze Katowice.
34. Kansova T., Tatnall A. 2009. *Earth tides and earthquake*. Proc. "Fringe 2009 Workshop" Frascati, Italy.
35. Klein F.W. 1976. *Earthquake Swarms and the Semiduriunal Solid Earth Tide*. Geophysical Journal Research astr. Society, 45, pp. 245-295.
36. Kolvankar V.G., More S., Thakur N. 2010. *Earth tides and earthquakes*. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 57 pp. 54-84
37. Kolvankar V.G. 2011. *Sun, Moon and earthquakes*. New Concepts in Global Tectonics Newsletter, no. 60 pp. 50-66
38. Kortas Ł., 2020. *Sejsmo-grawitacyjne sygnatury wstrząsów górniczych w ciągłych zapisach siły ciężkości grawimetrów pływowych gPhoneX*. Przegląd Górniczy nr 2.



39. Kotyrba A., Balicki A., Kortas Ł. 2005. *Zmiany regionalnego pola grawitacji w północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w latach 2002-2003*. Przegląd Geologiczny nr 4, pp.299-305.
40. Kotyrba A. 2014. *Czasowe zmiany pola siły ciężkości w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym i ich związek z eksploatacją górnictwem*. Przegląd Górniczy nr 5, pp.48-57.
41. 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 129/104288 pp. 1-12.
42. Kozłowska M., Orlecka-Sikora B., Rudziński Ł., Cielesta Sz., Mutke G. 2016. *Atypical evolution of seismicity patterns resulting from the coupled natural, human-induced and coseismic stresses in a longwall coal mining environment*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 86 (2016), pp. 5-15. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.03.024>
43. Love A. E. H. 1911. *Some problems of geodynamics*. Cambridge University Press pp. 49-57.
44. Marcak H., Zuberek W. 1994. *Geofizyka górnictwa*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice, pp. 110 – 165.
45. Marcak H., Mutke G. 2013. *Seismic activation of tectonic stresses by mining*. *Journal of Seismology*, Vol. 17, Issue 4, s. 1139–1148.
46. Micro-g LaCoste 2013a. *gPhoneX*. Version 4.0.01, PN: 115-550-002E. 01 October 2013
47. Micro-g LaCoste 2013b *gMonitor Gravity Data Acquisition and Processing Software User's Manual*. Version 2.0. PN: 115-550-001B. 01 October 2013
48. Micro-g LaCoste 2016 *Odin Leveling Platform Operation Manual*. PN: 115-550-004A. 15July 2016
49. Melchior P. 1983. *The Tides of The Planet Earth*. Pergamon Press.
50. Metivier L., de Viron O., Conrad C.P., Reanult S., Diament M., Patau G. 2009. *Evidence of earthquake triggering by the solid Earth tides*. *Earth and Planetary Science Letters* 278 pp 370-375.
51. Moncayo G.A., Zuluaga J.I., Monsalve G. 2019. *Correlation between tides and seismicity in Northwestern South America: the case of Colombia*. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 227-245 (2019) DOI: 10.1016/j.jsames.2018.11.020
52. 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.
53. Mutke G. 2019. *Oddziaływanie górnictwem wstrząsów sejsmicznych na powierzchnię*. Monografia. Wydawnictwo GIG - Katowice, ISBN 978-83-65503-21-3.
54. Neumeyer J. 2010. *Superconducting Gravimetry – rozdział 10 w Science of Geodesy-I*. Advances and Future Directions (red. Geochang Xu), Springer pp. 339-413.
55. Pawełczyk H. 2009. *Górnictwo z bezpiecznej perspektywy*. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków, pp. 97 – 122.
56. Rajner M. 2010. *Ocean tidal loading from the gravity measurements of Józefosław Obserwatory*. Artificial Satellites vo. 42 No 4. Doi: 10.2478/v10018-011-0006-2
57. Rudziński L.C., Cesca G., Lizurek G. 2016. *Complex rupture process of the 19 March 2013, Rudna Mine (Poland) induced seismic event and collapse in the light of local and regional moment tensor inversion*. *Seismological Research Letters*, Vol. 87, s. 274–284.
58. Rydelek P.A., Sacks I.S., Scarpa R. 1992. *On tidal triggering of earthquakes at Campi Flegrei, Italy*. *Geophysical Journal International* 109, pp 125-137.

59. Schuster A. 1897. *On lunar and solar periodicities of earthquakes* Proc. R. Soc. London, 61, 455-465.
60. Simon B., Lemaître A., Souchay J. 2013. *Oceanic Tides* w *Tides in Astronomy and Astrophysics* (red. Souchay J., Mathis S., Tokieda T.). Lecture Notes in Physics 861 Springer. pp. 83 – 114.
61. Sottili G., Martino S., Palladino D.M., Paciello A., Bozzano F. 2007. *Effects of tidal stresses on volcanic activity at Mount Etna, Italy*. Geophysical Research Letters vol. 34 L01311 doi:10.1029/2006GL028190
62. Stec K., Drzewiecki J. 2000. *Relationship between mine tremors focal mechanism and local mining and geological conditions*. Acta Montana no 16(118), pp. 189-202.
63. Stec K. 2005. *Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górniczych z obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Wiadomości Górnicze nr 4, pp. 168-174.
64. Stec K. 2007. *Characteristics of Seismic Activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland*. Geophysical Journal International, Blackwell Publishing Ltd. v. 168, pp. 757-768.
65. Stec K., Błaszczak E. 2008. *Charakterystyk procesów zachodzących w ogniskach wysokoenergetycznych wstrząsów występujących w czasie eksploatacji ścian 17 w pokładzie 361 w KWK "Knurów"*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi t.24, z. 2/3, pp. 226-244.
66. Stec K. 2009. *Mechanizm ogniska wstrząsu i metody jego wyznaczania*. Materiały Sympozjum Warsztaty 2009: Zagrożenia naturalne w górnictwie. Kraków. pp 287 – 305.
67. Stec K., Wojtecki Ł. 2011. *Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu związanych z eksploatacją pokładu 510 ścianą 502 w kopalni węgla kamiennego "Bielszowice"*. Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko nr 1 pp. 61-77
68. Takeuchi H. 1950. *On the Earth tide of the compressible Earth of variable density and elasticity*, Trans. Am. Geophys. Union, 31 (5), pp. 651–689.
69. Tamura Y. 1987, *A harmonic development of the tide generating potential*, Bulletin d'Information Merrees Terrestres, 99, pp. 6813 – 6855, Bruxelles
70. Tanaka S., Ohtake M., Sato H. 2002a. *Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data* Journal of Geophysical Research, 107(B10), 2211.
71. Tanaka S., Ohtake M., Sato H. 2002b. *Spatio-temporal variation of the tidal triggering effect on earthquake occurrence associated with the 1982 South Tonga earthquake of Mw 7.5*, Geophysical Research Letters, vol. 29, no. 16, 10.1029/2002GL015386,
72. Tanaka S., Ohtake M., Sato H. 2004. *Tidal triggering of earthquakes on Japan related to the regional tectonic stress*. Earth Planet Space 56, pp. 511-515.
73. Tanaka S. 2005. *Tidal triggering of earthquakes precursory to the 2004 Mw=9.0 Off Sumatra earthquake*, the 4th International Workshop on Statistical Seismology
74. Tanaka S., Sato H., Matsumura S, Ohtake M. 2006. *Tidal triggering of earthquakes in the subducting Philippine Sea plate beneath the locked zone of the plate interface in the Tokai region, Japan*. Tectonophysics, 417 (2006) pp. 69-80, doi: 10.1016/j.tecto.2005.09.013.
75. Tanaka S. 2012. *Tidal triggering of earthquakes prior to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw9.1)*. Geophysical Research Letters, vol. 39, L00G26, doi:10.1029/2012GL051179.
76. Teisseyre R. 1983. *Indukowana sejsmiczność i wstrząsy pochodzenia eksploatacyjnego*. W *Fizyka i ewolucja wnętrza Ziemi* pod red. R. Teisseyre. PWN Warszawa. pp 254-260.
77. Timmen L. 2010. *Absolute and Relative Gravimetry – rozdział 1* w *Science of Geodesy-I. Advances and Future Directions* (red. Geochang Xu), Springer pp. 1-44.

78. Tolstoy M., Vernon F.L., Orcutt J.A., Wyatt F.K. 2002. *The breathing of the seafloor: Tidal correlations of seismicity on Axial volcano*. *Geology* 30, pp. 503 – 506.
79. Torge W. 1993. *Gravimetry and tectonics*. Publication of the Finnish Geodetic Institute (Geodesy I Geophysics) Helsinki, 115., pp. 131-172.
80. Van Camp M., Vauterin P. 2005: *Tsoft: graphical and interactive software for analysis of the time series and Earth tides*, *Computers & Geosciences*, Vol. 31, Issue 5, June 2005 pp. 631-640.
81. Varga P., Grafarend E. 1996. *Distribution of the lunisolar tidal elastic stress tensor components within the Earth's mantle*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93 (1996), pp. 258-297.
82. Varga P., Grafarend E. 2018. *Influence of tidal forces on the triggering of seismic events*. *Pure and Applied Geophysics* 175, 1649-1657.
83. Vidale J.E., Agnew D.C., Johnston M.J.S, Oppenheimer D.H. 1998. *Absence of earthquake correlation with Earth tides: An indication of high preseismic fault stress rate*. *J. Geophys. Res.* 103, 24567-24573
84. Wang R. 1997. *Tidal Response of the Solid Earth* w *Tidal Phenomena Lecture Notes in Earth Sciences* pod red. Wilhelm, Zurn i Wenzel (vol. 66) Springer-Verlag, Berlin, pp. 27 – 58.
85. Wójcisz P. 2001. *Badania mechanizmów wstrząsów górniczych w Polsce*, w *Badania geofizyczne w kopalniach* pod red. Dubiński J., Pilecki Z., Zuberek W.M., Wydawnictwo IGSMiE Kraków, pp. 25-33.
86. Wilcock W.S.D. 2001. *Tidal triggering of microearthquakes on the Juan de Fuca Ridge*. *Geophysical Research Letters* vol. 28 no. 20 pp. 3999-4002.
87. Wenzel H.G. 1997. *Tide-Generating Potential for the Earth* w *Tidal Phenomena Lecture Notes in Earth Sciences* pod red. Wilhelm, Zurn i Wenzel (vol. 66) Springer-Verlag, Berlin pp. 9 – 26.
88. Zuberek W.M., Teper L., Idziak A.F., Sagan G. 1996. *Tectonophysical approach to the description of mining induced seismicity in the Upper Silesia* w *Tectonophysics in Mining Areas* pod red. Idziak A. wyd. Uniwersytet Śląski Katowice, pp. 78-98.
89. Zuberek W.M., Teper L., Idziak A.F., Sagan G. 1997. *Seismicity and tectonics in the Upper Silesian Coal Basin, Poland*. XIII International Congress of Carboniferous - Permian. *Prace Państwowego Instytutu Geologicznego nr 157* Kraków pp. 199-207.
90. Wykorzystane adresy stron internetowych:  
<http://www.grss.gig.eu>  
<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>  
<http://hpiers.obspm.fr/iers/eop/>  
<https://tcs.ah-epos.eu/>  
<http://www.tectonics.caltech.edu/resources>

## 11 Spis tabel.

Tab. 1. Zestawienie najważniejszych źródeł zmian pola siły ciężkości w punkcie na powierzchni Ziemi (Neumayer 2010).....	14
Tab. 2. Zestawienie wybranych fal pływowych. Wartości współczynnika grawimetrycznego za Dehant et al. (1999). Amplituda zmiany g za Wenzel (1997) i Timmen (2010). .....	21
Tab. 3. Zestawienie parametrów fal pływowych wykorzystanych do obliczenia efektu pływowego...	22

Tab. 4. Zestawienie parametrów do wyznaczenia liczby $N$ widma testu Shuster'a dla badanych katalogów. ....	47
Tab. 5. Zestawienie wyznaczonych kątów fazowych czasu wystąpienia wstrząsu indukowanego działalnością górniczą dla zbioru GRSS(1) względem syntetycznych zmian przyspieszenia siły ciężkości dla całego zbioru ( $ALL$ ) oraz z podziałem wg magnitudy $M_L$ . ....	55
Tab. 6. Zestawienie wyznaczonych kątów fazowych czasu wystąpienia wstrząsu indukowanego działalnością górniczą dla zbioru GRSS(2) względem rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanej pływami litosfery. ....	64
Tab. 7. Zestawienie wyznaczonych kątów fazowych czasu wystąpienia wstrząsu indukowanego działalnością górniczą dla zbioru ROWR19 względem rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanych pływami litosfery. ....	81

## 12 Spis rysunków.

Rys. 1. Geometria układu wzajemnego oddziaływania grawitacyjnego Ziemi i Księżyca. ....	15
Rys. 2. Zmiany wartości przyspieszenia siły ciężkości wywołane efektem pływowym wyznaczone dla stanowiska Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego w Katowicach ( $\phi = 50.27170^\circ$ , $\lambda = 19.02640^\circ$ , $h = 286\text{m n.p.m}$ ). A – zmiany w okresie 4-letnim, B – rocznym i C – miesięcznym .....	23
Rys. 3. Zmiany wartości przyspieszenia siły ciężkości wywołane efektem pływu oceanicznego wyznaczone dla stanowiska Górnośląskiego Obserwatorium Geofizycznego w Katowicach ( $\phi = 50.27170^\circ$ , $\lambda = 19.02640^\circ$ , $h = 286\text{m n.p.m}$ ). A – zmiany w okresie 4-letnim, B – rocznym i C – miesięcznym. ....	25
Rys. 4. Ruch bieguna względem skorupy ziemskiej w okresie 2016 – 2019r. ( <a href="http://hpiers.obspm.fr/eop-pc">http://hpiers.obspm.fr/eop-pc</a> ) . ....	28
Rys. 5. Zmiany przyspieszenia siły ciężkości związane z ruchem bieguna względem skorupy ziemskiej w okresie 2016 – 2019r. dla stanowiska GOG w Katowicach .....	28
Rys. 6. Zmiany wartości absolutnych przyspieszenia siły ciężkości obserwowane na punkcie KAT2 (GOG Katowice) uzyskane z realizacji projektu EPOS (Dykowski 2020) .....	29
Rys. 7. Zmiany przyspieszenia siły ciężkości wywołane zmianami ciśnienia atmosferycznego zarejestrowane na stanowisku GOG Katowice grawimetrem gPhoneX-157. ....	31
Rys. 8. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą ( <a href="http://grss.gig.eu">grss.gig.eu</a> ) w obszarze GZW w okresie 2016-2019. ....	32
Rys. 9. Wizualizacja 3D wstrząsów indukowanych eksploatacją ściany VIII E-1E w pokładzie 703/1 w KWK ROW ruch Rydułtowy. Widok od strony zachodniej. Płaszczyzna odwzorowuje położenie eksploatowanego pokładu .....	35
Rys. 10. Wagi zagrożenia fazowego (Pawełczyk 2009) .....	43
Rys. 11. Definicja pływowego kąta fazowego (Tanaka et al. 2002a). Maksimum i minimum fali pływowej, w tym przypadku wyrażonej przez naprężenie pływowe, położone najbliżej zaistniałego wstrząsu sejsmicznego opisane są poprzez $0^\circ$ i odpowiednio $\pm 180^\circ$ . Kąt fazowy pływu wyznaczany jest przez liniowe podzielenie przedziału czasu pomiędzy nimi. ....	45
Rys. 12. Stanowisko pomiarowe w Górnośląskim Obserwatorium Geofizycznym Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach z grawimetrem <i>gPhone-X</i> nr 157 ( $\phi = 50.271596^\circ$ , $\lambda = 19.026294^\circ$ , $h = 286.73\text{m n.p.m}$ ). ....	48
Rys. 13. Stanowisko pomiarowe w Industrialnym Centrum Kultury Zabytkowej Kopalni Ignacy w Rybniku - Niewiadomiu z grawimetrem <i>gPhoneX-155</i> ( $\phi = 50.062540^\circ$ , $\lambda = 18.467134^\circ$ , $h = 297.07\text{m n.p.m}$ ). ....	49
Rys. 14. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą ( <a href="http://grss.gig.eu">grss.gig.eu</a> ) w obszarze GZW w okresie 2016-2018 (zbiór GRSS(1)). ....	52

Rys. 15. Rozkład liczby wstrząsów w ujęciu miesięcznym w okresie 01.01.2016 -31.12.2018r – katalog GRSS(1). Niebieskimi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o magnitudzie w przedziale 3.0 – 3.5. Czerwonymi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o magnitudzie w przedziale 3.5 – 4.0. ....	53
Rys. 16. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górnictw na syntetycznych zmianach przyspieszenia siły ciężkości w okresie 01.01.2016 -31.12.2018r – katalog GRSS(1).....	54
Rys. 17. Rozkład wstrząsów na syntetycznych zmianach przyspieszenia siły ciężkości w okresie 2 miesięcy(A), 11 dni (B) oraz 5 dni (C) – katalog GRSS(1). ....	55
Rys. 18. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górnictw (katalog GRSS(1)) na podstawie wyznaczonego kąta fazowego względem sumarycznych, syntetycznych zmian przyspieszenia siły ciężkości. a) dla całego zbioru wstrząsów (ALL); b) dla wstrząsów o $1.9 \leq M_L < 3.0$ ; c) dla wstrząsów o $3.0 \leq M_L < 3.5$ .....	57
Rys. 19. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o $1.9 < M_L < 4.0$ które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r. ....	58
Rys. 20. . Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o $1.9 \leq M_L < 3.0$ które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r. ....	59
Rys. 21. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o $3.0 < M_L \leq 3.5$ które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r. ....	59
Rys. 22. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o $3.5 < M_L \leq 4.0$ które wystąpiły w okresie od 01.01.2016 r. do 31.12.2018 r. ....	60
Rys. 23. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górnictw (grss.gig.eu) w obszarze GZW w 2019 roku (zbiór GRSS(2)). ....	62
Rys. 24. Rozkład liczby wstrząsów w ujęciu miesięcznym w okresie 01.01.2019 -31.12.2019r – katalog GRSS(2). Niebieskimi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o $3.0 \leq M_L \leq 3.5$ . ....	62
Rys. 25. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 01.01.2019 – 31.12.2019 r. – katalog GRSS(2).....	63
Rys. 26. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru dla okresu 2 miesięcy (01.05.2019 – 30.06.2019) – katalog GRSS(2).....	63
Rys. 27. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 13 dni (14.05.2019 – 27.06.2019) – katalog GRSS(2).....	63
Rys. 28. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 5 kolejnych dni – katalog GRSS(2). ....	64
Rys. 29. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górnictw (katalog GRSS(2)) na podstawie wyznaczonego kąta fazowego względem sumarycznych, rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanych pływaniami litosfery. a) dla całego zbioru wstrząsów; b) dla wstrząsów o $2.1 \leq M_L < 3.0$ ; c) dla wstrząsów o $3.0 \leq M_L < 3.5$ . ....	66
Rys. 30. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o $2.1 \leq M_L < 3.5$ które wystąpiły w okresie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r. ....	66
Rys. 31. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o $2.1 \leq M_L < 3.0$ które wystąpiły w okresie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r. ....	67
Rys. 32. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o $3.0 \leq M_L < 3.5$ które wystąpiły w okresie od 01.01.2019 r. do 31.12.2019 r. ....	67
Rys. 33. Lokalizacja wstrząsów sejsmicznych indukowanych eksploatacją ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1 w KWK ROW ruch Rydułtowy w okresie od 26.02.2019 r. (uruchomienie ściany) do 29.01.2020 r. (ok 30 dni od zakończenia ściany) – katalog ROWR19.....	70
Rys. 34. Aktywność sejsmiczna w rejonie ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy.....	71
Rys. 35. Aktywność sejsmiczna zarejestrowana przed frontem eksploatacji ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy.....	71
Rys. 36. Aktywność sejsmiczna zarejestrowana za frontem eksploatacji ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy.....	72
Rys. 37. Lokalizacja wstrząsów indukowanych eksploatacją ściany VIII E-E1 w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy .....	73

Rys. 38. Lokalizacja wstrząsów indukowanych przed frontem eksploatacji ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy .....	74
Rys. 39. Lokalizacja wstrząsów indukowanych za frontem ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1. KWK ROW ruch Rydułtowy .....	75
Rys. 40. Rozkład liczby wstrząsów w ujęciu miesięcznym w okresie 26.02.2019 -29.01.2020r – katalog ROWR19. Niebieskimi gwiazdkami oznaczono wstrząsy o energii E+05 J a czerwonymi wstrząsy o energii E+06 J.....	76
Rys. 41. Aktywność sejsmiczna (kolor czerwony) rejestrowana wraz z postępowaniem frontu eksploatacji (kolor niebieski) ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1 KWK ROW ruch Rydułtowy z nałożonymi syntetycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości (w $\mu\text{Gal}$ ) wywołanymi pływami litosfery dla stanowiska ICK ZKI w Rybniku. ....	77
Rys. 42. Aktywność sejsmiczna (kolor czerwony) rejestrowana przed frontem ściany wraz z postępowaniem frontu eksploatacji (kolor niebieski) ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1 KWK ROW ruch Rydułtowy z nałożonymi syntetycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości (w $\mu\text{Gal}$ ) wywołanymi pływami litosfery dla stanowiska ICK ZKI w Rybniku. ....	78
Rys. 43. Aktywność sejsmiczna (kolor czerwony) rejestrowana za frontem ściany wraz z postępowaniem frontu eksploatacji (kolor niebieski) ściany VIII E1-E w pokładzie 703/1 KWK ROW ruch Rydułtowy z nałożonymi syntetycznymi zmianami przyspieszenia siły ciężkości wywołanymi dla stanowiska ICK ZKI w Rybniku. ....	79
Rys. 44. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 26.02.2019 -28.01.2020r – katalog ROWR19.....	80
Rys. 45. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 2 miesięcy (01.05.2019 – 30.06.2019) – katalog ROWR19. ....	80
Rys. 46. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 11 kolejnych dni – katalog ROWR19. ....	80
Rys. 47. Rozkład wstrząsów na rzeczywistych zmianach przyspieszenia siły ciężkości po odjęciu dryftu grawimetru w okresie 3 kolejnych dni – katalog ROWR19. ....	81
Rys. 48. Rozkład wstrząsów indukowanych działalnością górniczą (katalog ROWR19) na podstawie wyznaczonego kąta fazowego względem sumarycznych, rzeczywistych zmian przyspieszenia siły ciężkości wywołanych pływami litosfery. a) dla całego zbioru wstrząsów E+01 – E+06J ; b) dla wstrząsów o E+01 – E+02J; c) dla wstrząsów o E+03J, d) dla wstrząsów o E+04J; e) dla zsumowanych wstrząsów E+05 – E+06J.....	84
Rys. 49. Widmo Shuster'a dla katalogu wstrząsów o E+05J i E+06J które wystąpiły w okresie od 26.02.2019 r. do 29.01.2020 r. ....	85
Rys. 50. Widmo Shuster'a dla całego zbioru wstrząsów E+01 – E+06 J które wystąpiły w okresie od 26.02.2019 r. do 29.01.2020 r. ....	86
Rys. 51. Zestawienie liczby wstrząsów zarejestrowanych w kolejnych dniach tygodnia w latach 2016 – 2018 (katalog GRSS(1)).....	88