

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
WYDZIAŁ GÓRNICICTWA, INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA
I AUTOMATYKI PRZEMYSŁOWEJ

Dyscyplina: Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka

Rozprawa doktorska

**Opis parametrów drgań gruntu wywołanych
wstrząsami górotworu uwzględniający
kierunkowość tłumienia fal sejsmicznych**

mgr inż. Ewelina Lier

Promotor:

dr hab. inż. Piotr Bańka, prof. PŚ

Gliwice 2022

STRESZCZENIE

W warunkach polskich kopalń węgla kamiennego zlokalizowanych na Górnym Śląsku jednym z głównych zagrożeń, zarówno dla ruchu zakładu górniczego, jak i dla całego obszaru górniczego kopalni jest narastające wraz ze zwiększaniem głębokości wydobywania zagrożenie sejsmiczne. Towarzyszące eksploatacji wstrząsy o zróżnicowanej energii sejsmicznej skutkują powstawaniem fali sejsmicznej, niejednokrotnie docierającej do powierzchni terenu i powodującej drgania gruntu. Z uwagi na możliwość wystąpienia uszkodzeń obiektów infrastruktury powierzchniowej drgania powierzchni gruntu stanowią realne zagrożenie zwłaszcza na terenach zurbanizowanych.

Prowadzone od lat obserwacje pozwalają coraz lepiej rozumieć zjawiska zachodzące w górotworze, w tym również nierównomierny rozkład drgań na powierzchni po wystąpieniu wysokoenergetycznego wstrząsu sejsmicznego. Niejednokrotnie na stanowiskach pomiarowych położonych bliżej epicentrum wstrząsu rejestruje się maksymalne amplitudy drgań mniejsze niż w punktach znajdujących się w większej odległości. Jedną z głównych przyczyn nierównomiernego rozkładu wartości zarejestrowanych maksymalnych amplitud przyspieszeń i prędkości drgań gruntu jest zróżnicowana wartość współczynnika amplifikacji drgań.

Nie zawsze jednak zjawisko to można uzasadnić wyłącznie w oparciu o właściwości luźnych utworów czwartorzędowych, związanych z amplifikacją, dlatego też w pracy założono i wykazano, że istnieje związek pomiędzy rozkładem maksymalnych amplitud przyspieszeń (prędkości) drgań gruntu generowanych przez wstrząsy górotworu a przebiegiem zaburzeń tektonicznych obszaru górniczego kopalni.

Poligon badawczy stanowił zbiór danych zawierających parametry drgań gruntu, spowodowane przez zarejestrowane w latach 2009-2019 wysokoenergetyczne wstrząsy w dwóch kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Analizę przeprowadzono wykorzystując metody eksploracji danych. Zastosowane modele opierały się na metodzie analizy regresji oraz sztucznych sieciach neuronowych. Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiły stwierdzenie, że istnieje związek pomiędzy kierunkowością rozchodzenia się fali sejsmicznej a występującymi zaburzeniami tektonicznymi. Stworzone modele mogą być z powodzeniem wykorzystywane dla określania rozkładu parametrów drgań gruntu w przypadku wystąpienia nowych wstrząsów.

ABSTRACT

In terms of Polish hard coal mines located in Upper Silesia, both to the underground mining operation and to the entire surface mining area, one of the main hazards is the seismic hazard, which intensifies with increasing depth of excavation. The tremors with different seismic energy accompanying the excavation are the cause of unfavourable phenomena, which result in the formation of a seismic wave, often reaching the surface and causing ground vibrations. Due to the possibility of serious damages to the surface infrastructure facilities, the vibrations transmitted to the surface are a real hazard, especially in urbanized areas.

The observations, which have been carried out for many years, make it possible to better understand the phenomena occurring in the rock mass, including the uneven distribution of vibrations on the surface after the occurrence of a high-energy seismic tremor. Frequently at measuring stations located closer to the epicentre of the tremor are recorded smaller maximum amplitudes of vibrations than at points located at a greater distance. One of the main reasons for the uneven distribution of the recorded values of maximum acceleration (velocity) amplitudes of ground vibration is the different value of the vibration amplification factor.

However, it is not always possible to justify this phenomenon solely on the basis of the properties of loose Quaternary formations. Due to that, in the paper it was assumed and shown that there is a relationship between the distribution of the maximum accelerations (velocities) amplitudes of ground vibrations generated by rock tremors and the direction of tectonic disturbances in the mining area of the mine.

The research area consisted of ground vibration data caused by recorded in the years 2009-2019 high energy tremors from two mines in the Upper Silesia Coal Basin. The analysis was performed using data mining methods. The models used were based on the regression analysis method and artificial neural networks. The conducted research made it possible to prove that there is a relationship between the directionality of the seismic wave propagation and the occurring tectonic disturbances. The created models can be successfully used to determine the distribution of ground vibration parameters in the event of new tremors occurring.

Spis treści

1. Wstęp	6
2. Rezultaty wybranych badań poruszających problematykę drgań gruntu wywołanych działalnością górniczą	8
3. Teza, cel i zakres pracy	15
4. Amplifikacja drgań gruntu przez luźne utwory czwartorzędowe	16
5. Eksploracja danych	23
5.1. Podstawowe założenia	23
5.2. Analiza regresji	25
5.2.1. Parametry regresji liniowej prostej	26
5.2.2. Regresja wielokrotna	31
5.3. Sztuczne sieci neuronowe	35
5.3.1. Opis sieci neuronowej	35
5.3.2. Uczenie sieci	38
6. Modele zastosowane do opisu pola przyspieszeń drgań gruntu	45
6.1. Modele wykorzystujące metodę analizy regresji	45
6.2. Model wykorzystujący sieci neuronowe	50
7. Charakterystyka rejonów badań	52
7.1. Rejon 1	52
7.2. Rejon 2	54
8. Zagrożenie sejsmiczne i zagrożenie tąpnięciami w analizowanych rejonach	57
8.1. Przyczyny występowania i sposoby minimalizacji zagrożenia sejsmicznego oraz zagrożenia tąpnięciami w analizowanych rejonach	57
8.2. Aparatura pomiarowa stosowana w rejonach badań	58
8.3. Zdarzenia sejsmiczne zarejestrowane w analizowanych rejonach	59
8.4. Oddziaływanie zarejestrowanych zdarzeń sejsmicznych na powierzchnię terenu	61
9. Wyniki analiz parametrów drgań gruntu generowanych wysokoenergetycznymi wstrząsami górotworu przeprowadzonych za pomocą metod eksploracji danych	65
9.1. Amplifikacja drgań w miejscu zainstalowania aparatury pomiarowej	65
9.2. Analiza parametrów drgań gruntu	69
9.3. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu w sąsiedztwie uskoku	79

9.4. Możliwość poprawy opisu pola przyspieszeń drgań przy wykorzystaniu sieci neuronowych	96
10. Przykład praktycznego zastosowania wybranych modeli uwzględniających kierunkowość tłumienia drgań	104
11. Podsumowanie i wnioski końcowe	112
Literatura	115
Spis rysunków	122
Spis tabel	125

1. Wstęp

Prowadzenie podziemnej eksploatacji górniczej wiąże się z występowaniem zjawisk sejsmicznych, które niejednokrotnie wywołują drgania odczuwalne na powierzchni terenu. W Polsce głównymi rejonami, w których obserwujemy występowanie tak rozumianych, niekorzystnych skutków eksploatacji są: kopalnie rudy miedzi zlokalizowane w rejonie Legnicko – Głogowskiego Okręgu Miedziowego oraz kopalnie węgla kamiennego na Górnym Śląsku i w Lubelskim Zagłębiu Węglowym. Bardzo silne drgania gruntu obserwowane są także w odkrywkowej kopalni węgla brunatnego w Bełchatowie. Występujące w tych regionach zjawiska sejsmiczne w postaci wstrząsów wysokoenergetycznych są przyczyną powstawania drgań powierzchni terenu, niejednokrotnie bardzo silnych i odczuwalnych na znacznym obszarze. Drgania te w negatywny sposób oddziałują na elementy środowiska i obiekty infrastruktury powierzchniowej. Zasięg tego oddziaływania uzależniony jest od szeregu czynników, m.in. od budowy geologicznej rejonu, w którym wystąpił wstrząs oraz od jego energii. W związku z koniecznością ograniczenia skutków prowadzonej eksploatacji, już na etapie jej projektowania niezbędne jest podjęcie działań zapobiegawczych, minimalizujących prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zjawisk sejsmicznych w postaci wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu. Całkowita eliminacja zagrożenia sejsmicznego nie jest jednak możliwa, dlatego, oprócz działań prewencyjnych, prowadzona jest prognoza i obserwacja obejmująca m.in. szacowanie maksymalnych energii wstrząsów i ocenę skutków zdarzeń sejsmicznych, zarówno w wyrobiskach podziemnych, jak i na powierzchni.

Do prognozy potencjalnych oraz do oceny już zaistniałych skutków zjawisk sejsmicznych na powierzchni terenu stosuje się skale wykorzystujące wartości parametrów drgań gruntu. Określenie tych parametrów następuje jednak wielu trudności. Pomimo dostępności szeregu metod, które wykorzystują dotychczasową wiedzę i doświadczenie, dokładne określenie parametrów drgań powierzchni terenu w miejscach, gdzie nie jest prowadzony bezpośredni pomiar jest bardzo trudne. W pracy przedstawiono wyniki badań wykazujące istnienie związku pomiędzy występującymi zaburzeniami geologicznymi w postaci uskoków a rozkładem pola przyspieszeń drgań gruntu. Rezultaty uzyskane w wyniku zastosowania modelu uwzględniającego anizotropię tłumienia fali sejsmicznej porównano z wynikami otrzymanymi przy zastosowaniu klasycznej, po-

wszechnie stosowanej postaci relacji tłumienia, szeroko przedyskutowanej w wielu publikacjach m.in. [49].

W analizach przeprowadzonych w trakcie realizacji pracy wykorzystano zbiory danych zawierające parametry zarejestrowanych w latach 2009-2019 wstrząsów wysokoenergetycznych (data wystąpienia, współrzędne, energia sejsmiczna) oraz powodowanych przez nie drgań gruntu (prędkość, przyspieszenie, czas trwania). Dane te pochodzą z aparatur pomiarowych zainstalowanych na terenach górniczych dwóch silnie zagrożonych sejsmicznie kopalń Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.

2. Rezultaty wybranych badań poruszających problematykę drgań gruntu wywołanych działalnością górniczą

Ze względu na warunki zalegania złóż, głównie dużą głębokość eksploatacji i rodzaj skał otaczających (tj. występowanie w górotworze warstw skał o dużej wytrzymałości, zdolnych do kumulowania dużej ilości energii odkształcenia sprężystego), wiele polskich kopalń prowadzi eksploatację w warunkach istniejących zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciami. Występowanie zagrożenia, określanie jego poziomu, projektowanie robót w warunkach współwystępowania zagrożeń oraz dążenie do minimalizacji szkodliwych skutków zdarzeń, doprowadziły do rozwoju geofizyki górniczej. W początkowym okresie nauka ta w odniesieniu do zagrożenia sejsmicznego i tąpnięciami skupiała się głównie na zapobieganiu tąpnięciom, aktualnie równie dużego znaczenia nabiera problem drgań powierzchni terenu powodowanych przez towarzyszące eksploatacji wstrząsy górotworu.

Prowadzone w Polsce i na świecie badania nad drganiami gruntu wywołanymi wstrząsami górotworu indukowanymi prowadzoną działalnością górniczą umożliwiły opracowanie wielu sposobów szacowania parametrów tych drgań.

Złożoność problematyki oddziaływania wstrząsów indukowanych działalnością górniczą na powierzchnię terenu w ostatnich latach została przedstawiona np. przez G. Mutke w [58], gdzie dokonano syntetycznego opisu problemu, przedstawiając zarówno fizyczne podstawy teoretyczne zjawisk sejsmicznych, jak i opracowane metody wykorzystywane do oceny skutków tych zjawisk na powierzchni terenu.

Przy szacowaniu parametrów drgań gruntu wywołanych zjawiskami sejsmicznymi indukowanymi prowadzoną działalnością górniczą jednym ze sposobów jest wyznaczenie zależności regresyjnych między zaobserwowaną wartością prędkości (przyspieszenia) drgań gruntu a energią wstrząsu, głębokością jego ogniska i odległością epicentralną. Przykładem są prace: P. Kościelnego i B. Syrka [36], którzy, bazując na ówczesnych doświadczeniach rejonu GZW, wyznaczyli zależność między energią wstrząsu a przyspieszeniem drgań, J. Dubińskiego i Z. Gerlacha [15], którzy uwzględnili dodatkowo głębokość ogniska wstrząsu, czy G. Mutke [57], który podjął udaną próbę opracowania zależności regionalnych, uniwersalnych dla całego GZW. Kontynuacją tego podejścia są relacje tłumienia opracowane przez J. Chodackiego [11, 12], bazujące na modelu Si

i Midorikawy [74]. Powszechnie wykorzystywane do szacowania parametrów drgań gruntu jest równanie regresji nazywane relacją tłumienia. Jest to równanie w postaci logarytmicznej, wykorzystujące historyczne dane o zarejestrowanych wstrząsach i drganiach gruntu, do stworzenia najlepszego dopasowania, opisującego zależność pomiędzy prędkością (przyspieszeniem) drgań gruntu a parametrami wstrząsu, który je wywołał. W Polsce metoda analizy regresji jest często wykorzystywana zarówno dla zjawisk zaobserwowanych w kopalniach rud miedzi, jak i węgla kamiennego. Taka metodyka znalazła zastosowanie w pracach: S. Lasockiego, M. Szybińskiego, M. Matuszczyka, J. Mirka i A. Pielesza [45], P. Bańki [2], S. Lasockiego [43], D. Olszewskiej [64], P. Bańki, E. Lier, M. M. Fernandez, A. Chmieli, Z. F. Muñiza, A. B. Sanchez [5], J. Kornowskiego [34] i innych.

Możliwe są także inne podejścia np. proponowana w pracy A. Pięty, T. Danka i A. Leśniaka [68] metoda wykorzystująca modelowanie numeryczne do określenia prędkości drgań gruntu. Metoda ta wymaga stworzenia modelu, który ma być odwzorowaniem warunków rzeczywiście występujących w badanym obszarze, a analiza polega na modelowaniu propagacji fali wywołanej wygenerowanym w określonym punkcie modelu wstrząsem.

Badaniem czynników wpływających na rozkład przyspieszeń drgań na powierzchni zajmowali się także J. Dubiński, A. Lurka i K. Stec [16], którzy w swoich badaniach stwierdzili występowanie zależności między mechanizmem ognisk wstrząsów a kierunkowością radiacji fal sejsmicznych.

Z kolei H. Marcak [47, 48] w swoich pracach stosuje rozwiązania wykorzystujące dane o budowie geologicznej analizowanego terenu, głównie występujące zaburzenia. Ponadto proponuje odejście od szacowania, a następnie wykorzystywania do określania skutków drgań na powierzchni, wartości maksymalnych drgań, które nie są reprezentatywne dla całego sygnału, a w zamian za to zastosowanie do oceny szkodliwości drgań obwiedni sygnałów drgań. Podobne rozwiązanie proponuje A. Cianciara [10].

Dane o budowie geologicznej do określenia skutków występujących drgań wykorzystują również E. Pilecka i R. Szremer – Zaucha [69, 70]. W swoich publikacjach przeprowadziły analizę rozkładu szkód górniczych w odniesieniu do rozkładu kierunku uskoków i na podstawie tej analizy stwierdziły występowanie zależności pomiędzy kierunkiem szkód a kierunkiem istniejących zaburzeń. Badania przeprowadzono na podstawie danych z kopalni „Piast” oraz „Rydułtowy – Anna”. Ponadto, na podstawie analizy danych z kopalni „Rydułtowy – Anna”, autorki wykazały istnienie zależności pomiędzy

uszkodzeniem obiektu powodowanym przez występujące na powierzchni drgania, a jego odległością od najbliższego uskoku o dużym zrzucie.

Opracowania dotyczące przebiegu fal sejsmicznych indukowanych działalnością górnictwą można znaleźć w pracach G. Mutke i J. Dworaka [61], A. Golika i M. Mendeckiego [25], D. Olszewskiej i S. Lasockiego [44, 65], którzy wykorzystują rozwiązania analityczne, oparte o rezultaty pomiarów wielkości drgań na skalnym podłożu i na powierzchni terenu, wywołanych tym samym wstrząsem górotworu, a także nowoczesne metody empiryczne, jak np. SSR (Standard Spectral Ratio) czy HVSR (Horizontal to Vertical Spectra Ratio).

Coraz powszechniejsze zastosowanie w badaniach różnych aspektów działalności górniczej znajdują sieci neuronowe, powstałe w wyniku badań i obserwacji procesów zachodzących w ludzkim mózgu. Korzystają one z uproszczonego modelu neuronu, a głównym procesem przetwarzania informacji wejściowych jest proces uczenia. Rozpowszechnieniem możliwości zastosowania sieci neuronowych w naukach górniczych zajmuje się R. Tadiusiewicz [77], a w odniesieniu do zagadnień sejsmiczności indukowanej sieci neuronowe wykorzystane zostały m.in. do prognozy zagrożenia sejsmicznego [3] oraz do analizy przekazywania drgań gruntu na fundamenty budynków [40]. Wciąż jednak, pomimo szerokiej możliwości zastosowania tego typu rozwiązania oraz jego licznych zalet, metoda sieci neuronowych nie jest powszechnie wykorzystywana do szacowania wielkości drgań gruntu wywołanych eksploatacją górnictwą.

Na świecie badania sejsmiczności indukowanej prowadzone są praktycznie dla każdego regionu, w którym prowadzona jest eksploatacja górnictwa. Większość metod stosowanych w geofizyce górnictwa opracowana została w oparciu o metody wykorzystywane w sejsmologii globalnej, dlatego też największy rozwój tej dyscypliny występuje w rejonach silnie zaangażowanych tektonicznie. Spośród powstałych modeli wykorzystywanych do szacowania wartości przyspieszeń i/lub prędkości drgań gruntu wywołanych zjawiskami sejsmicznymi wyróżnić można kilka zależności, które znalazły zastosowanie także w warunkach polskich. Są one oparte na zróżnicowanych kombinacjach relacji tłumienia drgań wraz ze wzrostem odległości, jak np. równanie Mussona i Cenciá [56], Estevy i Rosenbluetha [22], Campbella [7] czy Joynera i Boore'a [29, 30]. We wszystkich decydujące znaczenie dla wartości przyspieszenia mają magnituda wstrząsu i tłumienie geometryczne wraz z odległością. Rozbudowane podejście zaproponowali Si i Midorikawa [74], którzy, oprócz wykorzystania magnitudy i odległości od źródła, zwrócili uwagę na mechanizm ogniska oraz lokalne warunki geologiczne, czy

Campbell i Bozorgnia [8], którzy w analizach uwzględnili dodatkowe parametry: mechanizm ogniska wstrząsu, prędkość propagacji drgań oraz klasę podłoża.

Wpływ lokalnych warunków gruntowych na przebieg fali sejsmicznej stał się przedmiotem intensywnych badań po trzęsieniu ziemi w Meksyku w 1985 r. [21], jednak już w pracach Lomniza i Rosenbluetha [46], stwierdzono, że warstwy nadkładu mają bezpośredni wpływ na częstotliwości, amplitudy drgań oraz czas ich trwania.

Jednym z ośrodków, w którym prowadzone są badania dotyczące rozchodzenia się fali sejsmicznej jest Uniwersytet Arystotelesa w Salonikach. Problematyką tą zajmuje się K. Pitilakis [71], który w swojej pracy na temat wpływu lokalnych warunków budowy geologicznej na przebieg fali sejsmicznej, dokonał klasyfikacji i porównania niektórych metod wykorzystywanych do szacowania parametrów drgań gruntu. Wszystkie wykorzystywane metody podzielił na pięć głównych kategorii tj.: metody eksperymentalno-empiryczne, metody empiryczne, metody pół empiryczne, metody teoretyczne oraz metody mieszane. Praktyczne zastosowanie jednej z metod sprawdzili P. Triantafyllidis, P.M. Hatzidimitriou i P. Suhadolc [79], którzy wykorzystali modelowanie jednowymiarowe, oparte o teoretyczny algorytm symulujący rozchodzenie się fali. Na Uniwersytecie w Santa Barbara, w Stanach Zjednoczonych [63] przeprowadzono badania wpływu budowy warstw przypowierzchniowych na wzmocnienie fali S w regionie Bio Bio w Chile stosując metodę κ . Podobne badania, dotyczące wzmocnienia lub osłabienia fali sejsmicznej, prowadzone są także w wielu innych krajach m.in. w Turcji (np. N. Akyol, A. Akinci i H. Eyidogan w rejonie Bursy [1], S. Over, A. Buyuksarac, O. Bekta i A. Filazi w Antiochii, w Prowincji Hatay [67]), w Japonii (np. T. Satoh, T. Sato i H. Kawase [73]), w Rumunii (np. G. Marmureanu, A. Marmureanu, C.O. Cioflan [50]), w Niemczech (D. Ehret, J. Rohn, D. Hannich, C. Grandas, G. Huber [19]) czy we Francji (np. B. Gatmiri [24]).

Badania nad drganiami gruntu prowadzone są także dla oddziaływań powstających w wyniku działalności człowieka niezwiązanej z aktywnością górniczą. Już w latach 70. XX w. T. Gutkowski i L. Dym [27] zwrócili uwagę na problem oceny szkodliwości drgań przy projektowaniu budynków. W swojej pracy dokonali podsumowania ówczesnego stanu wiedzy na temat drgań gruntu. Podzielili drgania generowane działalnością człowieka na trzy rodzaje tj.: drgania generowane robotami strzałowymi, drgania generowane pracami budowlanymi oraz drgania powstające w następstwie ruchu drogowego i kolejowego. Wyróżnili trzy typy fali, opisali ich właściwości oraz właściwości gleb mające wpływ na rozchodzenie się tych fal. Podali zależności opisujące tłumienie oraz

opisali przyrządy do pomiaru parametrów drgań wraz z możliwościami ich zastosowania. W późniejszym czasie powstało wiele opracowań badających różne aspekty drgań gruntu powstających w wyniku działalności człowieka. Z górniczego punktu widzenia na uwagę zasługują badania poświęcone drganiom generowanym przez prowadzenie robót strzałowych, jak np. praca S. Dindarloo [14], w której zastosowano metodę GEP (Gene expression programming) czy praca S. Kostića, M. Perca, N. Vasovića i S. Trajkovića [35], w której do prognozy drgań wykorzystano sieci neuronowe.

Ponadto szeroko opisywana jest również problematyka niekorzystnego oddziaływania, jakie wywołuje prowadzenie robót górniczych na środowisko naturalne i infrastrukturę powierzchniową. W literaturze odnaleźć można wiele opracowań dotyczących wpływu konkretnej kopalni na otaczające ją środowisko czy badających skutki konkretnych zdarzeń. Przykładami takich opracowań mogą być: praca J. Deca [13], który wykorzystując badania sejsmiczne określił zagrożenia powierzchni będące następstwem zakończonej już eksploatacji na niewielkich głębokościach, praca A. McGarra, J. Bicknella, E. Sembery i R. Greena [51], w której przeanalizowali wysokoenergetyczne wstrząsy w dwóch okręgach RPA, prowadzących wydobywanie złota lub praca H. Uzoegbo i L. Li [80], którzy skupili się na opisie uszkodzeń budynków, jakie wystąpiły po zaistnieniu wysokoenergetycznych wstrząsów oraz zwrócili uwagę na konieczność właściwego projektowania konstrukcji budynków w celu uniknięcia poważnych uszkodzeń.

Wyniki badań w dziedzinie sejsmiczności globalnej od lat są z powodzeniem adaptowane do zagadnień górniczych i wykorzystywane do analiz dotyczących problematyki wstrząsów wysokoenergetycznych powstających w następstwie prowadzenia eksploatacji złóż. Dynamiczny rozwój tej dziedziny wiedzy umożliwia coraz lepsze zrozumienie procesów zachodzących w górotworze i na powierzchni terenu.

W problematyce sejsmiczności indukowanej działalnością górnictwem, zarówno w Polsce, jak i na świecie, coraz powszechniejsze staje się wykorzystywanie udoskonalonych wraz z rozwojem technik informatycznych metod eksploracji danych. Wśród wielu dostępnych metod wymienić można: metody regresji, np. regresję wielokrotną (Multiple Regression), drzewa klasyfikacyjne i regresyjne (Classification and Regression Trees), algorytmy genetyczne (Genetic Algorithm) i programowanie genetyczne (Genetic Programming), sieci neuronowe (Neural Network) czy wektory nośne (Support Vector Machines).

Metody regresji znalazły zastosowanie m.in. w pracach G. Mutke [57], który wykorzystując regresję liniową wyznaczył zależności służące prognozowaniu maksymalnych

amplitud prędkości i przyspieszeń drgań podłoża skalnego w GZW, czy w pracy P. Bańki, P. Kołodziejczyka i E. Lier, którzy wykorzystując wyniki pomiarów parametrów drgań gruntu podjęli próbę wyznaczenia wartości współczynnika amplifikacji drgań [4].

Metoda drzew klasyfikacyjnych i regresyjnych do badań zagadnień górniczych została wykorzystana w [28]. Przedmiotem badań był model dobowej emisji energii sejsmicznej. Porównano trafność dopasowania wyników uzyskanych za pomocą trzech modeli wykorzystujących: regresję logistyczną, sieci neuronowe oraz drzewa wzmacniane. Wykazano najlepsze dopasowanie modelu, który wykorzystywał metodę drzew wzmacnianych. Polega ona na wykorzystaniu algorytmu, który tworzy ciągi prostych drzew, z których każde kolejne jest zbudowane do predykcji reszt generowanych przez poprzednie [20].

Programowanie genetyczne w praktyce zostało przedstawione w pracy [14]. Autor porównał wyniki badań uzyskanych przez zastosowanie zaproponowanej przez C. Ferreirę [23], powstałej na bazie metody algorytmu genetycznego (GA) oraz programowania genetycznego (GP), metody programowania ekspresji genów (GEP) z wynikami uzyskanymi poprzez zastosowanie sztucznych sieci neuronowych. Do prognozy wywołanych robotami strzałowymi drgań gruntu lepsze dopasowanie stwierdzono dla metody GEP. Programowanie ekspresji genów polega na odnalezieniu rozwiązania problemu, przedstawionego w postaci drzewa ekspresji genów, za pomocą jednostkowych ciągów stałej długości, które są przedmiotem reprodukcji [14].

Sztuczne sieci neuronowe znalazły zastosowanie w wielu pracach m.in. K. Kuźniar [39, 41], która wykorzystuje sieci neuronowe do analizy wywołanych działalnością górniczą drgań przekazywanych z gruntu na fundamenty budynków czy analizy interakcji w strukturze gleby w przypadku wystąpienia wstrząsów górniczych, wykazując możliwości zastosowania sieci neuronowych do przeprowadzania analiz o wystarczającej, z punktu widzenia inżynierii górniczej, dokładności.

Podstawą sztucznych sieci neuronowych jest próba odwzorowania neuronu będącego istotą biologicznego systemu nerwowego. Neurony wejściowe sieci otrzymują sygnały wejściowe, zawierające określone informacje, które mają związek z informacją zawartą w sygnale wyjściowym. Sieci neuronowe umożliwiają zbadanie tego związku. Powiązaną z koncepcją sieci neuronowych metodą jest metoda wektorów nośnych, która została wykorzystana np. w pracy [31], gdzie dokonano próby oceny i prognozy indukowanych robotami strzałowymi drgań gruntu. Stwierdzono bardzo zbliżone wartości

prognozowanych i zaobserwowanych prędkości drgań. Metoda polega na wyznaczeniu hiperpłaszczyzny będącej nieliniową granicą decyzyjną wykorzystując regresję i klasyfikację. Optymalną hiperpłaszczyznę buduje się minimalizując pewną funkcję błędu w algorytmie uczącym. Wyróżnić można kilka typów wektorów nośnych, posiadających różne funkcje bazowe: liniową, wielomianową, RBF i sigmoidalną [20].

3. Teza, cel i zakres pracy

Po wystąpieniu wstrząsów indukowanych prowadzonymi robotami górniczymi często stwierdza się duże zróżnicowanie zarejestrowanych maksymalnych amplitud przyspieszeń i prędkości drgań gruntu na poszczególnych stanowiskach pomiarowych. Niejednokrotnie w punktach sieci obserwacyjnej położonych bliżej epicentrum wstrząsu rejestruje się maksymalne amplitudy drgań mniejsze niż w punktach znajdujących się w większej odległości. Nie zawsze zjawisko to można uzasadnić zróżnicowaniem wartości współczynnika amplifikacji drgań przez luźne utwory czwartorzędowe. Do opisu takich wyników obserwacji drgań gruntu można wykorzystać model uwzględniający kierunkowość tłumienia fal sejsmicznych.

Teza rozprawy została sformułowana następująco: istnieje związek pomiędzy przebiegiem zaburzeń tektonicznych obszaru górniczego kopalni a rozkładem maksymalnych amplitud przyspieszeń (prędkości) drgań powierzchni terenu generowanych przez wstrząsy górotworu indukowane prowadzoną działalnością górniczą.

Celem pracy jest określenie wpływu występujących zaburzeń tektonicznych na anizotropię rozchodzenia się drgań gruntu wywołanych wstrząsami indukowanymi prowadzonymi działaniami górniczymi. Ustalenie związku pomiędzy zuskokowaniem złoża a parametrami charakteryzującymi rozchodzenie się drgań powierzchni terenu umożliwi wykorzystanie modelu anizotropowego na etapie prognozy drgań gruntu wywoływanych wstrząsami górotworu. Do realizacji przyjętego celu zastosowane zostały wybrane metody eksploracji danych: regresja wielokrotna oraz sieci neuronowe. Obliczenia testowe przeprowadzono dla danych pochodzących z dwóch kopalń węgla kamiennego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w których zagrożenie sejsmiczne i tąpniętami osiąga bardzo wysoki poziom.

Zakres pracy obejmuje:

- 1) część teoretyczną, w której dokonano ogólnego przeglądu stanu badań problematyki oddziaływania wstrząsów górotworu na powierzchnię terenu w Polsce i na świecie oraz omówiono zastosowane metody obliczeniowe,
- 2) część praktyczną, w której przedstawiono wyniki przeprowadzonych analiz, poprzedzone opisem warunków występujących w kopalniach, z których pochodzą dane wraz z przedstawieniem poziomu zagrożenia sejsmicznego, a także określono możliwości zastosowania uzyskanych rezultatów.

4. Amplifikacja drgań gruntu przez luźne utwory czwartorzędowe

Amplifikacja drgań, określana przy pomocy współczynnika amplifikacji drgań, charakteryzuje wzmocnienie lub osłabienie maksymalnych amplitud drgań podczas ich przechodzenia ze skalnego podłoża, przez warstwy tworzące nadkład, na powierzchnię terenu. Przeprowadzone dotychczas pomiary wykazały, że słabe grunty sprzyjają wzmocnieniu amplitudy drgań oraz wydłużeniu czasu ich trwania, przy równoczesnym obniżeniu ich dominującej częstotliwości, zaś twarde skały występujące w warstwach przypowierzchniowych nie powodują wzmocnienia amplitudy drgań, które trwają krócej, przy wyższych częstotliwościach [58].

Drgania gruntu zarejestrowane przez stanowiska aparatury Amax w rejonie 1 oraz przez stanowiska aparatury ARP-2000 w rejonie 2, przedstawiają wartości, które są wzmocnione (osłabione) przez warstwy luźnego nadkładu występujące w miejscu posadowienia stanowiska. W celu eliminacji wpływu budowy luźnego nadkładu na wartości przyspieszeń i prędkości drgań określono wartości współczynnika amplifikacji drgań w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej.

Do oszacowania wartości współczynnika amplifikacji wykorzystuje się szereg metod. Dokładność uzyskiwanych rezultatów zależy głównie od stopnia znajomości budowy warstw przypowierzchniowych. Badanie właściwości nadkładu może być prowadzone poprzez profilowanie sejsmiczne (np. technika MASW [52, 75]), czy przy zastosowaniu wyliczanego dla wstrząsów współczynnika spektralnego H/V [62].

Dla omawianych rejonów, do określenia wartości współczynnika amplifikacji, wykorzystano opracowany przez J.P. Bardeta i T. Tobita w 2001 r. program NERA (A Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits). Umożliwia on przeprowadzenie obliczeń z uwzględnieniem nieliniowej charakterystyki naprężeniowo – odkształceniowej dowolnej liczby poziomo zalegających warstw skalnych (luźnego nadkładu), leżących na półprzestrzeni, z której rozchodzi się fala sejsmiczna. Obliczenia przeprowadzane są przy wykorzystaniu metody różnic skończonych, zgodnie z przedstawionymi poniżej założeniami [6].

1) Wykonanie jednowymiarowej analizy wzmocnienia amplitudy drgań przez warstwy nadkładu.

Fala S propaguje w warstwach, dla których przyjęto następujące założenia:

- są poziomo jednorodne,
- mają nieskończony zasięg poziomy,
- są poddawane wyłącznie poziomym ruchom przekazywanym ze skalnego podłoża.

Na rysunku 4.1 przedstawiono założenia oraz warunki brzegowe przyjęte do analizy.

Równanie różniczkowe przemieszczeń poziomych przedstawia się następująco:

$$\rho_n \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (4.1)$$

gdzie:

ρ_n – ciężar objętościowy nadkładu,

d – przemieszczenie poziome,

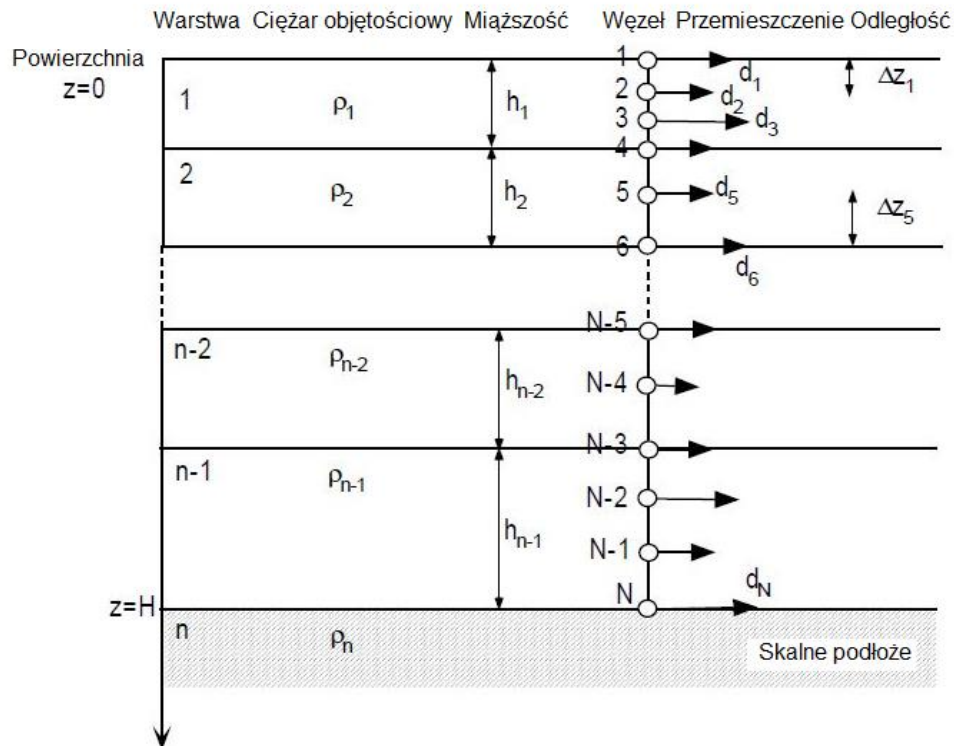
z – głębokość zalegania,

t – czas,

τ – naprężenie styczne,

η – współczynnik tłumienia.

Warunki brzegowe są określone na powierzchni (dla $z = 0$) oraz w miejscu, gdzie kończy się nadkład a rozpoczyna skalne podłoże ($z = H$) i wynoszą: $\tau = 0$ dla $z = 0$ oraz $\tau = \tau_B$ dla $z = H$. Naprężenie styczne τ_B w punkcie $z = H$ nie jest znane. Oblicza się je z prędkości drgań w punkcie $z = H$.



Rys. 4.1. Schemat modelu przyjętego do oszacowania wartości współczynnika amplifikacji drgań [6]

W analizie amplifikacji drgań gruntu przez warstwy nadkładu wyróżnia się przemieszczenia na powierzchni nadkładu, przemieszczenia w miejscu, gdzie kończą się warstwy skalnego podłoża i rozpoczyna się nadkład oraz przemieszczenia w miejscu, gdzie luźny nadkład nie występuje. Wstrząs generuje falę poprzeczną, która propaguje pionowo w górę z amplitudą d_I w warstwach skalnego podłoża. Amplituda fali w miejscu przejścia z warstw skalnego podłoża do nadkładu wynosi $d_I + d_R$, gdzie d_R jest amplitudą fali odbitej przy przechodzeniu przez połączenie nadkładu ze skalnym podłożem. W miejscu, gdzie nie stwierdzono występowania luźnego nadkładu amplituda fali na powierzchni terenu wynosi $2d_I$ z uwagi na brak naprężenia stycznego na powierzchni terenu. Naprężenie τ_B w miejscu przejścia skalnego podłoża w nadkład ($z = H$) może zostać obliczone przy założeniu, że skalne podłoże jest sprężyste. Propagujące w górę fale padające rozchodzą się w skalnym podłożu z prędkością fali poprzecznej v_s . Przemieszczenie cząstek d_I z uwagi na rozchodzące się w skalnym podłożu fale padające jest funkcją głębokości z i czasu t :

$$d_I = d_I(z + v_{st}) \quad (4.2)$$

Podobnie przemieszczenie cząstek d_R z uwagi na fale odbite przy przejściu z podłoża skalnego do nadkładu wynosi:

$$d_R = d_R(z - v_{st}) \quad (4.3)$$

Naprężenie styczne τ_B wynosi:

$$\tau_B = \mu \left(\frac{\partial d_I}{\partial z} + \frac{\partial d_R}{\partial z} \right) \quad (4.4)$$

gdzie:

μ – moduł sprężystości poprzecznej skał.

Wstawiając pierwszą pochodną równań 4.2 i 4.3:

$$\frac{\partial d_I}{\partial z} = \frac{v_I}{v_s} \text{ oraz } \frac{\partial d_R}{\partial z} = -\frac{v_R}{v_s} \quad (4.5)$$

gdzie:

v_I oraz v_R – prędkość cząstek dla fali padającej i odbitej.

Prędkość v_B w punkcie $z = H$ jest sumą prędkości fali padającej i odbitej:

$$v_B = v_I + v_R \quad (4.6)$$

wtedy też:

$$\tau_B = \frac{\mu}{v_s}(2v_I - v_B) = \rho_s v_s(2v_I - v_B) \quad (4.7)$$

gdzie:

ρ_s – ciężar objętościowy skalnego podłoża.

Równanie powyższe odnosi się do naprężenia stycznego i prędkości w miejscu połączenia nadkładu i skalnego podłoża, dostarczając dodatkowego równania dla określenia naprężenia stycznego oraz dolnego warunku brzegowego. Równanie to ma również zastosowanie w przypadku, gdy skalne podłoże dochodzi do powierzchni terenu (nie występują warstwy nadkładu) – wtedy, ponieważ: $\tau_B = 0$, to $v_B = 2v_I$.

2) Sformułowanie analizy jednowymiarowej odpowiedzi gruntu (nadkładu) za pomocą metody różnic skończonych:

A) Dyskretyzacja czasowo-przestrzenna

Analizowana warstwa gruntu jest podzielona na $m-1$ warstw mających różną miąższość h_i oraz ciężar objętościowy ρ_i od $i = 1$ do $m-1$. Przemieszczenie d oraz naprężenie τ są określane w N węzłach sieci, które definiują podwarstwy występujące w warstwie. Przepieszczenie węzła i w czasie t_n jest określone jako $d(z_i, t_n) = d_{i,n}$, gdzie z_i określa głębokość węzła i . Podobnie naprężenie i odkształcenie w węźle i w czasie t_n jest określone jako $\tau_{i,n}$ (dla naprężenia) oraz $\gamma_{i,n}$ (dla odkształcenia). $v_{i,n}$ określa prędkość $v(z_i, t_n)$, zaś $a_{i,n}$ określa przyspieszenie $a(z_i, t_n)$ w węźle i w czasie t_n . Pochodna pierwszego rzędu jest szacowana z wykorzystaniem metody progresywnych różnic skończonych:

$$\frac{df(z_i)}{dz} = \lim_{\Delta z_i \rightarrow 0} \frac{f(z_{i+1}) - f(z_i)}{\Delta z_i} \quad (4.8)$$

gdzie f jest dowolną funkcją różniczkowalną, a $\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$. Progresywna różnica skończona jest korzystniejsza przy aproksymacji wyższego rzędu, ponieważ w prosty sposób opisuje nieciągłość pochodnych przemieszczeń na połączeniach warstw. Odkształcenie w warstwie poniżej węzła i w czasie t_n wynosi:

$$\gamma_{i,n} = \frac{\partial d}{\partial z} = \frac{d_{i+1,n} - d_{i,n}}{\Delta z_i} \quad (4.9)$$

Odkształcenie pomiędzy węzłami i oraz $i+1$ jest stałe, co prowadzi do wniosku, że naprężenie pomiędzy węzłami i oraz $i+1$ również jest stałe. Równania w węzłach $i = 1, \dots, N$ w czasie t_n wynoszą:

$$\rho_i a_{i,n} + \eta_i v_{i,n} = F_{i,n} \quad (4.10)$$

gdzie ρ_i oznacza ciężar objętościowy, η_i lepkość pomiędzy węzłami i oraz $i+1$, a $F_{i,n}$ jest naprężeniem w węźle i . Naprężenie w węźle $i = 2, \dots, N-1$ w czasie t_n jest określane zgodnie z poniższą zależnością:

$$F_{i,n} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \Big|_{i,n} \approx 2 \frac{\tau_{i,n} - \tau_{i-1,n}}{\Delta z_i + \Delta z_{i-1}} \quad (4.11)$$

W węźle 1 (na powierzchni) naprężenie powinno wynosić 0. Ponad węzłem 1 zostały wprowadzone: fikcyjny węzeł 0 i fikcyjna warstwa o miąższości Δz_1 . Naprężenie $\tau_{0,n}$ w fikcyjnej warstwie powinno być równe $-\tau_{1,n}$, po to, aby średnie naprężenie w węźle 1 było równe 0 (tj. $\tau_{0,n} + \tau_{1,n} = 0$), a w konsekwencji:

$$F_{1,n} = \frac{2\tau_{1,n}}{\Delta z_1} \quad (4.12)$$

W węźle N (dolnym) naprężenie powinno być równe τ_B . Pod węzłem N zostały wprowadzone: fikcyjny węzeł N+1 i fikcyjna warstwa o miąższości Δz_{N-1} . Naprężenie $\tau_{N,n}$ w fikcyjnej warstwie powinno być równe $2\tau_{B,n} - \tau_{N-1,n}$, po to, aby średnie naprężenie w węźle N było równe $\tau_{B,n}$ (tj. $\tau_{0,n} + \tau_{1,n} = 0$). Wtedy naprężenie w warstwie N wynosi:

$$F_{N,n} = \frac{\tau_{N,n} - \tau_{N-1,n}}{\Delta z_{N-1}} = 2 \frac{\tau_{B,n} - \tau_{N-1,n}}{\Delta z_{N-1}} \quad (4.13)$$

B) Algorytm różnicy centralnej

Metoda różnicy centralnej jest szczególnym rodzajem algorytmu Newmarka [6]. Prognozowana prędkość $\tilde{v}_{i,n+1}$ wynosi:

$$\tilde{v}_{i,n+1} = v_{i,n} + \frac{1}{2} a_{i,n} \Delta t \quad (4.14)$$

$\tilde{v}_{i,n+1}$ jest związana bezpośrednio z przemieszczeniem i prędkością w czasie t_n oraz t_{n+1}

$$d_{i,n+1} = d_{i,n} + \Delta t \tilde{v}_{i,n+1} \text{ oraz } v_{i,n+1} = \tilde{v}_{i,n+1} + \frac{1}{2} a_{i,n+1} \Delta t \quad (4.15)$$

Skoro $v_{i,n} = \tilde{v}_{i,n} + \frac{1}{2} a_{i,n} \Delta t$ wtedy prędkość i przyspieszenie mogą zostać wyrażone jako prognoza prędkości w czasie t_n i t_{n+1}

$$v_{i,n} = \frac{1}{2} (\tilde{v}_{i,n+1} + \tilde{v}_{i,n}) \text{ oraz } a_{i,n} = \frac{1}{\Delta t} (\tilde{v}_{i,n+1} - \tilde{v}_{i,n}) \quad (4.16)$$

po podstawieniu:

$$\tilde{v}_{i,n+1} = \frac{1}{1 + \eta_i \frac{\Delta t}{2\rho_i}} (\tilde{v}_{i,n} (1 - \eta_i \frac{\Delta t}{2\rho_i}) + F_{i,n} \frac{\Delta t}{\rho_i}) \quad (4.17)$$

W przypadku braku lepkości ($\eta_i = 0$) równanie przyjmuje postać:

$$\tilde{v}_{i,n+1} = \tilde{v}_{i,n} + F_{i,n} \frac{\Delta t}{\rho_i} \quad (4.18)$$

W węźle N (dolnym) naprężenie $\tau_{B,n}$ wynosi:

$$\tau_{B,n} = \rho_N v_s (2V_{1,n} - v_{N,n}) \quad (4.19)$$

Co ostatecznie daje:

$$\tilde{v}_{N,n+1} = \frac{\tilde{v}_{N,n}(\Delta z_{N-1} - v_s \Delta t) + 4v_s V_{1,n} \Delta t - 2\tau_{N-1,n} \Delta t / \rho_N}{\Delta z_{N-1} + v_s \Delta t} \quad (4.20)$$

Przy twardym podłożu skalnym:

$$\tilde{v}_{N,n+1} = -\tilde{v}_{N,n} + 4V_{I,n} \quad (4.21)$$

Prędkość w węźle N wynosi wtedy:

$$v_{N,n} = \frac{1}{2} (\tilde{v}_{N,n+1} + \tilde{v}_{N,n}) = 2V_{I,n} \quad (4.22)$$

co jest przewidywanym dla sztywnego podłoża wynikiem. Kiedy $\tilde{v}_{i,n+1}$ jest określone można obliczyć parametry $v_{i,n}$, $a_{i,n}$, $d_{i,n+1}$.

Dla określenia wartości współczynnika amplifikacji drgań konieczne jest przyjęcie częstotliwości drgań. W pracy częstotliwość ta została określona przy wykorzystaniu zaproponowanych przez G. Mutke [57] równań krzywych regresji ograniczających obszar występowania dominujących częstotliwości składowych poziomych maksymalnych amplitud prędkości i przyspieszeń drgań w obszarze epicentralnym:

$$F_{v \min} = [28,1e^{(-0,51 \cdot \log(E))}] + 0,7 \quad (4.23)$$

$$F_{v \max} = [910e^{(-1,14 \cdot \log(E))}] + 2,85 \quad (4.24)$$

gdzie:

$F_{v \min}$ - krzywa ograniczająca od dołu obszar występowania dominujących częstotliwości drgań dla składowych poziomych maksymalnych amplitud prędkości,

$F_{v \max}$ - krzywa ograniczająca od góry obszar występowania dominujących częstotliwości drgań dla składowych poziomych maksymalnych amplitud prędkości,

E – energia sejsmiczna wstrząsu, J

oraz

$$F_{a \min} = [91e^{(-0,78 \cdot \log(E))}] + 1,79 \quad (4.25)$$

$$F_{a \max} = [99e^{(-0,49 \cdot \log(E))}] + 1,27 \quad (4.26)$$

gdzie:

$F_{a \min}$ - krzywa ograniczająca od dołu obszar występowania dominujących częstotliwości drgań dla składowych poziomych maksymalnych amplitud przyspieszeń,

$F_{a \max}$ - krzywa ograniczająca od góry obszar występowania dominujących częstotliwości drgań dla składowych poziomych maksymalnych amplitud przyspieszeń.

5. Eksploracja danych

5.1. Podstawowe założenia

Eksploracja danych (ang. Data Mining) jest procesem polegającym na wydobywaniu wiedzy w procesie analizy istniejącego zbioru danych. Jest to multidyscyplinarna dziedzina, intensywnie rozwijana ze względu na szerokie wykorzystanie w nauce i biznesie. Rozwój technik i metod eksploracji związany jest z tworzeniem coraz obszerniejszych baz danych oraz potrzebą ich przetwarzania, formułowania reguł czy odkrywania zależności. W literaturze najpopularniejszym podziałem metod eksploracji jest podział ze względu na cel eksploracji. W wyniku tego podziału wyróżniamy sześć zagadnień, do których wykorzystywane są metody eksploracji danych [26]:

- 1) klasyfikacja,
- 2) regresja,
- 3) grupowanie,
- 4) podsumowywanie,
- 5) poszukiwanie reguł asocjacyjnych,
- 6) detekcja zmian, anomalii i odchyleń.

Do rozwiązania wymienionych powyżej problemów wykorzystywanych jest wiele technik, opartych o zróżnicowane algorytmy i korzystających z wielu dziedzin prowadzonych badań m.in. statystyki czy badań nad sztuczną inteligencją.

Klasyfikacja polega na znalezieniu modelu lub funkcji umożliwiającej przyporządkowanie wskazanego obiektu do jednej z predefiniowanych klas. Najczęściej wykorzystuje się: klasyfikację bayesowską, adaptywną sieć Bayesa, algorytmy drzew decyzyjnych, algorytm k najbliższych sąsiadów, sieci neuronowe czy algorytm SVM [53, 76].

Regresja to inaczej poszukiwanie funkcji, mającej na celu znalezienie sposobu odwzorowania zależności między występującymi zmiennymi dla analizowanych danych, minimalizując błąd pomiędzy wartością zaobserwowaną a wartością przewidzianą [81]. W zagadnieniach regresji wykorzystywana jest m.in. regresja liniowa i regresja nieliniowa.

Grupowanie (klastrowanie, analiza skupień) jest znalezieniem skończonego zbioru kategorii opisujących dane. Obiekty są grupowane wykorzystując zasadę maksymalizacji podobieństw wewnątrz klas przy równoczesnej minimalizacji podobieństwa między klasami. Do analizy skupień wykorzystuje się: metody hierarchiczne (procedury aglo-

meracyjne i deglomeracyjne), grupy metod k-średnich, metody rozmytej analizy skupień czy metody niehierarchiczne [53].

Do podsumowywania zaliczyć należy wszystkie metody, które służą przedstawieniu danych w zwartej i łatwiejszej w interpretacji formie np. metody wizualizacji danych [26].

Poszukiwanie reguł asocjacyjnych to inaczej znajdowanie zależności lub korelacji między danymi występującymi w dużym zbiorze danych. Wykorzystywane są np. algorytmy Apriori, Eclat oraz FP-growth [26, 81].

Detekcja zmian, anomalii i odchyłeń polega na wyszukiwaniu nietypowych, niepasujących do trendu wzorców, które mogą świadczyć o istnieniu błędów lub pokazywać interesującą zależność występującą w zbiorze [26, 53].

Dla każdego z powyższych zagadnień obowiązujące jest kilka etapów, które można wyróżnić w procesie wydobywania wiedzy z istniejących baz danych [55]:

- 1) Czyszczenie danych polegające na usunięciu ze zbioru danych niepełnych, nieistotnych lub niepoprawnych.
- 2) Integracja danych, czyli stworzenie jednego, zintegrowanego zbioru danych z różnych źródeł.
- 3) Selekcja danych tj. wybór danych istotnych z punktu widzenia prowadzonego procesu analizy.
- 4) Konsolidacja i transformacja danych mająca na celu przedstawienie danych w postaci wymaganej przez stosowane metody eksploracji.
- 5) Eksploracja danych polegająca na poszukiwaniu potencjalnie użytecznych wzorców spośród zbioru przygotowanych danych.
- 6) Ocena wzorców, czyli identyfikacja i ocena otrzymanych rezultatów.
- 7) Wizualizacja wzorców mająca na celu przedstawienie otrzymanych w wyniku przeprowadzonej analizy rezultatów w sposób umożliwiający użytkownikowi interpretację i zrozumienie.

Przy tworzeniu wykorzystywanych do analizy baz danych należy zwrócić uwagę na najczęściej pojawiające się problemy: zbyt dużą liczbę zmiennych wejściowych, brak podziału na dane uczące i testowe, nieodpowiednie dane wejściowe (np. zawierające wartości odstające, niezawierające najważniejszych z punktu widzenia badanego zjawiska zmiennych, czy niedokładnie zmierzone).

5.2. Analiza regresji

Z uwagi na szerokie zastosowanie jedną z najpopularniejszych metod wykorzystywaną do szacowania wartości zmiennej celu jest modelowanie regresji. Najprostszym stosowanym modelem jest prosta regresja liniowa, wykorzystywana do opisu zagadnień, w których występuje jedna ciągła zmienna objaśniająca i jedna ciągła zmienna odpowiedzi. Model ten przyjmuje postać równania liniowego [37]:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x \quad (5.1)$$

gdzie:

\hat{y}_i – wartość szacowana zmiennej celu,

b_0 – wyraz wolny równania, określa punkt przecięcia osi y i linii regresji,

b_1 – współczynnik kierunkowy równania, określa nachylenie linii regresji.

Parametry b_0 i b_1 nazywane są współczynnikami regresji. Ich określenie i ostateczny wybór jest realizowany przy użyciu różnych metod, które sprawdzają dobroć dopasowania powstałej prostej do zbioru danych. Najpopularniejszą jest metoda najmniejszych kwadratów. Polega ona na takim wyznaczeniu równania regresji, aby suma kwadratów wszystkich wartości resztowych (czyli odległości między punktem rzeczywistym reprezentującym dane a jego rzutem pionowym na linię regresji) była jak najmniejsza. Wartość resztowa jest jednym z wielu stosowanych terminów określających różnicę między wartością oszacowaną a wartością przewidywaną. W literaturze [9] spotkać można szereg innych określeń, z których warto wymienić: błąd predykcji, błąd oszacowania, błąd resztowy, residuum czy reszta. W celu uniezależnienia modelu od zastosowanej do jego stworzenia próby oszacowane równanie regresji (5.1) uzupełnia się o dodatkowy parametr ε , pozwalający na uwzględnienie nieoznaczoności modelu. Równanie regresji przyjmuje postać:

$$y = \beta_0 + \beta_1x + \varepsilon \quad (5.2)$$

gdzie:

β_0, β_1 – analogicznie jak b_0 i b_1 w równaniu (5.1),

ε – błąd losowy.

Wtedy też, przyjmując, że reszty $(y_i - \hat{y})$ są oszacowaniami losowymi błędów ε_i dla $i = 1, 2, \dots, n$, sumę kwadratów błędów dla populacji można zapisać w postaci równania:

$$SSE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2 \quad (5.3)$$

gdzie:

SSE – suma kwadratów błędu oszacowania (inaczej: suma kwadratów błędów), nazywana zmiennością niewyjaśnioną.

Do określenia wartości wyrazu wolnego i współczynnika kierunkowego stosuje się następujące równania:

$$b_1 = \frac{\sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)/n}{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/n} \quad (5.4)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (5.5)$$

gdzie:

n – całkowita liczba obserwacji,

\bar{y} – średnia wartość zmiennej objaśnianej,

\bar{x} – średnia wartość zmiennej objaśniającej.

Budowa każdego modelu wykorzystującego regresję jest ponadto związana ze sprawdzeniem poprawności i użyteczności wyznaczonego równania, co jest realizowane za pomocą różnego rodzaju parametrów i współczynników.

5.2.1. Parametry regresji liniowej prostej

W dostępnej literaturze np. [42, 66], poświęconej m.in. zagadnieniom regresji nieodłączną częścią rozważań jest określenie, czy i na ile uzyskane oszacowanie jest wystarczające z punktu widzenia założonych celów. Głównymi parametrami wyznaczanymi podczas prowadzenia takich analiz są: współczynnik determinacji, błąd standardowy estymatora, współczynnik korelacji, punkty wysokiej dźwigni, punkty oddalone i obserwacje wpływowe. Ponadto wyznacza się przedziały ufności i przedziały predykcji oraz przeprowadza test t-Studenta, służący do interpretacji prowadzonej analizy i otrzymywanych rezultatów.

W regresji liniowej prostej współczynnik determinacji jest parametrem, który umożliwia określenie dopasowania regresji, czyli stwierdzenie, na ile uzyskany model objaśnia zmienność obserwowanych danych. Jest on oznaczany r^2 i wyrażony w postaci równania:

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (5.6)$$

gdzie:

SSR – regresyjna suma kwadratów (inaczej: suma kwadratów odchyleń regresyjnych), nazywana zmiennością wyjaśnioną, wynosząca:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2 \quad (5.7)$$

SST – całkowita suma kwadratów:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2 \quad (5.8)$$

oraz

$$SST = SSR + SSE \quad (5.9)$$

dla

$$SSE = \sum (y - \hat{y})^2 \quad (5.10)$$

Zgodnie z powyższymi równaniami, współczynnik determinacji może przyjmować wartości z zakresu $0 \div 1$, gdzie 0 oznacza brak dopasowania uzyskanego równania do zbioru danych, a 1 – dopasowanie całkowite.

Błąd standardowy estymatora s w regresji liniowej określa dokładność obliczonych za pomocą wyznaczonego równania regresji przewidywań. Jest wyznaczany ze wzoru:

$$s = \sqrt{MSE} \quad (5.11)$$

gdzie:

MSE – średni błąd kwadratowy:

$$MSE = \frac{SSE}{n-m-1} \quad (5.12)$$

m – liczba zmiennych objaśniających.

Określona wartość s jest więc wartością resztową i stanowi różnicę pomiędzy przewidywaną a rzeczywistą wartością zmiennej celu. Im wartość s jest mniejsza, tym oszacowanie jest dokładniejsze.

Współczynnik korelacji r_k (współczynnik korelacji Pearsona) jest stosowany do ilościowego określenia zależności liniowej między zmiennymi i wyznaczany ze wzoru:

$$r_k = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n-1)s_x s_y} \quad (5.13)$$

gdzie:

s_x – odchylenie standardowe z próby dla zmiennych x ,

s_y – odchylenie standardowe z próby dla zmiennych y .

Współczynnik korelacji przyjmuje wartości z zakresu $-1 \div 1$. Interpretacja otrzymanego wyniku jest następująca [42]:

- zmienne są dodatnio skorelowane dla wartości r powyżej 0,7,
- zmienne są słabo dodatnio skorelowane dla wartości r od 0,33 do 0,7,
- zmienne nie są skorelowane dla wartości r od -0,33 do 0,33,
- zmienne są słabo ujemnie skorelowane dla wartości r od -0,7 do -0,33,
- zmienne są ujemnie skorelowane dla wartości r poniżej -0,7.

Dodatnia korelacja oznacza wzrost wartości y wraz ze wzrostem wartości x , zaś korelacja ujemna oznacza, iż wzrost jednego z parametrów związany jest ze spadkiem wartości drugiego z parametrów. Innym sposobem przedstawienia współczynnika korelacji r_k jest wykorzystanie współczynnika determinacji r^2 . Wtedy:

$$r_k = \pm\sqrt{r^2} \quad (5.14)$$

przy czym znak $+/-$ jest warunkowany znakiem współczynnika nachylenia b_1 . Dla dodatnich wartości b_1 znak jest dodatni, dla ujemnych – ujemny.

Kolejne parametry są związane z oceną danych, które zostały wykorzystane do stworzenia modelu. Pierwszym z nich jest punkt wysokiej dźwigni h , czyli punkt o bardzo dużej lub bardzo małej wartości w przestrzeni zmiennych objaśniających x (tj. przy pominięciu wartości zmiennej y). Dźwignię wyznacza się ze wzoru:

$$h_i = \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (5.15)$$

gdzie:

h_i - dźwignia i -tej obserwacji.

Przyjmuje ona wartości od $1/n$ do 1. Uznaje się, że wartość dźwigni jest wysoka dla wartości powyżej $2(m+1)/n$ (niekiedy przyjmuje się $3(m+1)/n$).

Drugim z parametrów jest punkt oddalony (inaczej: obserwacja oddalona, punkt odstający). Do punktów oddalonych zaliczamy wszystkie obserwacje o bardzo dużej wartości bezwzględnej standaryzowanego błędu predykcji (standaryzowanej reszty). Standaryzowaną resztę wyznacza się z ilorazu błędu predykcji i błędu standardowego reszty:

$$reszta_{i,stand} = \frac{y_i - \hat{y}_i}{s_{i,resid}} \quad (5.16)$$

gdzie:

$s_{i,resid}$ – błąd standardowy reszty:

$$s_{i,resid} = s\sqrt{1 - h_i} \quad (5.17)$$

Przyjęto, że do punktów oddalonych zalicza się punkty o wartości bezwzględnej standaryzowanego błędu predykcji powyżej 2 [42].

Ostatnim z parametrów określających właściwości punktów ze zbioru jest obserwacja wpływowa, czyli obserwacja, która istotnie wpływa na zmianę parametrów modelu. Wykorzystuje ona zarówno wartość reszty, jak i wartość dźwigni. Do określenia, czy dany punkt jest obserwacją wpływową służy parametr nazywany odległością Cooka, wyznaczany ze wzoru:

$$D_i = \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{(m+1)^2} \frac{h_i}{(1-h_i)^2} \quad (5.18)$$

gdzie:

s – standardowy błąd szacowania.

Przyjęto, że do obserwacji wpływowych zaliczane są te obserwacje, dla których odległość Cooka jest większa od 1.

Pozostałe parametry wykorzystywane w regresji liniowej nazywane są parametrami wnioskowania. Pierwszym z nich jest test t-Studenta wykonywany w celu sprawdzenia istnienia liniowej zależności między zmiennymi. Zgodnie z równaniem regresji liniowa zależność między zmiennymi istnieje, jeżeli parametr β_1 jest różny od 0. Twierdzenie, że jeżeli $\beta_1 = 0$ świadczy o niewystępowaniu zależności liniowej nazywane jest hipotezą zerową, zaś twierdzenie, że jeśli $\beta_1 \neq 0$ to zależność liniowa występuje jest nazywane hipotezą alternatywną. Test t-Studenta przeprowadzany jest w oparciu o estymator punktowy s_{b_1} (standardowy błąd nachylenia), którego wysokie wartości oznaczają, że estymator b_1 jest niestabilny, a małe – że estymator b_1 jest dokładny [42]. Standardowy błąd nachylenia jest wyznaczany z zależności:

$$s_{b_1} = \frac{s}{\sqrt{\sum x^2 - (\sum x)^2/n}} \quad (5.19)$$

gdzie:

s – standardowy błąd szacowania.

Statystyka testu t-Studenta wynosi:

$$t = \frac{b_1}{s_{b_1}} \quad (5.20)$$

Oprócz powyższego w analizie regresji stosowane są: przedział ufności dla nachylenia linii regresji, przedziały ufności wartości średniej y dla danej wartości x czy przedział predykcji dla wartości y przy danej wartości x . Pierwszy z nich określa graniczne wartości, które rzeczywiście przyjmuje współczynnik nachylenia β_1 dla statystyki t_{n-2} o $n-2$ stopniach swobody, kolejne dwa - dokładność oszacowania punktowego (średniego i losowo wybranej wartości).

Przedział ufności dla nachylenia linii regresji jest wyznaczany ze wzoru:

$$p_{un} = b_1 \pm t_{n-2} \cdot s_{b_1} \quad (5.21)$$

Przedział ufności wartości średniej y przy danej wartości x określa równanie:

$$p_{uw} = \hat{y}_p \pm t_{n-2} s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (5.22)$$

gdzie:

\hat{y}_p – estymator punktu y dla określonej wartości x ,

t_{n-2} – mnożnik związany z rozmiarem próbki i poziomem ufności,

x_p – wartość x , dla której wykonywane jest szacowanie.

Zaś przedział predykcji dla wartości y przy danej wartości x :

$$p_{pw} = \hat{y}_p \pm t_{n-2} s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_p - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (5.23)$$

Sprawdzenie założeń regresji wymaga znajomości założeń modelu regresji, których spełnienie jest niezbędne, aby otrzymać prawidłowe wyniki oszacowań. Najważniejsze założenia dotyczą składnika losowego, który musi spełniać podane warunki [42]:

- 1) $E(\varepsilon) = 0$ tzn. składnik losowy ε jest zmienną o średniej wartości równej zero,
- 2) $\sigma^2 = \text{const.}$ tzn. wariancja ε , oznaczona σ^2 jest stała i niezależna od wartości zmiennej x ,
- 3) wartości ε są niezależne,
- 4) ε jest zmienną losową o rozkładzie normalnym.

Najpopularniejszymi metodami sprawdzenia powyższych warunków jest wykorzystanie metod graficznych, takich jak wykresy kwantylowe lub wykresy standaryzowane reszt w stosunku do wartości przewidywanych. W pierwszym z nich zastosowane są kwantyle rozkładu, czyli wartości x_p takie, że $p\%$ wartości rozkładu jest mniejsze lub równe x_p .

Wykresy kwantylowe przedstawiają rozkład reszt kwantyli próbkowych (obserwowanych) względem odpowiedniego rzędu kwantyli rozkładu normalnego. W drugim typie wykresu (wykres standaryzowanych reszt względem wartości przewidywanych) sprawdza się istnienie charakterystycznych układów punktów, które mogłyby świadczyć o naruszeniu któregoś z założeń modelu regresji. Oprócz metod graficznych w postaci wykresów stosowane są również metody diagnostyczne jak np. test Andersona-Darlinga, test Barletta, test Levene'a, test Durbana-Watsona czy test serii. W przypadku stwierdzenia naruszenia założeń regresji dalsze budowanie modelu nie jest możliwe bez zastosowania transformacji którejś ze zmiennych. Najprostszą możliwą transformacją jest transformacja logarytmiczna, którą można zastosować do zmiennej celu y , zmiennej objaśniającej x lub do obu zmiennych równocześnie. Innym przykładem może być transformacja Boxa-Coxa, czy zaproponowana przez Mosterller'a i Tukey'a reguła wypukłości, gdzie do osiągnięcia liniowości danych wybierane jest przekształcenie zależne od obecnego kształtu wykresu rozrzutu zmiennych. Zbiór dostępnych w tej regule transformacji to hierarchia transformacji zawierająca 8 dostępnych przekształceń.

5.2.2. Regresja wielokrotna

W badanych zagadnieniach z reguły mamy do czynienia z więcej niż jedną zmienną objaśniającą, w związku z czym zastosowanie prostej regresji liniowej nie jest możliwe. Rozwiązaniem jest zastosowanie regresji wielokrotnej, której istotą jest objaśnienie zmiennej celu przy wykorzystaniu więcej niż jednej zmiennej objaśniającej. Zmienne te mogą być ciągłe lub jakościowe, jednak w przypadku zmiennych jakościowych konieczne jest zastosowanie sztucznych zmiennych ciągłych do budowy modelu. Sztuczne zmienne są zmiennymi binarnymi, które przyjmują wartość 0 lub 1, w zależności od przynależności danej wartości do kategorii. Kategoria, do której nie jest przypisana żadna zmienna wskaźnikowa to kategoria odniesienia. Regresja wielokrotna jest oparta o te same założenia co regresja liniowa prosta w związku z czym przedstawione założenia regresji prostej zachowują swoją ważność. Przybliżenie zależności między wszystkimi zmiennymi odbywa się przy zastosowaniu płaszczyzny lub hiperpłaszczyzny, a równanie regresji przyjmuje postać:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m \quad (5.24)$$

Interpretacja uzyskanych parametrów równania b_i może być zdefiniowana następująco: jeżeli o jedną jednostkę wzrośnie wartość zmiennej x_i to, przy stałych wartościach po-

zostałych zmiennych, zmiana oszacowanej wartości zmiennej odpowiedzi wynosić będzie b_i . Różna niż w przypadku jednej zmiennej jest interpretacja błędów predykcji. Dla równania o kilku zmiennych resztą nazywamy mierzoną wzdłuż osi pionowej odległość między płaszczyzną (lub hiperpłaszczyzną) regresji a wybranym punktem danych. Korzystając z powyższego, można wyznaczyć wartość reszty dla każdej obserwacji i , analogicznie jak w regresji prostej, obliczyć sumy kwadratów błędów SSE, SST i SSR, a następnie współczynnik determinacji wielokrotnej (będący ilorazem SSR i SST), który dla tego rodzaju regresji oznaczony jest jako R_d^2 i oznacza wyjaśnioną przez zależność liniową część zmienności zmiennej objaśnianej ze zbiorem zmiennych wykorzystanych do jej objaśnienia.

Model regresji wielokrotnej (5.24) jest uzupełniony o dodatkowy składnik ε i przedstawia się następująco:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m + \varepsilon \quad (5.25)$$

Założenia ogólne tego modelu są takie same jak dla regresji prostej, mianowicie dla składnika losowego ε konieczne jest spełnienie: założenia zerowej średniej, założenia stałej wariancji, założenia niezależności i założenia normalności.

Kolejnymi podobieństwami do regresji prostej są metody wnioskowania: test t-Studenta, wyznaczenie przedziałów ufności: dla współczynnika nachylenia i wartości średniej y oraz przedziału predykcji y . Ponadto w regresji wielokrotnej stosuje się test F istotności regresji.

Dla testu t-Studenta statystyka wynosi:

$$t = \frac{b_1}{s_{b_1}} \quad (5.26)$$

a hipoteza zerowa jest prawdziwa, jeżeli rozkład testu t-Studenta ma $n-m-1$ stopni swobody oraz gdy p-wartość statystyki t-Studenta jest mała:

$$p - \text{wartość} = P(|t| > t_{obs}) \quad (5.27)$$

W związku z tym, że test t-Studenta jest przeprowadzany dla każdej ze zmiennych (istnienie liniowej zależności jest określane osobno dla każdego parametru) w regresji wielokrotnej stosowany jest również test F istotności całego modelu regresji. Hipotezy testu F istotności są następujące: hipoteza zerowa, która jest prawdziwa, gdy wszystkie wartości parametrów β_i są równe zero ($\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0$) oraz hipoteza alternatywna,

która jest spełniona, gdy przynajmniej jeden parametr β_i jest różny od zera. Obserwowana wartość statystyki F o $m, n-m-1$ stopniach swobody, wynosi:

$$F_{obs} = \frac{MSR}{MSE} \quad (5.28)$$

Przyjmuje się, że hipoteza zerowa jest odrzucona, gdy p-wartość jest mała:

$$p - \text{wartość} = P(F_{m,n-m-1} > F_{obs}) \quad (5.29)$$

Przedział ufności w regresji wielokrotnej wyznacza się dla każdego ze współczynników nachylenia osobno. Przyjmuje się, że dla statystyki t_{n-m-1} o $n-m-1$ stopniach swobody prawdziwa wartość β_i na $100(1-\alpha)\%$ znajduje się wewnątrz przedziału:

$$p_{un} = b_i \pm t_{n-m-1} \cdot s_{b_1} \quad (5.30)$$

Przedział ufności wartości średniej y przy danych wartościach x_1, x_2, \dots, x_n oraz przedział predykcji y przy danych wartościach x_1, x_2, \dots, x_n wymagają wykonania mnożenia na macierzach.

Oprócz metod budowy i sprawdzania modelu zaczerpniętych z regresji prostej konieczne jest zastosowanie dodatkowych parametrów, związanych ze zwiększoną liczbą danych. Jednym z głównych zagadnień jest określenie, które zmienne powinny zostać wykorzystane do budowy modelu. Istnieje wiele dostępnych metod określających czy uwzględnienie kolejnej zmiennej poprawia jakość tworzonego modelu oraz metod wyboru zmiennych objaśniających. Do pierwszej grupy zaliczyć można metody polegające na sprawdzeniu sekwencyjnej i częściowej sumy kwadratów, do drugiej: metodę dołączania, metodę eliminacji, regresję krokową czy metodę najlepszych podzbiorów. Metoda dołączania polega na wybraniu zmiennej najbardziej skorelowanej ze zmienną celu, a następnie, jeśli zachodzi uzasadnienie, dołączaniu kolejnych zmiennych, których wybór zależy od wyników wartości sekwencyjnej statystyki F. Metoda eliminacji polega na stworzeniu modelu uwzględniając wszystkie zmienne, a następnie po przeprowadzeniu częściowej statystyki F, określeniu istotności i ewentualnej eliminacji zbędnych zmiennych. Regresja krokowa polega na dołączaniu zmiennych, jednak jest rozbudowana o wsteczne sprawdzenie istotności wcześniej dołączonych zmiennych po dodaniu każdej kolejnej zmiennej. Metoda najlepszych podzbiorów jest stosowana przy ograniczonej liczbie zmiennych i polega na budowie wszystkich dostępnych modeli, dla różnej liczby zmiennych, a następnie przedstawieniu najlepszych modeli i wyborze modelu całościowego.

Sprawdzenie istotności uwzględnianych w modelu zmiennych może być przeprowadzone przy zastosowaniu skorygowanego współczynnika determinacji r^2 , który wynosi:

$$\bar{r}^2 = 1 - (1 - r^2) \frac{n-1}{n-m-1} \quad (5.31)$$

W dowolnym modelu regresji każde dodanie dodatkowej zmiennej zwiększa wartość współczynnika r^2 – zastosowanie skorygowanej wartości r^2 pozwala ocenić, czy rzeczywiście dołożenie kolejnej zmiennej jest wartościowe dla prowadzonego oszacowania. W przypadku, gdy dodatkowa zmienna jest nieistotna wartość skorygowanego r^2 maleje. Innym przykładem określenia istotności wykorzystanych zmiennych jest zastosowanie sekwencyjnych sum kwadratów. Określają one rozkład sumy kwadratów odchyłeń regresyjnych. Dla każdego kolejnego parametru uwzględniona jest wartość parametru wprowadzonego wcześniej, dlatego też kolejność zmiennych w modelu ma decydujące znaczenie.

Ponadto, ważnym elementem tworzenia modelu jest sprawdzenie współliniowości danych stanowiących zbiór zmiennych objaśniających. Wystąpienie silnej korelacji między danymi może znacząco zaburzać otrzymywane rezultaty, dlatego też jej sprawdzenie jest niezbędne w przypadku dysponowania dużymi zbiorami danych. Przykładowym sposobem wyznaczenia korelacji między i -tą zmienną a pozostałymi zmiennymi jest obliczenie wskaźnika podbicia wariancji (inaczej: wskaźnika nadmiaru wariancji, czynnika inflacji wariancji, współczynnika VIF):

$$VIF_i = \frac{1}{1 - r_{ri}^2} \quad (5.32)$$

gdzie:

r_{ri}^2 – wartość współczynnika regresji wielokrotnej r^2 dla regresji zmiennej x_i przy traktowaniu tej zmiennej jako zmiennej celu względem pozostałych zmiennych objaśniających

Przyjmuje się, że współliniowość jest umiarkowana dla $VIF \geq 5$ oraz silna dla $VIF \geq 10$. W przypadku stwierdzenia zbyt dużej współliniowości możliwe jest stworzenie komponentów dla skorelowanych zmiennych, lub, w skrajnych przypadkach, usunięcie jednej ze zmiennych z modelu.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe czynniki można stwierdzić, że zastosowanie regresji wielokrotnej daje duże możliwości szacowania wartości zmiennej celu na podstawie posiadanego zbioru danych. Szerokie spektrum dostępnych instrumentów po-

zwala na ciągle doskonalenie tworzonych modeli, umożliwiając stworzenie optymalnego narzędzia do prognozowania.

5.3. Sztuczne sieci neuronowe

Sztuczne sieci neuronowe są coraz częściej wykorzystywane do rozwiązywania zagadnień górniczych. Ich szerokie zastosowanie jest wynikiem wielu czynników, jak np. łatwość użycia (zastosowanie sieci neuronowych nie wymaga dużej wiedzy teoretycznej), zdolność do odwzorowania bardzo złożonych funkcji (również tych o charakterze nieliniowym) czy możliwość zastosowania w przypadku dysponowania zbiorem danych niekompletnych lub zaszumionych.

Podstawą prowadzonych badań nad sztucznymi sieciami neuronowymi były badania struktur ludzkiego mózgu, prowadzone od lat 40. XX w., zwłaszcza procesów zachodzących podczas uczenia się. Pierwsze próby polegały na próbie matematycznego odwzorowania pracy neuronu zwierzęcego, co dało początek tworzeniu sieci neuronowych, których istotą jest stworzony na wzór neuronów występujących w mózgu człowieka, uproszczony neuron, odpowiadający za odbieranie, przetwarzanie i przekazywanie informacji sieci.

5.3.1. Opis sieci neuronowej

Każda sieć neuronowa posiada określoną liczbę neuronów, które obierają, przetwarzają i przekazują sygnały w ramach odpowiednio zaprojektowanej architektury sieci. Elementy składowe opisujące neurony to [38, 78]:

- a) wejścia, którymi są podawane sygnały zewnętrzne (wymuszenia) x_i , o różnej wadze w_i , zależnej od ważności przenoszonej informacji;
- b) wartość progowa neuronu, określająca siłę potrzebną do jego pobudzenia e ;
- c) funkcja aktywacji neuronu f , od której zależy stan wyjścia neuronu, określany na podstawie jego aktywacji;
- d) sygnał wyjściowy (wartość wyjściowa) neuronu y .

Uproszczone zasady działania sieci jest następująca: sygnały wejściowe (dane) są dostarczane do neuronów wejściowych sieci za pomocą połączeń o określonych wagach, w neuronie obliczana jest suma wartości wejściowych (uwzględniając ich wagę), od której odejmowana jest następnie wartość progowa - otrzymany wynik jest nazywany pobudzeniem neuronu, które jest przekształcane za pomocą funkcji aktywacji neuronu

[54]. Wartość obliczona przez funkcję aktywacji jest wartością wyjściową neuronu, która jest podawana na wyjście neuronu. Najprostsze sieci, z pojedynczym neuronem, posiadają pewną liczbę wejść i jedno wyjście. Cały proces począwszy od dostarczenia wektora wejścia x do obliczenia wartości wyjścia y jest nazywany propagacją sygnału/wymuszenia i, przyjmując k jako liczbę wejść neuronu, może być opisany za pomocą wzoru [38]:

$$e = act(x_1, \dots, x_k, w_1, \dots, w_k) \quad (5.33)$$

$$y = f(e) \quad (5.34)$$

w uproszczeniu

$$y = f(x_1, \dots, x_k, w_1, \dots, w_k) \quad (5.35)$$

lub, przyjmując wektory wartości wejściowych i wag jako x i w :

$$y = f(x, w) \quad (5.36)$$

Głównymi parametrami decydującymi o procesach zachodzących w neuronach są funkcja aktywacji i funkcja przynosząca. Dla większości stosowanych funkcji aktywacji pobudzenie neuronu określone jest poprzez obliczenie sumy wartości wejściowych (wektora wejść) przy uwzględnieniu ich wag (wektor wag), od której odejmowana jest wartość progowa:

$$e(x, w) = \sum_{i=1}^k w_i x_i - \theta = w \cdot x - \theta \quad (5.37)$$

Neuron, dla którego wartość powyższego równania jest większa od 0 nazywany jest pobudzonym. Analogicznie wagi większe od zera nazywane są pobudzającymi, a wagi ujemne – hamującymi. W celu ujednoczenia zapisu oraz gwarancji, że próg (wartość progowa) będzie traktowany na równi z innymi parametrami neuronu przyjmuje się uproszczenie w postaci włączenia progu θ do sumy ważonej poprzez stworzenie dodatkowego wejścia o numerze 0, do którego wpływa stały sygnał o wartości $x_0 = -1$ i wadze w_0 równej θ . Równanie (5.37) przyjmuje postać:

$$e(x, w) = \sum_{i=0}^k w_i x_i = w \cdot x \quad (5.38)$$

Funkcja aktywacji f jest w większości przypadków monotoniczna i różniczkowalna w całej swej dziedzinie. Jej charakterystyka odpowiada za możliwości obliczeniowe

neuronu, który może być liniowy lub nieliniowy. Możliwymi, nieliniowymi postaciami funkcji są m.in. funkcja sigmoidalna (5.39) i tangens hiperboliczny (5.40)

$$f(e) = \frac{1}{1 + \exp(-2\beta e)} \quad (5.39)$$

$$f(e) = \operatorname{tgh}(\beta e) \quad (5.40)$$

gdzie:

β – parametr określający stromość funkcji.

Funkcja sigmoidalna jest funkcją unipolarną, a tangens hiperboliczny jest funkcją bipolarną. Zastosowanie znajduje również przeskalowana funkcja (5.41), która jest funkcją biopolarną:

$$f(e) = \frac{2}{1 + \exp(-2\beta e)} - 1 \quad (5.41)$$

Kolejnym ważnym parametrem w tworzeniu sieci neuronowych jest określenie sposobu połączenia neuronów. Wyróżnia się:

- a) sieci bez sprzężeń zwrotnych (jednokierunkowe) – sygnał podany na wejście sieci w skończonym czasie „przechodzi” przez sieć; w strukturze tej obliczenie pobudzenia i wyjścia kolejnych neuronów wymaga przeprowadzenia obliczeń dla neuronów, do których sygnał dotarł wcześniej (neurony ustawione są w jednym kierunku, od wejścia do wyjścia sieci);
- b) sieci ze sprzężeniami zwrotnymi (rekurencyjne) – sygnał podany na wejście sieci może w niej krążyć do momentu uzyskania stanu stabilnego.

Znacznie popularniejsze (z uwagi na skomplikowaną budowę sieci rekurencyjnych) są sieci jednokierunkowe. Budowa takiej sieci jest najczęściej warstwowa – neurony ułożone są w równoległe warstwy i komunikują się na zasadzie „każdy z każdym” w ramach sąsiadujących warstw (nie ma połączeń pomiędzy neuronami tej samej warstwy). Pierwszą warstwę (warstwa wejściowa) tworzą neurony wejściowe, które przechwytyją sygnały wejściowe, normalizują je i przekazują do kolejnych warstw sieci. Kolejne są warstwy ukryte, gdzie następuje transformacja sygnałów i przekazanie ich do ostatniej warstwy – warstwy wyjściowej, prezentującej końcowy wynik działania sieci.

5.3.2. Uczenie sieci

Po ustaleniu architektury sieci tj. określeniu liczby warstw i połączeń między neuronami następuje proces jej uczenia. Algorytm uczenia sieci polega na modyfikacji wag poszczególnych neuronów, bez wprowadzania zmian w jej architekturze. W takim przypadku, uczenie sieci prowadzone na zbiorze uczącym D jest problemem optymalizacji (minimalizacji) pewnej funkcji błędu E w ciągłej przestrzeni wag:

$$W_{opt} = \arg \min_w E(W, D) \quad (5.42)$$

gdzie

W_{opt} – macierz optymalnych wartości wag sieci,

E – funkcja błędu,

W – macierz wag sieci,

D – zbiór uczący.

Jedną z wykorzystywanych funkcji błędu (tj. funkcji określającej rozbieżność pomiędzy stanem rzeczywistym a pożądanym) jest błąd średniokwadratowy liczony dla wszystkich wyjść sieci i wszystkich przykładów ze zbioru uczącego:

$$E_{MSE} = \frac{1}{|D|} \sum_{x \in D} \left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [y_i(x) - z_i(x)]^2 \right) \quad (5.43)$$

gdzie

k – liczba wyjść sieci,

x – przykład ze zbioru uczącego D ,

$y_i(x)$ – wartość obliczana przez sieć na i -tym wyjściu dla przykładu x ,

$z_i(x)$ – wartość pożądana na i -tym wyjściu sieci dla przykładu x .

Powyższe rozwiązanie może sprawiać trudności, wynikające z braku dokładnego rozpoznania danych uczących D , a co z tym idzie niemożnością rozpoznania charakterystyki funkcji E , która przeważnie posiada wiele minimów lokalnych, które uniemożliwiają znalezienie optymalnej macierzy wag W_{opt} .

W związku z powyższym dla neuronów liniowych, które mają zastosowanie w przypadku problemów liniowo separowalnych (czyli takich, dla których istnieje prosta mogąca skutecznie oddzielić od siebie klasy decyzyjne), zaproponowano metodę polegającą na uczeniu nadzorowanym pojedynczego neuronu liniowego, której zadaniem jest nauczenie neuronu realizacji danego odwzorowania:

$$z = F(x) \quad (5.44)$$

gdzie:

z – pożądana wartość wyjścia neuronu,

x – wektor zmiennych niezależnych,

F – nieznana postać odwzorowania.

Odwzorowanie jest zadane przez zbiór uczący D , czyli zbiór n par

$$\langle x^j, z^j = F(x^j) \rangle, \quad j = 1, \dots, n \quad (5.45)$$

Błąd popełniony przez neuron jest różnicą między wartością oczekiwaną z a wartością otrzymaną y przy prezentacji j -tego przykładu:

$$\delta^j = z^j - y^j \quad (5.46)$$

Algorytm ma na celu zminimalizować ten błąd dla wszystkich przykładów ze zbioru D . Popełnione przez neuron dla każdego z przykładów błędy δ^j zestawia się w jedną wielkość za pomocą błędu średniokwadratowego, który dla pojedynczego neuronu wynosi:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (z^j - y^j)^2 = \sum_{j=1}^n E^j \quad (5.47)$$

gdzie:

$$E^j = \frac{1}{2} (\delta^j)^2 \quad (5.48)$$

Do minimalizacji tego błędu wykorzystuje się algorytm największego spadku gradientu, nazywany regułą delta, który krokowo modyfikuje parametry zgodnie z kierunkiem lokalnych zmian funkcji (wyznacza wielkość, o jaką ma być zmodyfikowana waga tzw. poprawkę wagi).

$$\Delta w_i^j = -\eta \frac{\partial E^j}{\partial w_i} \quad (5.49)$$

gdzie:

η – prędkość uczenia (współczynnik korekcji), przyjmowana zwykle z zakresu od 0,5 do 0,9; jej optymalne określenie pozwala na uniknięcie spowolnienia procesu uczenia uniemożliwiającego wydobycie konfiguracji sieci z lokalnego minimum w przypadku zbyt małej prędkości oraz odwrotnie, uniknięcie problemu braku zbieżności w przypadku pomijania minimów funkcji błędu przy doborze zbyt dużej prędkości.

Najlepsze rozwiązania uzyskuje się, przyjmując prędkość uczenia jako parametr dynamiczny, o wysokiej wartości początkowej, zmniejszającej się w kolejnych epokach. Jednym z zaproponowanych rozwiązań jest przyjęcie do określenia prędkości uczenia funkcji ilorazowej [38]:

$$\eta^t = \frac{\eta^0}{1 + \frac{t}{r_r}} \quad (5.50)$$

gdzie:

r_r – stała determinująca prędkość redukcji η

Równanie (5.49) wyznacza poprawkę i -tej wagi neuronu na podstawie błędu E^j popełnianego przez neuron podczas prezentacji j -tego przykładu.

Z uwagi na brak znajomości przebiegu funkcji E , obliczenie poprawki Δw_i musi zostać uproszczone. Odbywa się to za pomocą przedstawienia pochodnej cząstkowej po w_i złożonej funkcji E^j jako iloczynu dwóch pochodnych:

$$\frac{\partial E^j}{\partial w_i} = \frac{\partial E^j}{\partial y^j} \frac{\partial y^j}{\partial w_i} \quad (5.51)$$

gdzie:

$$\frac{\partial E^j}{\partial y^j} = -(z^j - y^j) = -\delta^j \quad (5.52)$$

a

$$\frac{\partial y^j}{\partial w_i} = x_i^j \quad (5.53)$$

co wstawiając do równania (5.49) daje:

$$\Delta w_i^j = \eta \delta^j x_i^j \quad (5.54)$$

Poprawka Δw_i dotyczy konkretnej wagi w_i . Pełny krok uczenia wymaga obliczenia poprawek dla wszystkich wag danego neuronu. Z uwagi na iteracyjny charakter procesu uczenia neuronu wskazane jest przeprowadzenie więcej niż jednego kroku, co wymaga wielokrotnego prezentowania sieci przykładów ze zbioru uczącego. Jeden taki cykl, w którym zaprezentowane zostaną wszystkie przykłady ze zbioru uczącego nazywany jest epoką. Po każdej epoce następuje proces sprawdzenia warunków zatrzymania np. sprawdzenie narzuconej na błąd średniokwadratowy E wartości progowej E_{stop} lub sprawdzenie czy przeprowadzono już określoną maksymalną liczbę epok.

Dla neuronów nieliniowych, stosowanych w przypadku problemów liniowo nieseparowalnych, również stosuje się regułę spadku gradientu:

$$\frac{\partial E^j}{\partial w_i} = \frac{\partial E^j}{\partial y^j} \frac{\partial y^j}{\partial w_i} \quad (5.55)$$

gdzie:

$$\frac{\partial E^j}{\partial y_i} = -(z^j - y^j) = -\delta^j \quad (5.56)$$

a z uwagi na nieliniowość funkcji aktywacji, równanie (5.53) zmienia postać:

$$\frac{\partial y^j}{\partial w_i} = \frac{\partial y^j}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial w_i} \quad (5.57)$$

$$\frac{\partial e}{\partial w_i} = x_i^j \quad (5.58)$$

Korzystając z tangensa hiperbolicznego lub sigmoidalnej funkcji aktywacji pochodna funkcji wewnętrznej może być wyrażona za pomocą wartości funkcji aktywacji, co pozwala przyjąć:

$$\frac{\partial y^j}{\partial e} = y^j(1 - y^j) \quad (5.59)$$

i ostatecznie:

$$\Delta w_i^j = \eta \delta^j x_i^j y^j (1 - y^j) \quad (5.60)$$

Zastosowana powyżej reguła delta odnosi się do określenia błędu i poprawki wagi tylko dla neuronów w warstwie wyjściowej. W celu oszacowania błędu j-tego przykładu ze zbioru uczącego w warstwie ukrytej należy zastosować poniższe równanie, które wraz z regułą delta tworzy algorytm wstecznej propagacji błędu [38]:

$$\delta_{(k,l)}^j = \sum_{p=1}^{N_{l+1}} w_{k(p,l+1)}^j \delta_{(p,l+1)}^j \quad (5.61)$$

gdzie:

(k, l) – wielkość związana z k-tym neuronem w l-tej warstwie,

N_{l+1} – liczba neuronów w l+1-tej warstwie,

co oznacza, że suma błędów, ważonych wagami łączącymi warstwę l-tą z warstwą l+1, popelnionych przez neurony z warstwy l+1-tej stanowi błąd neuronu w l-tej warstwie sieci.

Zaletą stosowania wstecznej propagacji błędu jest możliwość douczenia sieci przy wykorzystaniu nowych przykładów. Wadą jest zależność wyniku od kolejności prezentowania przykładów uczących oraz złożoność obliczeniowa.

W celu udoskonalenia powyższego algorytmu stosuje się różne jego wzbogacenia, jak np. kumulacyjną aktualizację wag, która eliminuje zależność wyniku od kolejności prezentowania przykładów uczących. Polega ona na propagacji wstecznej błędów, jednak bez natychmiastowego zastosowania obliczonych poprawek do wag. Poprawki te są kumulowane i stosowane do wag sieci dopiero po zakończeniu epoki. Sposób ten, pomimo swoich zalet powoduje spowolnienie prędkości zbieżności uczenia, dlatego też zaproponowano inne rozwiązanie, polegające na wprowadzeniu do wzoru definiującego poprawkę wagi tzw. członu bezwładności:

$$\Delta w_i^{[t]} = -(1 - \alpha)\eta \frac{\partial E^{[t]}}{\partial w_i} + \alpha \Delta w_i^{[t-1]} \quad (5.62)$$

gdzie:

$\alpha \in (0,1)$ – współczynnik bezwładności,

indeks $^{[t]}$ – wielkość związana z t-tym krokiem uczenia.

Wprowadzenie członu bezwładności powoduje wpływ modyfikacji wagi z kroku poprzedniego na wartość bieżącej modyfikacji wagi. Im większa wartość α tym bardziej powyższy algorytm jest stabilny.

Kolejnym problemem, wynikającym z braku znajomości zadanej funkcji klasyfikującej, a w konsekwencji zastosowaniem dla rozwiązania problemu określonego, reprezentatywnego zbioru uczącego D, jest zbyt duże dopasowanie sieci do danego zbioru uczącego, które uniemożliwia skuteczne wyjaśnienie problemu dla danych spoza zbioru uczącego. Zjawisko to nazywane jest przeuczeniem sieci neuronowej. Wyróżnia się dwie główne przyczyny przeuczenia sieci: za bardzo rozbudowana architektura sieci oraz za długi proces uczenia sieci.

W pierwszym przypadku sieć posiada zbyt dużą liczbę warstw i/lub zbyt dużą liczbę neuronów w warstwie. Dotychczas nie wypracowano sposobów na określenie optymalnej liczby warstw i neuronów, jednak doświadczenia wykazały, że dla sieci nieliniowych nie jest uzasadnione przyjmowanie liczby warstw większej niż 4. W tym miejscu należy podkreślić, że stworzenie zbyt małej sieci również stanowi zagrożenie złego dopasowania, ze względu na brak możliwości dobrej aproksymacji przy małej liczbie

stopni swobody. Jednak w wielu przypadkach już 2 warstwy ukryte pozwalają na stworzenie optymalnej sieci.

W drugim przypadku, po początkowym spadku wartości błędu E , zarówno dla zbioru uczącego, jak i dla zbioru testowego (dla sieci testowanej po każdej epoce), błąd ten wciąż maleje dla zbioru uczącego, ale równocześnie dochodzi do zwiększenia błędu dla zbioru testowego, co oznacza, że sieć zaczyna się zbyt dopasowywać do zbioru uczącego, tracąc zdolność generalizowania rozwiązania problemu.

W celu wyeliminowania procesu przeuczenia stosuje się różne metody, zwane warunkami zatrzymania. Najprostszym jest ograniczenie liczby epok lub czasu procesora, należy jednak zwrócić uwagę, że z powodu trudności w oszacowaniu złożoności problemu, może dojść do zbyt szybkiego lub zbyt późnego zatrzymania procesu uczenia. Kolejnym przykładem jest weryfikacja wartości błędu E dla zbioru uczącego D ($E(D)$), co jednak może doprowadzić do zbyt szybkiego zatrzymania procesu uczenia w uwagi na zbyt optymistyczne szacowanie wartości błędu $E(D)$. Nieco bardziej rozbudowanym warunkiem zatrzymania jest wykorzystanie zbioru testowego T , który jest wydzielony ze zbioru uczącego i służy wyłącznie do oszacowania błędu $E(T)$ popełnianego na przykładach spoza zbioru uczącego D . Główną wadą tego rozwiązania jest uszczuplenie zbioru uczącego, stąd też nie jest ono polecane dla rozwiązywania problemów, dla których dysponujemy małym zbiorem danych. Wykorzystanie wartości oszacowania błędu E - zarówno $E(D)$, jak i $E(T)$ - może zostać zastosowane do określenia statycznego lub dynamicznego warunku zatrzymania. Przy warunku statycznym proces uczenia zostaje zatrzymany po osiągnięciu wartości błędu E mniejszej niż określona przy projektowaniu systemu wartość E_{max} . Warunek dynamiczny polega na kontroli lokalnych zmian przebiegu błędu E i zatrzymaniu procesu uczenia po wykryciu lokalnego wzrostu E .

Po zakończeniu nauki sieci następuje interpretacja uzyskanych wyników. Zaproponowana przez sieć wartość wyjścia y k -tego neuronu w warstwie wyjściowej jest miarą stopnia przynależności przykładu do klasy K_k i przyjmuje wartości $y \in (0,1)$ dla funkcji sigmoidalnej oraz $y \in (-1,1)$ dla tangensa hiperbolicznego. Im bliżej 1 tym bardziej prawdopodobna jest przynależność przykładu do klasy K_k . W sieciach klasyfikacyjnych stosowane są różne metody interpretacji. Do najpopularniejszych należą:

- a) metoda argmax , w której przykład jest klasyfikowany do klasy decyzyjnej odnoszącej się do neuronu o maksymalnym stanie wyjścia,
- b) metoda accept , w której przykład jest klasyfikowany do klasy decyzyjnej odnoszącej się do neuronu, dla którego $y > y_{acc}$,

gdzie:

y_{acc} – próg akceptacji (zdefiniowany przez użytkownika);

W przypadku nie spełnienia warunku przez żaden neuron lub w przypadku, gdy warunek jest spełniony przez więcej niż jeden neuron dochodzi do sytuacji zwanej brakiem decyzji, czyli przykład nie zostaje niezakwalifikowany do żadnej z klas,

- c) metoda accept-reject, w której przykład jest klasyfikowany podobnie jak w przypadku metody accept ($y > y_{acc}$), z dodatkowym warunkiem tj. $y_{rej} \leq y_{acc}$, co oznacza, że przykład może zostać zaklasyfikowany do danej klasy tylko, jeżeli występuje wyłącznie jeden neuron, dla którego $y \geq y_{acc}$ oraz dla wszystkich pozostałych $y < y_{rej}$.

Powyższe metody interpretacji umożliwiają dostosowanie sieci do wymagań rozwiązywanego zagadnienia, zwiększając możliwości ich zastosowania.

6. Modele zastosowane do opisu pola przyspieszeń drgań gruntu

Do wielkości opisujących intensywność drgań gruntu należą prędkości i przyspieszenia drgań, które charakteryzują wpływ występujących zjawisk sejsmicznych indukowanych prowadzoną działalnością górnictwem na powierzchni terenu. Badania drgań gruntu mogą być prowadzone zarówno w oparciu o wartości maksymalnych amplitud prędkości, jak i przyspieszeń drgań. W posiadanych zbiorach danych z obu rejonów dostępne były zarejestrowane wartości maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań w związku z czym w analizach przyjęto ten parametr jako zmienną objaśnianą. Należy jednak podkreślić, że wybór jednego z podanych parametrów jako podstawy do prowadzenia badań nie zmniejsza ogólności rozważań.

6.1. Modele wykorzystujące metodę analizy regresji

Modele regresyjne wykorzystywane do analizy zagadnień drgań gruntu są z powodzeniem stosowane w Polsce i na świecie. Model zakładający zależność parametrów drgań od energii wstrząsu (zwiększanie się wartości przyspieszeń i prędkości drgań wraz ze wzrostem energii) i odległości od hipocentrum wstrząsu (zmniejszanie się wartości prędkości i przyspieszeń drgań wraz ze wzrostem odległości spowodowane tłumieniem i rozpraszaniem), zaproponowany w [29] był przedmiotem analizy w wielu publikacjach m.in. [5, 30, 43]. W pracy [45] przedstawiono możliwości i ograniczenia stosowania relacji tłumienia w badaniach dotyczących prognozowania drgań powierzchni gruntu. Przedstawiono niebezpieczeństwa wynikające z przyjęcia niewłaściwych założeń lub niewłaściwej interpretacji otrzymanych wyników, wykazując jednak, że prawidłowo zaprojektowany model bazujący na relacji tłumienia może być z powodzeniem zastosowany do lokalnej prognozy parametrów drgań gruntu.

Na podstawie dotychczasowych badań przyjęto założenie, że uwzględnienie kierunkowości tłumienia fal sejsmicznych pozwala na uzyskanie bardziej precyzyjnego opisu parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu. Zjawisko to może być powodowane przez występujące na danym obszarze zaburzenia tektoniczne.

W prowadzonych analizach, dla wykazania istnienia zależności między występującymi zaburzeniami tektonicznymi a rozkładem pola maksymalnych amplitud wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń drgań gruntu, wykorzystano różne posta-

cie relacji tłumienia. Opracowano trzy modele obliczeniowe, które przetestowano z wykorzystaniem posiadanych zbiorów obserwacji parametrów drgań gruntu z wybranych rejonów. W rezultacie przeprowadzonych badań możliwe było stworzenie modeli regresji, wiążących energię sejsmiczną wstrząsów i odległości hipocentralne (epicentralne) z zarejestrowanymi wartościami przyspieszeń drgań gruntu.

W pierwszym modelu, w celu opisu pola przyspieszeń drgań przy wykorzystaniu klasycznego równania regresji, zastosowano zmodyfikowaną, powszechnie stosowaną relację tłumienia, która, pomimo swojej prostoty, ma uzasadnienie fizyczne [49]. Wprowadzona modyfikacja została zastosowana we wszystkich przyjętych modelach i polegała na pominięciu parametru związanego z wartością energii wstrząsu, z uwagi na określanie amplitud wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń drgań osobno dla każdego z rozpatrywanych wstrząsów. Model ten zakłada, że górotwór jest ośrodkiem izotropowym, w którym tłumienie i rozpraszanie nie są zależne od kierunku. Logarytm maksymalnej amplitudy wypadkowych poziomych składowych przyspieszeń drgań jest dla tego modelu określony równaniem:

$$\log a = \beta_0 + \beta_1 R_h + \beta_2 \log R_h + \varepsilon \quad (6.1)$$

gdzie:

a - maksymalna amplituda przyspieszeń drgań, m/s^2 ;

R_h – odległość hipocentralna wstrząsu od stanowiska pomiarowego, m;

$$R_h = \sqrt{R_e^2 + h^2} \quad (6.2)$$

R_e - odległość epicentralna wstrząsu od stanowiska pomiarowego, m;

h - głębokość ogniska wstrząsu, m;

β_i - parametry regresji,

ε – składnik losowy.

Drugi model zakłada, że górotwór jest ośrodkiem anizotropowym, w którym zarówno tłumienie, jak i rozpraszanie są zależne od kierunku. Uwzględnienie kierunkowości rozchodzenia się drgań w górotworze (anizotropii propagacji fal) jest realizowane poprzez przyjęcie założenia, że przemieszczające się od źródła czoło fali ma kształt elipsoidy obrotowej, która jest obrócona wokół pionowej osi z o kąt q , co zostało wyrażone w równaniu [2]:

$$\log a = \beta_0 + \beta_1 R_h^* + \beta_2 \log R_h^* + \varepsilon \quad (6.3)$$

gdzie:

R_h^* - odległość zastępcza wstrząsu od stanowiska (po uwzględnieniu anizotropii),

$$R_h^* = \sqrt{l^2 + m^2 + n^2} \quad (6.4)$$

$$l = p((x_w - x_{st})\cos q + (y_w - y_{st})\sin q) \quad (6.5)$$

$$m = (x_{st} - x_w)\sin q + (y_w - y_{st})\cos q \quad (6.6)$$

$$n = r(h - z_{st}) \quad (6.7)$$

x_w, y_w, h – współrzędne wstrząsu,

x_{st}, y_{st}, z_{st} – współrzędne stanowiska pomiarowego,

p, q, r - parametry, $p, r > 0, r \in \langle 0, 2\pi \rangle$.

W równaniu (6.4) skorzystano z zależności stosowanych do opisu transformacji układu współrzędnych:

- zmiana skali wzdłuż osi x i z :

$$x_n = p x_{st}$$

$$y_n = y_{st}$$

$$z_n = r z_{st}$$

- obrót wokół osi z o kąt q :

$$x_n = x \cos q + y \sin q$$

$$y_n = -x \sin q + y \cos q$$

$$z_n = z_{st}$$

gdzie:

x_{st}, y_{st}, z_{st} – współrzędne w pierwotnym układzie współrzędnych,

x_n, y_n, z_n – współrzędne w nowym układzie współrzędnych,

p, r – skala wzdłuż osi x i z ,

q – kąt obrotu układu współrzędnych.

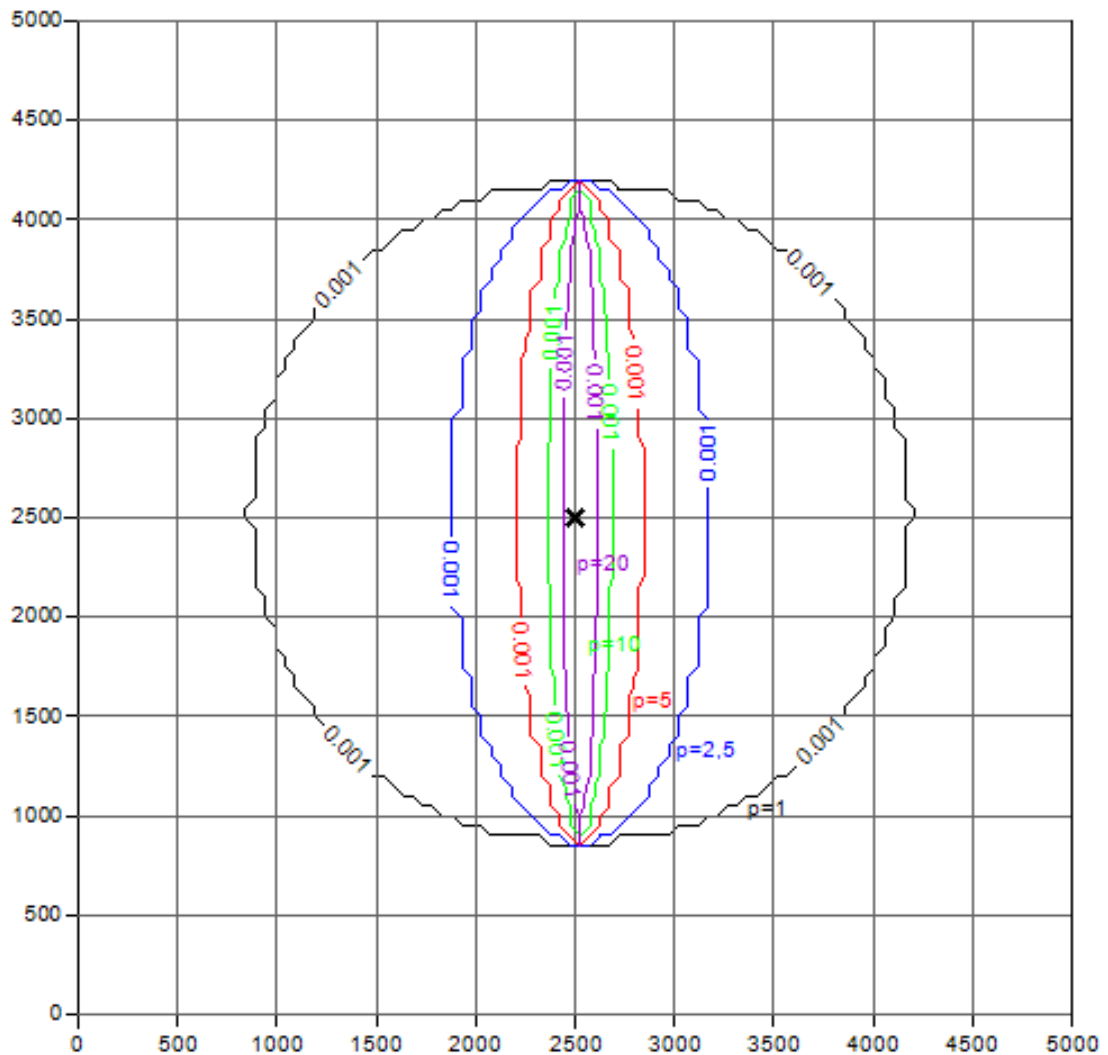
Dla zobrazowania wpływu parametrów p i q na kierunkowość rozchodzenia się drgań wyznaczono rozkład pola przyspieszeń dla różnych wartości p i q , przy niezmiennych pozostałych parametrach. Wykorzystano równanie (6.3), dla którego przyjęto następujące wartości parametrów:

$$\beta_0 = 0,2$$

$$\beta_1 = -1e-10$$

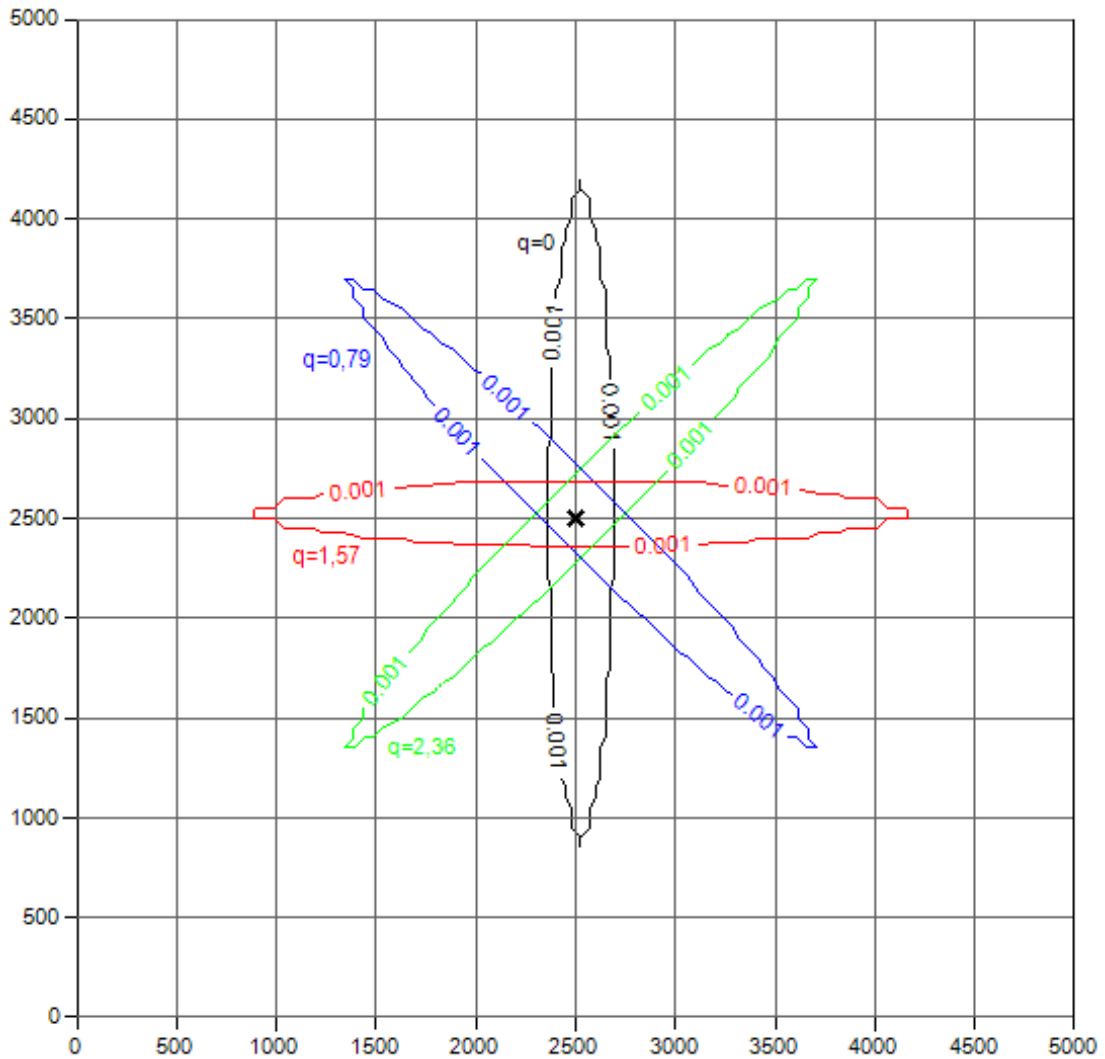
$$\beta_2 = -1$$

Rozkład pola przyspieszeń dla różnych wartości parametru p przedstawiono na rys. 6.1, a rozkład pola przyspieszeń dla różnych wartości parametru q na rys. 6.2.



Rys. 6.1. Wpływu wartości parametru p na rozkład pola przyspieszeń

Dla zobrazowania zmian wybrano izolinię o wartości $0,001 \text{ m/s}^2$. Przyjęto następujące wartości parametru p : $p = 1$; $p = 2,5$; $p = 5$; $p = 10$; $p = 20$, wartość parametru q w każdym przypadku wynosiła 0 .



Rys. 6.2. Wpływu wartości parametru q na rozkład pola przyspieszeń

Dla zobrazowania zmian wybrano izolinię o wartości $0,001 \text{ m/s}^2$. Przyjęto następujące wartości parametru q : $q = 0$; $q = 0,79$; $q = 1,57$; $q = 2,36$, wartość parametru p w każdym przypadku wynosiła 10.

W trzecim modelu przyjęto założenie, że tłumienie jest zależne od kierunku rozchodzenia się drgań, a rozpraszanie zachodzi niezależnie od kierunku. Model ten wyraża się w postaci równania:

$$\log a = \beta_0 + \beta_1 R_h^* + \beta_2 \log R_h + \varepsilon \quad (6.8)$$

Analiza polegała na oszacowaniu maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań gruntu i została przeprowadzona dla każdego zdarzenia oddzielnie, w związku z czym na tym etapie badań mamy do czynienia raczej z aproksymacją danych pomiarowych niż z analizą regresji. Wyznaczone parametry mogą być wykorzystane do opisu pola przyspieszeń drgań wywołanych rozpatrywanym zdarzeniem, natomiast prognoza dla no-

wych danych przy wykorzystaniu takiego modelu może być przeprowadzona tylko w sytuacji wystąpieniu wstrząsu o tych samych lub zbliżonych wartościach energii sejsmicznej i podobnej lokalizacji hipocentrum.

W związku z powyższym, w kolejnym etapie badań podjęto próbę stworzenia zależności lokalnych, uwzględniających istnienie związku między występującymi w rejonie zaburzeniami tektonicznymi a rozkładem maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań. W tym celu przeanalizowano wyniki aproksymacji i dokonano klasyfikacji wszystkich zdarzeń w zależności od kierunkowości tłumienia i rozpraszania drgań, a następnie, za pomocą analizy regresji, wyznaczono parametry równań dla wstrząsów wykazujących kierunkowość rozchodzenia się drgań zgodną z przebiegiem wybranych zaburzeń w każdym z rejonów.

6.2. Model wykorzystujący sieci neuronowe

Sztuczne sieci neuronowe, będące stosunkowo nową metodą eksploracji danych, nie są tak szeroko stosowane do oceny parametrów drgań gruntu jak modele regresyjne, jednak, z uwagi na łatwość ich stosowania oraz coraz większą dostępność oprogramowania, stają się popularnym narzędziem wykorzystywanym w zagadnieniach sejsmologii górniczej. Wśród publikacji, w których za pomocą sieci neuronowych podjęto próby rozwiązania zróżnicowanych zagadnień wykazując tym samym szerokie możliwości ich zastosowania wyróżnić można [3, 39, 40, 77].

Prowadząc badania sprawdzono możliwość poprawy opisu pola przyspieszeń drgań gruntu poprzez zastosowanie sztucznych sieci neuronowych.

W tym celu, bazując na danych pochodzących z obu rozpatrywanych poligonów badawczych (energii wstrząsu oraz odległości epicentralnej wstrząsu od stanowiska pomiarowego) oraz wykorzystując parametry wiążące zdarzenia z uskokami występującymi w bliskim sąsiedztwie, przeprowadzono ocenę oszacowania wartości przyspieszeń drgań gruntu wyznaczonych za pomocą sieci o zadanych parametrach i porównano otrzymane wyniki z wynikami uzyskanymi za pomocą analizy regresji. Ocenie tej poddano zbiory zdarzeń, w których stwierdzono występowanie minimum 20 wstrząsów o rozkładzie pola przyspieszeń drgań gruntu zgodnym z przebiegiem uskoku w bliskim sąsiedztwie. Analiza została przeprowadzona oddzielnie dla każdego ze zbiorów.

Następnie sprawdzono, czy wyznaczone parametry modelu anizotropowego tj. kąt obrotu wokół osi z oraz przemieszczenie wzdłuż osi x, mają wpływ na wyniki pro-

wadzonych analiz rozkładu pola przyspieszeń drgań gruntu. Wykorzystując wyniki uzyskane w rezultacie badań prowadzonych za pomocą analizy regresji stworzono dwa modele. W pierwszym wykorzystano wyłącznie energię wstrząsu oraz odległość epicentralną wstrząsu od stanowiska pomiarowego, w drugim, oprócz danych pochodzących z aparatury pomiarowej obu rejonów, uwzględniono również parametry odpowiadające za kierunkowość tłumienia drgań. W tym przypadku analiza została przeprowadzona dla jednego zbioru danych, składającego się ze wszystkich wstrząsów, dla których stwierdzono dopasowanie rozkładu pola przyspieszeń do uskoku w bliskim sąsiedztwie. W każdej zastosowanej sieci neuronowej przyjęto takie same założenia: sieć MLP z minimalnie 1 i maksymalnie 11 neuronami w warstwie ukrytej, o wszystkich dostępnych w wykorzystywanym programie Statistica funkcjach aktywacji (liniowa, logistyczna, tangens hiperboliczny, wykładnicza i sinus). Zbiór rejestracji podzielono na podzbiory, w których przyjęto, że 70% rejestracji to zbiór uczący, 15% - zbiór testowy i 15% - walidacyjny.

7. Charakterystyka rejonów badań

Do badań wybrano dwa rejonu z Górnos Śląskiego Zagłębia Węglowego, w których prowadzona jest eksploatacja węgla kamiennego systemem ścianowym. W obu rejonach prowadzona jest obserwacja wpływów tej eksploatacji na powierzchnię terenu m.in. poprzez rejestrację parametrów drgań gruntu na powierzchni. W kolejnych rozdziałach pracy przedstawiono charakterystykę wybranych rejonów oraz główne uskoki, których występowanie zostało udokumentowane na mapach górniczych eksploatowanych pokładów.

7.1. Rejon 1

Wydobycie w pierwszym z analizowanych rejonów prowadzone jest w trzech obszarach górniczych znajdujących się w południowo – zachodniej części województwa śląskiego. Eksploatowane pokłady zalegają w obrębie płaskowyżu rybnickiego, który jest częścią kotliny oświęcimsko – raciborskiej na Wyżynie Śląskiej. Wydobycie utrzymywane jest poziomie około 9 500 ton/dobę przy prowadzeniu eksploatacji średnio pięcioma ścianami. Obszar górniczy podzielony jest na dwie partie: południową i północną, partia północna dodatkowo podzielona jest na rejonu. Do występujących zagrożeń naturalnych zalicza się: zagrożenie tąpnięciami, zagrożenie wodne, zagrożenie wybuchem pyłu węglowego, zagrożenie pożarowe, zagrożenie metanowe, zagrożenie wyrzutami metanu i skał oraz zagrożenie radiacyjne.

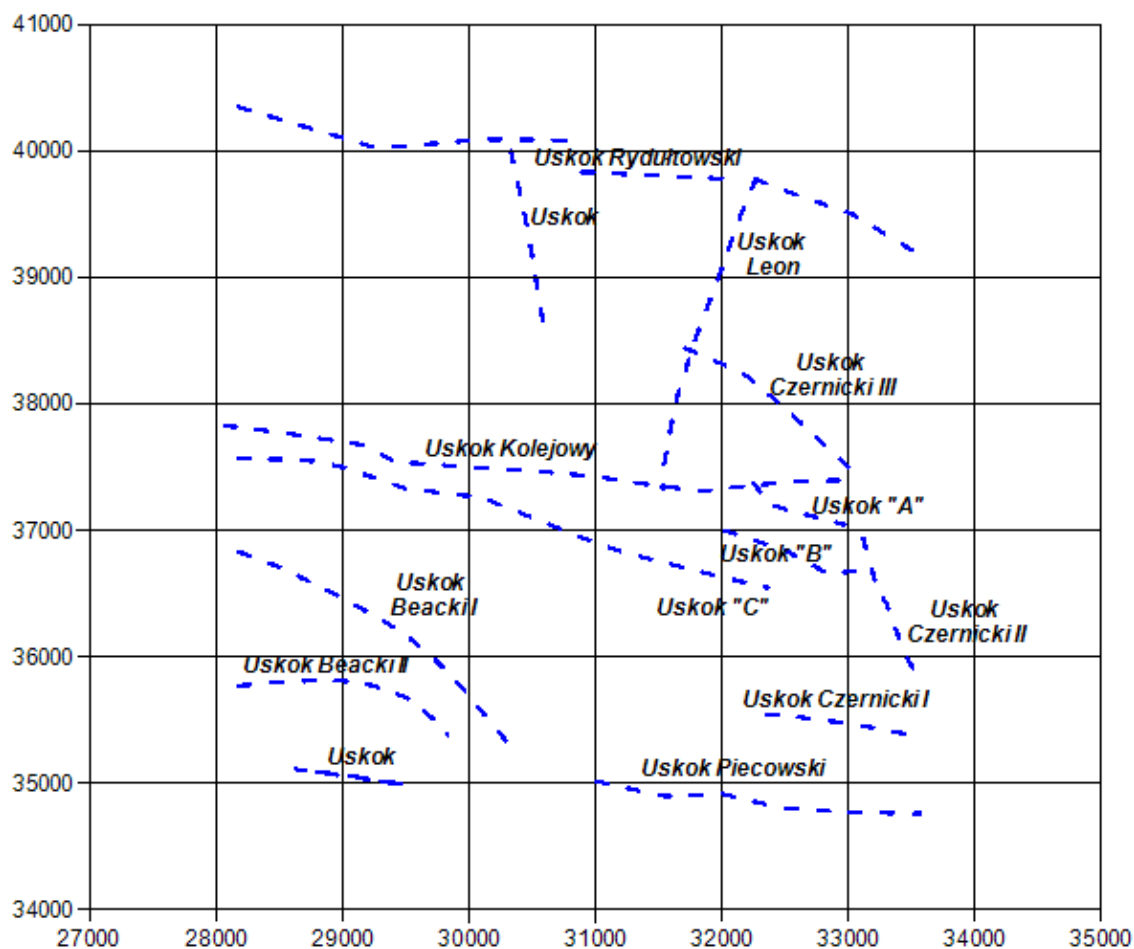
Wysokość terenu w rejonie 1 wynosi od +225 m do +335 m n.p.m. Powierzchnia ma zróżnicowaną morfologię, występują liczne pagórki i doliny. Cieki powierzchniowe i rowy odprowadzające wody dołowe spływają do potoku Nacyna. Dominującym kierunkiem spływu wód powierzchniowych jest kierunek północny. Występują 62 powierzchniowe zbiorniki wodne, głównie w zagłębieniach terenu. Teren obszaru górniczego jest silnie zurbanizowany, o zróżnicowanej zabudowie. Pola uprawne, nieużytki i lasy zajmują jego niewielką część. Ponadto wyróżnić można: obiekty typu punktowego takie jak budynki mieszkaniowe, obiekty przemysłowe, budynki użyteczności publicznej i szyby kopalniane, obiekty typu liniowego, do których zaliczane są obiekty dobrze rozwiniętej sieci komunikacyjnej i komunalnej oraz obiekty powierzchniowe, jak np. zbiornik wody pitnej czy osadniki mułowe.

W budowie geologicznej obszaru można wyróżnić następujące formacje:

- 1) utwory czwartorzędowe: holocenijskie (głównie drobno- i średnioziarniste piaski, a także występujące w okolicach rzek mady) i plejstocenijskie (głównie gliny morenowe, piaski i żwiry); zalegają nieregularnie, miąższość wynosi od 0 do 50 m;
- 2) utwory trzeciorzędowe: osady mioceńskie (iły pylaste, piaszczyste i margliste, piaski, gipsy, lokalnie siarka); miąższość waha się od 0 do nawet 800 m;
- 3) utwory triasowe (pstre piaskowce, drobno- i średnioziarniste iłowce); miąższość wynosi od 0 do 70 m,
- 4) warstwy karbonu produktywnego.

Pierwsze trzy z wyżej wymienionych tworzą nadkład węglonośnych warstw karbońskich, którego miąższość waha się od 0 do 500 m. Warstwy węglonośne to utwory karbonu produktywnego: warstwy siodłowe (pokłady 505, 506, 507 i 508) i warstwy brzeżne, do których zaliczamy warstwy porębskie (pokłady od 607 do 630) oraz warstwy jakłowieckie (pokłady 703/1, 706, 707/1-2, 713/1-2) [32].

Dla każdej projektowanej eksploatacji kopalnia przeprowadza badania skał stropowych i spągowych, w których, oprócz podstawowych właściwości skał otaczających, określane jest położenie wstrząsogennych ław piaskowcowych w stosunku do pokładów. Skały towarzyszące pokładom węgla zaliczane są do iłowców, mułowców i piaskowców. Stropy pokładów stanowią głównie iłowce i mułowce, rzadziej piaskowce. Spągi przeważnie zbudowane są z piaskowców i mułowców. Wszystkie warstwy karbońskie mają zmienne zapadanie i rozciągłość warstw, których kąt nachylenia waha się od 0° do 25°, a rozciągłość przebiega w kierunku od południkowego do równoleżnikowego. Występują liczne uskoki, które zostały rozpoznane głównie w wyniku prowadzenia robót udostępniających i przygotowawczych. Uskoki te przebiegają w różnych kierunkach, zwłaszcza w kierunku południkowym i równoleżnikowym. Nachylenie płaszczyzn uskokowych wynosi od 45° do 85°, a ich zrzuty osiągają wartości nawet kilkuset metrów. Główne uskoki występujące w rejonie 1 przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Główne uskoki występujące w rejonie 1 (rzut na płaszczyznę pokładów 706 lub 713_{1/2})

7.2. Rejon 2

Rejon 2 znajduje się w południowo – wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, w rejonie centralnej części Niecki Głównej GZW. Eksploatowane złożę to złożę pokładowe, z zalegającymi monoklinalnie pokładami. Ze względu na urozmaiconą tektonikę obszar górniczy podzielony jest na 21 partii złoża (bloków tektonicznych), w których prowadzone są roboty górnicze. Stwierdzone występujące zagrożenia naturalne to: zagrożenie tąpnięciami, zagrożenie wodne i zagrożenie pożarowe. Nie występują natomiast zagrożenia: metanowe, wybuchem pyłu węglowego, wyrzutami gazów i skał oraz radiacyjne. Pod względem skomplikowania budowy, grubości i zmienności zalegania pokładów zostało zaliczone do II grupy złożów.

W przeciwieństwie do rejonu 1 obszar górniczy rejonu 2 nie jest silnie zróżnicowany morfologicznie. Różnice wysokości terenu wynoszą kilkanaście metrów. Podobnie jak w rejonie 1 na powierzchni terenu wyróżnić można obiekty typu punktowe-

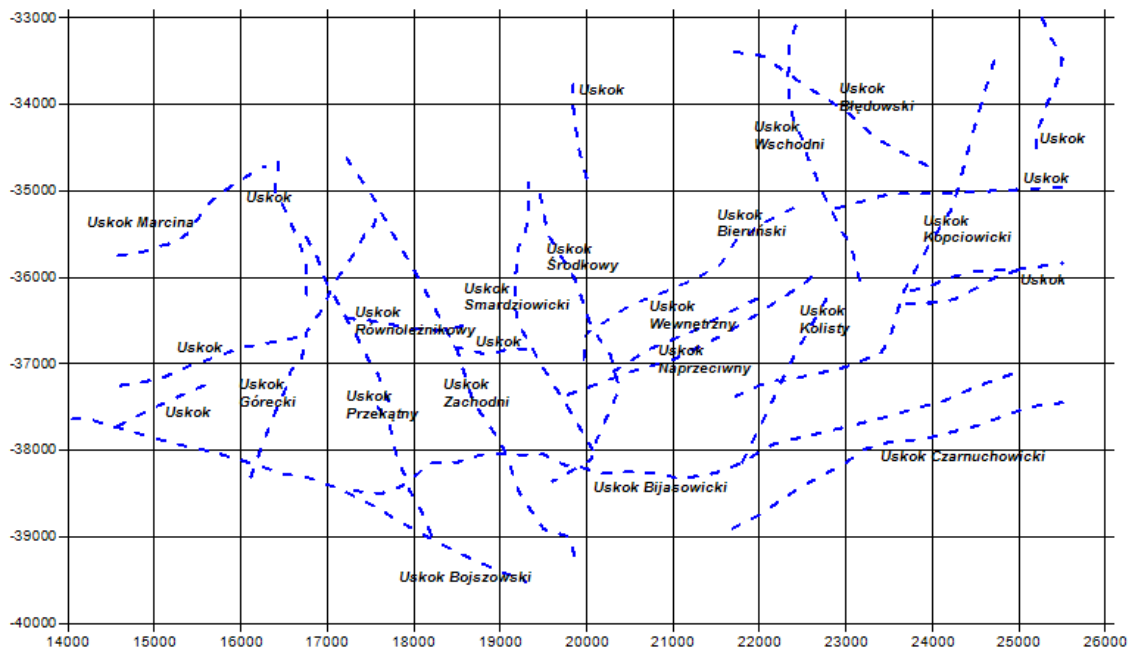
go, do których zaliczane są budynki mieszkaniowe, obiekty przemysłowe, budynki użyteczności publicznej i szyby kopalniane, obiekty typu liniowego, jak sieć dróg, linie kolejowe oraz sieci: wodociągowa, kanalizacyjna, gazowa i elektroenergetyczna i obiekty typu powierzchniowego np. zbiornik wodny Łysina w Bieruniu.

W budowie geologicznej warstw występujących w granicach obszaru górniczego wyróżnić można:

- 1) utwory czwartorzędowe: holocenijskie (gliny, pyły, warstwy gleby) i plejstocenijskie (osady piaszczysto-żwirowe, lokalnie gliny lub ropy); zalegają na prawie całym obszarze, miąższość dochodzi do około 43 m,
- 2) utwory trzeciorzędowe – osady, wśród których stwierdzono: piaski, pyły, mułowce, margle, piaskowce i zlepieńce; występują na 85% obszaru, ich miąższość dochodzi do ponad 250 m,
- 3) utwory triasowe – utwory węglanowe w postaci dolomitów i wapieni (wapienie muszlowe, rety, pstry ropy, piaski i żwiry); występują nieregularnie, na około 35% obszaru, ich miąższość dochodzi do około 90 m,
- 4) utwory karbonu produktywnego.

Utwory czwartorzędowe, trzeciorzędowe i triasowe stanowią nadkład warstw węglonośnych, do których zaliczamy utwory karbonu produktywnego: warstwy libiąskie (pokłady 116, 118 i 119), warstwy łaziskie (pokłady od 201/1 do 216), warstwy orzeskie (pokłady od 301 do 336) [33].

Kopalnia prowadzi ciągle badania parametrów węgla i skał otaczających. W stropie i spągu eksploatowanych pokładów występują głównie piaskowce i ropy o wytrzymałości na ściskanie wyższej niż wytrzymałość węgla (w zdecydowanej większości przypadków). Złoże będące przedmiotem eksploatacji kopalni zalega nieregularnie. Ma kształt synkliny, której oś jest nachylona w kierunku wschodnim. Kąt nachylenia warstw wynosi od 0° do 8° (lokalnie 15°). Z uwagi na wpływ zawodnienia na poziom zagrożenia tąpnięciami w rejonie zostały wydzielone 4 piętra wodonośne (czwartorzędowe, trzeciorzędowe, triasowe i karbońskie). Ponadto występują liczne uskoki, o charakterze lokalnym i regionalnym, które warunkują podział obszaru górniczego na bloki tektoniczne. Ich zrzuty wynoszą od kilkunastu centymetrów do około 200 m. Obserwowany jest przebieg uskoków we wszystkich kierunkach. Główne uskoki występujące w rejonie 2 przedstawiono na rys. 7.2.



Rys. 7.2. Główne uskoki występujące w rejonie 2 (rzut na płaszczyznę pokładu 207)

8. Zagrożenie sejsmiczne i zagrożenie łąpaniami w analizowanych rejonach

8.1. Przyczyny występowania i sposoby minimalizacji zagrożenia sejsmicznego oraz zagrożenia łąpaniami w analizowanych rejonach

Na zagrożenie sejsmiczne występujące w rozpatrywanych rejonach eksploatacji górniczej ma wpływ szereg czynników. Do najistotniejszych z nich można zaliczyć:

- 1) występowanie mocnych skał otaczających pokłady, zwłaszcza piaskowców, których utrata ciągłości powoduje silne wstrząsy i łąpania,
- 2) głębokość eksploatacji i wynikający z niej wysoki stan naprężeń pierwotnych,
- 3) zaszczości eksploatacyjne w postaci pozostawionych resztek oraz wytworzonych krawędzi,
- 4) brak możliwości czystego wybierania złoża ze względu na występowanie uskoków i pozostawianie resztek pokładów,
- 5) uwarunkowania projektowe będące wynikiem konieczności ochrony powierzchni oraz współwystępowania zagrożenia łąpaniami z zagrożeniem metanowym i pożarowym (ograniczenie możliwości stosowania niektórych środków profilaktyki redukującej poziom zagrożenia sejsmicznego),
- 6) koncentracja wydobywania – prowadzenie dużej liczby robót przygotowawczych i eksploatacyjnych w jednym rejonie równocześnie.

W analizowanych rejonach powyższe czynniki powodują występowanie zagrożenia sejsmicznego, utrzymującego się na wysokim poziomie i powodującego konieczność podejmowania działań prewencyjnych. Z tego względu, w obu badanych rejonach, wdrażane są środki profilaktyki mające na celu zapobieganie wysokoenergetycznym wstrząsom górotworu. Profilaktyka prowadzona jest już na etapie projektowania, poprzez prognozę zagrożenia, a następnie dobór właściwej organizacji pracy, w tym koordynacji czasowo-przestrzennej i metod zgodnych z obowiązującymi przepisami oraz ciągły monitoring stanu zagrożenia. Prognozowanie stanu zagrożenia łąpaniami jest wykonywane za pomocą metody kompleksowej, w skład której wchodzi: metoda rozoznania górniczego, metoda sondażowych wierceń małosrednicowych, metoda sejsmologii górniczej oraz metoda sejsmoakustyczna. Dodatkowo stosowane są metody pomoc-

nicze, takie jak: metoda sejsmiczna (tomografia aktywna), metoda wzbudzonej aktywności sejsmoakustycznej oraz, rzadziej, metoda tomografii pasywnej. Minimalizowanie stanu zagrożenia jest realizowane za pomocą różnego rodzaju strzelań (np. strzelanie wstrząsowe i strzelanie wstrząsowo-urabiające w pokładzie, strzelanie torpedujące w stropie lub spągu), a także poprzez nawadnianie calizny węglowej.

8.2. Aparatura pomiarowa stosowana w rejonach badań

W rejonie 1 do prowadzenia obserwacji i rejestracji zjawisk sejsmicznych wykorzystuje się 16-kanałowe komputerowe systemy pomiarowe typu ARAMIS oraz ARAMIS M/E z cyfrową transmisją danych typu DTSS. Aparatura ta umożliwia rejestrację nawet słabych zjawisk (o energii wynoszącej $1 \cdot 10^1$ J) na całym obszarze kopalni (zastosowana konstrukcja podsieci umożliwia rejestrację we wszystkich rejonach, pokładach i wyrobiskach zagrożonych sejsmicznie). Metoda sejsmoakustyczna jest realizowana za pomocą 32-kanałowej aparatury sejsmoakustycznej ARES 5/E z urządzeniami do transmisji sygnałów typu TSA. Geofony rozmieszczone są w wyrobiskach korytarzowych i w rejonach ścian w pokładach zagrożonych tąpnięciami. Układ stanowisk aparatury jest ustalany w procesie optymalizacji sieci.

Stanowiska pomiarowe na powierzchni wykorzystują rejestratory drgań AMAX. Aparatura ta to wielokanałowa cyfrowa aparatura sejsmometryczna, która umożliwia rejestrację prędkości i przyspieszeń drgań gruntu. Jest wyposażona w 16 bitową kartę przetwornika AC, co ma znaczenie przy silnych wstrząsach, bowiem pozwala uniknąć przesterowania drgań.

W rejonie 2 również wykorzystuje się 16-kanałowy system pomiarowy typu ARAMIS M/E z cyfrową transmisją danych typu DTSS, wyposażony w sejsmometry typu SPI-70 lub sondy geofonowe GV. W części dołowej system ten składa się z 10 stanowisk na poziomie 650 m i 6 stanowisk na poziomie 500 m. Ponadto kopalnia posiada 16-kanałową cyfrową aparaturę AS-1 SEJSGRAM z systemem transmisji TSS, wyposażoną w sejsmometry typu SPI-70 lub sondy geofonowe typu DLM2001, wykorzystywaną jako system pomocniczy. System ten składa się z 6 stanowisk na poziomie 650 m, 4 stanowisk na poziomie 500 m i 1 na powierzchni terenu. Do prowadzenia obserwacji metodą sejsmoakustyczną wykorzystywana jest aparatura ARES 5/E. System pomiarowy kopalni jest okresowo optymalizowaną, odpowiednio rozmieszczoną siecią, zapewniającą prowadzenie obserwacji i lokalizacji zjawisk sejsmicznych we wszystkich rejonach prowadzenia eksploatacji.

Prędkości i przyspieszenia drgań na powierzchni rejestrowane są za pomocą aparatury ARP 2000P/E. Jest to wielokanałowa cyfrowa aparatura sejsmometryczna, która pracuje w częstotliwościach z zakresu 0,5 do 100 Hz. Umożliwia rejestrację maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań do 3 m/s².

8.3. Zdarzenia sejsmiczne zarejestrowane w analizowanych rejonach

W rejonie 1 szczegółowa kartoteka zdarzeń sejsmicznych prowadzona jest od 1966 r. Do roku 2018 odnotowano w niej 10 tąpnięć (w tym dwa w 2010 roku) ze skutkami w ścianach oraz w wyrobiskach korytarzowych.

W analizowanym w pracy okresie, obejmującym lata 2009 – 2018 zarejestrowano 1191 wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu skutkujących powstaniem drgań gruntu, które zostały zarejestrowane przez stanowiska pomiarowe na powierzchni. Energia sejsmiczna tych zdarzeń wynosiła od 10⁵ do 10⁸ J. Szczegółowe zestawienie powyższych wstrząsów, w podziale na klasy energetyczne i lata, zostało przedstawione w tab. 8.1.

Tab. 8.1

Zestawienie wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 1 latach 2009 – 2018

Rok	Liczba wstrząsów w klasach				Maks. energia wstrząsu E, J	Sumaryczna liczba wstrząsów N	Sumaryczna energia E, J
	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	≥10 ⁸			
2009	102	19	1	0	7,02E+07	122	1,83E+08
2010	91	30	0	0	8,70E+06	121	1,51E+08
2011	155	31	5	1	1,00E+08	192	4,48E+08
2012	36	16	1	0	2,72E+07	53	7,80E+07
2013	126	44	4	0	8,12E+07	174	4,28E+08
2014	66	17	2	0	7,76E+07	85	2,00E+08
2015	56	22	6	0	6,78E+07	84	2,88E+08
2016	69	33	1	0	2,50E+07	103	1,44E+08
2017	88	38	2	0	2,60E+07	128	2,24E+08
2018*	102	26	1	0	1,71E+07	129	1,45E+08
RAZEM						1191	2,29E+09

*01.01.2018 – 30.06.2018

W rejonie 2 systematyczną rejestrację wstrząsów indukowanych eksploatacją rozpoczęto dopiero od 1987 r., po tąpnięciu z dnia 16 lipca 1986 r., które wystąpiło w partii II w pokładzie 209. Pomimo bardzo wysokiej aktywności sejsmicznej górotworu w tym rejonie do roku 2019 było to jedyne zarejestrowane tąpnięcie.

W analizowanym okresie, obejmującym lata 2008 - 2019 zarejestrowano 2109 wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu skutkujących powstaniem drgań gruntu, które zostały zarejestrowane przez stanowiska pomiarowe na powierzchni. Energia sejsmiczna tych zdarzeń wynosiła od 10^5 do 10^9 J.

Szczegółowe zestawienie wstrząsów, w podziale na klasy energetyczne i lata, zostało przedstawione w tab. 8.2.

Tab. 8.2

Zestawienie wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 2 w latach 2008 – 2019

Rok	Liczba wstrząsów w klasach				Maks. energia wstrząsu E, J	Sumaryczna liczba wstrząsów N	Sumaryczna energia E, J
	10^5	10^6	10^7	$\geq 10^8$			
2008	63	10	3	0	8,00E+07	76	2,59E+08
2009	81	7	2	0	2,00E+07	90	9,59E+07
2010	201	38	2	2	3,00E+09	243	3,40E+09
2011	100	23	4	2	3,00E+08	129	7,03E+08
2012	132	42	5	1	2,00E+08	180	5,62E+08
2013	130	67	6	0	6,00E+07	203	4,54E+08
2014	293	72	14	0	6,00E+07	379	7,86E+08
2015	133	43	4	0	3,00E+07	180	2,68E+08
2016	151	46	2	0	2,00E+07	199	3,00E+08
2017	74	27	3	0	2,00E+07	104	1,40E+08
2018	156	105	4	1	1,00E+08	266	6,60E+08
2019*	42	17	1	0	3,00E+07	60	1,03E+08
RAZEM						2109	7,73E+09

* 01.01.2019 – 28.02.2019

8.4. Oddziaływanie zarejestrowanych zdarzeń sejsmicznych na powierzchnię terenu

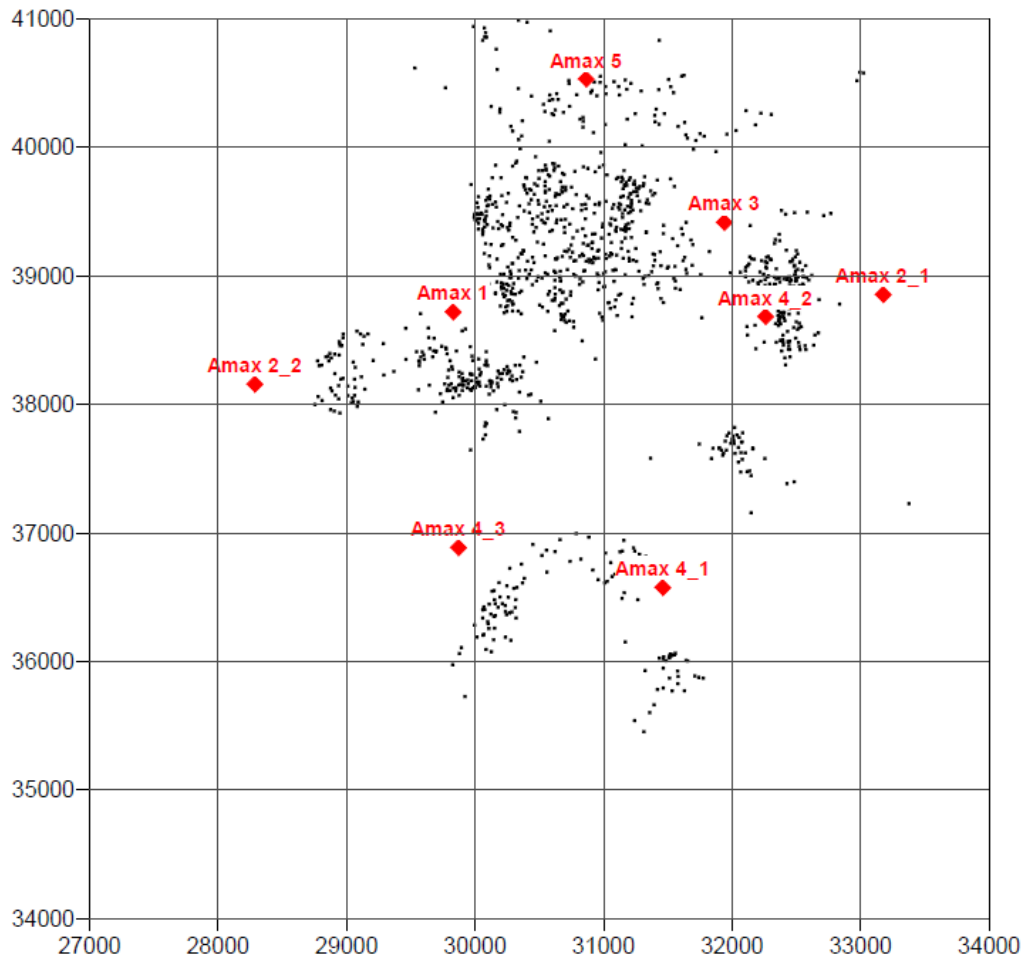
Występujące wstrząsy wysokoenergetyczne, pomimo że w większości nie powodują znaczących skutków na powierzchni, często są silnie odczuwalne przez mieszkańców, wpływając na ich dyskomfort. W związku z powyższym kopalnie od lat prowadzą monitoring dynamicznych wpływów eksploatacji na powierzchnię terenu. Szeroko prowadzona obserwacja przyczyniła się do powstania w 2008 r. skali GSI-GZW_{KW}, zaktualizowanej w roku 2012 (GSI-GZW_{KW}-2012) [18], a następnie, z uwagi na stwierdzone występowanie drgań o bardzo dużych, nierejestrowanych wcześniej, maksymalnych amplitudach prędkości drgań, rozszerzonej o dodatkowy stopień intensywności (GSIS-2017) [59]. Przy jej opracowaniu uwzględniono dane z kopalń czeskich, niemieckich i polskich, w tym z obszaru Lubelskiego Zagłębia Węglowego. Skala GSIS-2017 umożliwia interpretację i ocenę skutków drgań na powierzchni w zależności od wartości prędkości (przyspieszeń) i czasu ich trwania, a także, w odróżnieniu do poprzednich wersji, rozróżnia skutki wstrząsu w zależności od typu i stanu technicznego budynku oraz określa poziomy odporności dynamicznej budynków [60]. W obecnej wersji skala ta jest skalą siedmiostopniową otwartą i służy do szacowania wpływu drgań generowanych wstrząsami górnictwymi na budynki oraz do oceny odczuwalności zjawisk sejsmicznych przez ludzi [58].

Rejestracja parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górotworu w rejonie 1 jest prowadzona za pomocą pięciu zestawów aparatury Amax:

- 1) stanowisko pomiarowe Amax 1 przy ul. Skargi 40,
- 2) stanowisko pomiarowe Amax 2 początkowo zlokalizowane przy ul. Barwnej 35 (Amax 2.1), a od 1 września 2014 r. znajdujące się przy ul. Orzechowej 40B (Amax 2.2),
- 3) stanowisko pomiarowe Amax 3 przy ul. Nowej 57,
- 4) stanowisko pomiarowe Amax 4 do 13 listopada 2012 znajdujące się przy ul. Pietrkowickiej 20 (Amax 4.1), następnie, do 24 września 2017 r., przy ul. Licealnej 12 (Amax 4.2), a obecnie przy ulicy Szafranka 23 (Amax 4.3),
- 5) stanowisko pomiarowe Amax 5 przy ul. Rymera 200 (w latach 2010 - 2011 nosiło nazwę Amax RII).

Lokalizacja stanowisk aparatury powierzchniowej do pomiarów parametrów drgań gruntu w analizowanym okresie wraz z zaznaczeniem epicentrow wstrząsów wysokoener-

nergetycznych, które wywołały zarejestrowane drgania gruntu została przedstawiona na rys. 8.1.



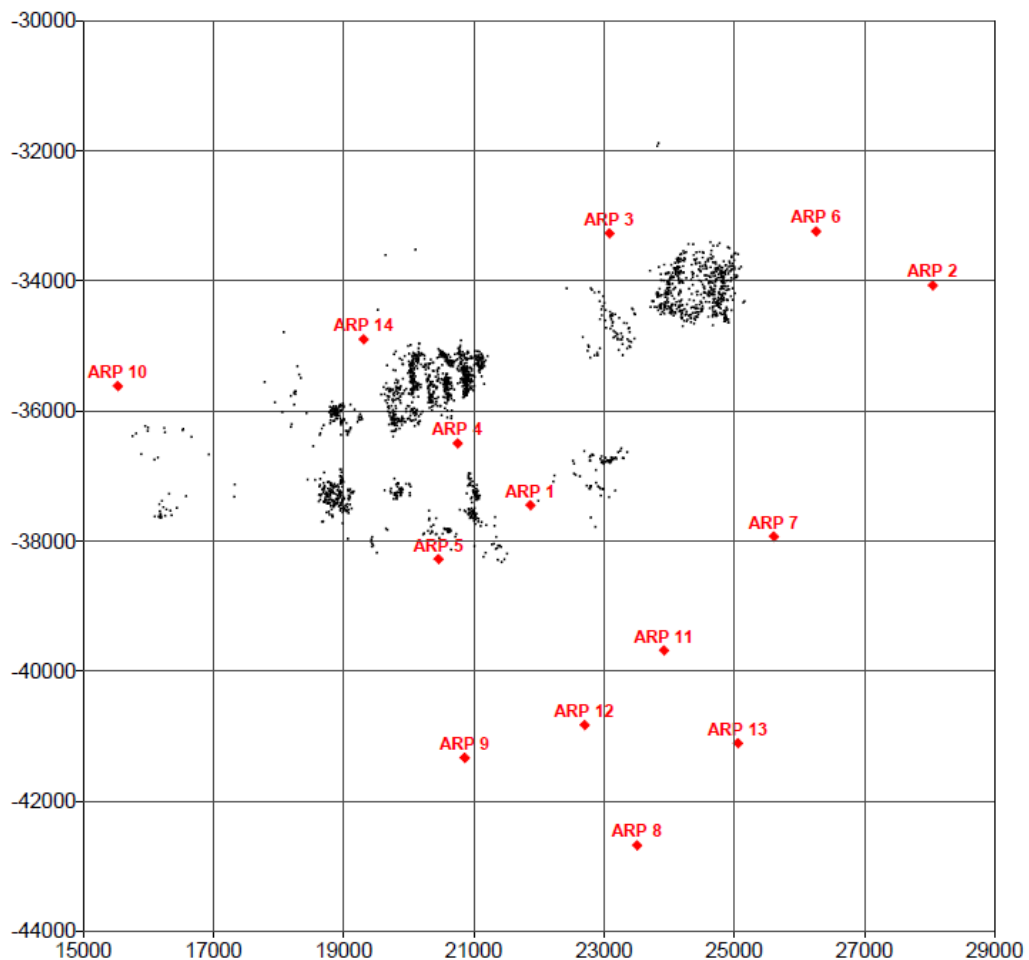
Rys 8.1. Lokalizacja stanowisk aparatury pomiarowej wraz z zaznaczeniem epicentrów wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 1

W rejonie 2 rejestracje prowadzone są za pomocą stanowisk pomiarowych systemu ARP-2000, które mogą być również wykorzystywane do lokalizacji hipocentrow wstrząsów przez system ARAMIS. W analizowanym okresie stanowiska pomiarowe znajdowały się w następujących lokalizacjach:

- 1) stanowisko 1 w Bieruniu Nowym przy ul. Warszawskiej,
- 2) stanowisko 2 w Chełmku (Gimnazjum),
- 3) stanowisko 3 w Chełmie Śląskim (Urząd Gminy) - od dnia 26 marca 2012 r. przeniesione do Babic (Szkoła), przywrócone od 12 sierpnia 2014 r. (zmiana lokalizacji stanowiska znajdującego się w Bieruniu Starym (ZTS „ERG”)),
- 4) stanowisko 4 w Bieruniu Nowym na kopalni przy ul. Granitowej (istnieje od września 2007 r.),
- 5) stanowisko 5 w Bieruniu Nowym przy ul. Bijasowickiej 6b,

- 6) stanowisko 6 w Chełmku przy ul. Jaworznińskiej 5,
- 7) stanowisko 7 w Gorzowie przy ul. Recznej 18,
- 8) stanowisko 8 w Oświęcimiu (Auschwitz),
- 9) stanowisko 9 w Oświęcimiu (Birkenau),
- 10) stanowisko 10 w Bieruniu Starym (Szkoła),
- 11) stanowisko 11 w Babcicach (Szkoła Podstawowa),
- 12) stanowisko 12 w Brzezince (Szkoła Podstawowa),
- 13) stanowisko 13 w Oświęcimiu (Gimnazjum Nr 3),
- 14) stanowisko 14 w Łędzinach przy ul. Szenwalda 107 (istnieje od czerwca 2012 r.)

Lokalizacja stanowisk aparatury powierzchniowej do pomiarów parametrów drgań gruntu w analizowanym okresie wraz z zaznaczeniem epicentrów wstrząsów wysokoenergetycznych, które wywołały zarejestrowane drgania gruntu została przedstawiona na rys. 8.2.



Rys 8.2. Lokalizacja stanowisk aparatury pomiarowej wraz z zaznaczeniem epicentrów wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 2

Dla wszystkich rejestracji pracownicy kopalnianych stacji geofizyki górniczej określają maksymalne amplitudy przyspieszeń i prędkości drgań gruntu oraz czas ich trwania (dla obserwacji wcześniejszych proces ten ograniczał się do określania przyspieszeń drgań). Otrzymany w ten sposób zbiór rejestracji stanowił podstawę do dalszych rozważań.

9. Wyniki analiz parametrów drgań gruntu generowanych wysokoenergetycznymi wstrząsami górotworu przeprowadzonych za pomocą metod eksploracji danych

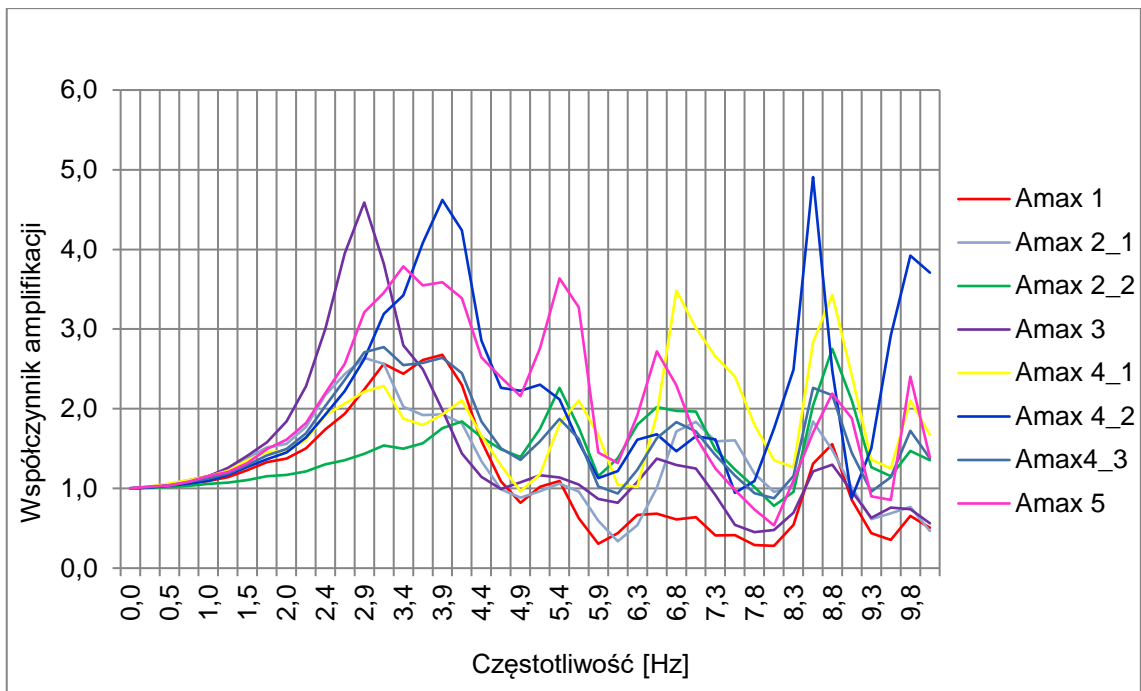
9.1. Amplifikacja drgań w miejscu zainstalowania aparatury pomiarowej

Do określenia amplifikacji drgań w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej w rozpatrywanych obszarach górniczych przygotowano zbiór danych, w którym dla każdej z występujących warstw nadkładu określono:

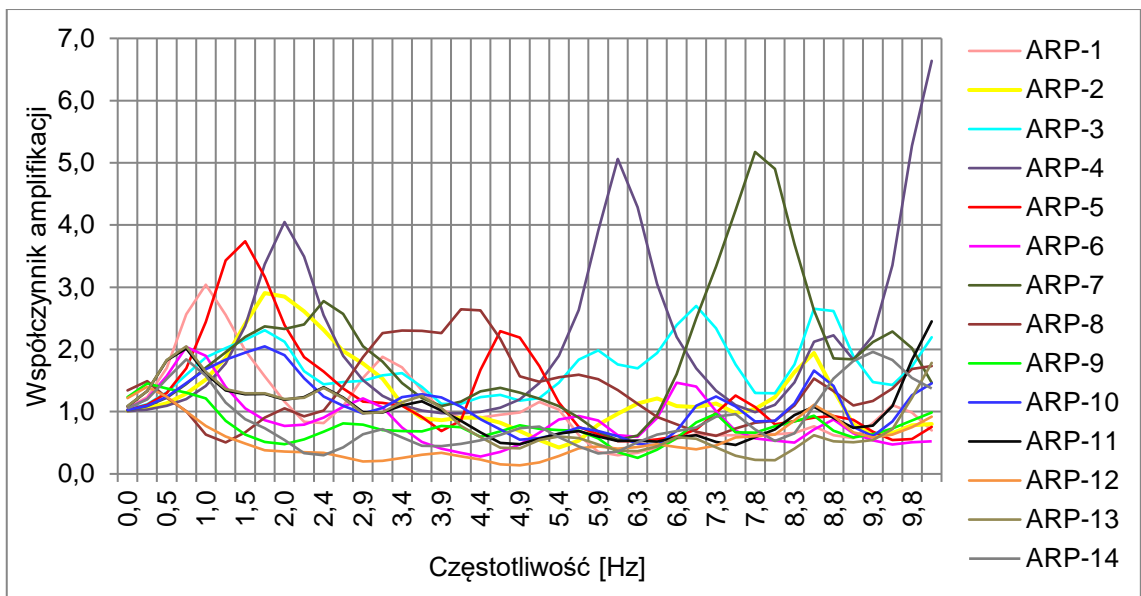
- charakterystykę skały budującej warstwę,
- miąższość, m,
- ciężar objętościowy, kN/m^3 ,
- prędkość fali S, m/s.

Dane dotyczące budowy nadkładu (rodzaj skał, miąższość) w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej odczytano z map hydrogeologicznych. Wykorzystano także dane uzyskane z kopalni. Ciężar objętościowy skał został odczytany z normy PN-82/B-02001 [72], a prędkość rozchodzenia się fali przyjęto zgodnie z opracowanymi rozkładami prędkości propagacji poprzecznej fali sejsmicznej na wybranych obszarach GZW [17]. Ponadto przyjęto, że każda z warstw dzieli się na podwarstwy o miąższości maksymalnie 1 m, a częstotliwość dominująca drgań, uzyskana na podstawie równań (4.23 i 4.24), przy przyjętym zakresie energii od $1 \cdot 10^5$ J do $1 \cdot 10^9$ J wynosi od 0,99 Hz do 9,81 Hz (przyjęto częstotliwość dominującą drgań od 1 Hz do 10 Hz).

Otrzymane wyniki, ukazujące zależność między częstotliwością drgań a wartością współczynnika amplifikacji dla podanych danych zostały przedstawione na wykresach rozkładu wartości współczynnika amplifikacji dla częstotliwości z zakresu 0-10 Hz dla każdego stanowiska pomiarowego (rys. 9.1 dla rejonu 1 rys. 9.2 dla rejonu 2).



Rys. 9.1. Zależność współczynnika amplifikacji od częstotliwości dla stanowisk pomiarowych w rejonie 1



Rys. 9.2. Zależność współczynnika amplifikacji od częstotliwości dla stanowisk pomiarowych w rejonie 2

Wykresy obrazują silne zróżnicowanie wartości współczynnika amplifikacji drgań w zależności od ich częstotliwości. Do dalszych analiz dla każdego ze stanowisk przyjęto maksymalną, występującą w paśmie częstotliwości 1-10 Hz, wartość współczynnika amplifikacji (wartości te zostały przedstawione w tab. 9.1 dla stanowisk z rejonu 1 i tab. 9.2 dla stanowisk z rejonu 2). Stanowi to oczywiście duże uproszczenie – drgania gruntu wywołane wstrząsami górotworu nie są drganiami harmonicznymi i nie znamy ich widma. W rezultacie przyjętego sposobu określania wartości współczynnika amplifika-

cji drgań należy oczekiwać, że będzie on przyjmować wartości mniejsze od podanych w tab. 9.1 i 9.2.

Tab. 9.1

Wartości współczynnika amplifikacji drgań w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej w rejonie 1

Stanowisko	Okres	Miąższość, m	Rodzaj skał budujących	Ciężar objętościowy, kN/m ³	Prędkość fali poprzecznej, m/s	Współczynnik amplifikacji
Amax 1	Czwartorzęd	3	iłły piaszczyste	22	200	2,68
		17	piaski	18	500	
Amax 2_1	Czwartorzęd	3	gliny	22	200	2,64
	Trzeciorzęd	3	iłły	21,5	200	
		3	piaski	18	300	
		4	iłły	21,5	480	
Amax 2_2	Czwartorzęd	4	iłły	21,5	200	2,75
		3	piaski	18	300	
Amax 3	Czwartorzęd	10	gliny	22	400	4,59
	Trzeciorzęd	8	iłły	21,5	500	
		2	piaski	18	560	
		11	iłły piaszczyste	22	700	
Amax 4_1	Czwartorzęd	5	piaski	18	200	3,48
		1,5	żwiry	22,5	250	
		2,5	iłły	21,5	390	
	Trzeciorzęd	2	piaski	18	410	
Amax 4_2	Trzeciorzęd	15	iłły	21,5	600	4,91
		6	gliny	22	200	
		4	iłły	21,5	370	
Amax 4_3	Czwartorzęd	4	piaski	18	500	2,77
		9	iłły	21,5	580	
		7,5	gliny	22	200	
Amax 5	Czwartorzęd	4	piaski	18	250	3,79
		9,5	piaski	18	560	
		11	gliny	22	400	
	Trzeciorzęd	20	iłły	21,5	900	

Tab. 9.2

**Wartości współczynnika amplifikacji drgań w miejscach zainstalowania
aparatury pomiarowej w rejonie 2**

Stanowisko	Okres	Miąższość, m	Rodzaj skał budujących	Ciężar objętościowy, kN/m ³	Prędkość fali poprzecznej, m/s	Współczynnik amplifikacji
ARP-1	Czwartorzęd	0,4	gleby	18,5	100	3,04
		7,8	piaski/gliny	20	160	
	Trzeciorzęd	120	iły	21,5	600	
ARP-2	Czwartorzęd	7,4	piaski	18	230	2,91
	Trzeciorzęd	21,6	iły	21,5	500	
ARP-3	Czwartorzęd	0,4	gleby	18,5	100	2,70
		0,7	gliny	22	110	
		7	piaski	18	160	
	Trzeciorzęd	4,3	iły	21,5	220	
	Trias	36,6	wapienie	26	600	
ARP-4	Czwartorzęd	0,3	gleby	18,5	100	6,64
		0,8	gliny	22	110	
	Trzeciorzęd	62,5	iły	21,5	600	
ARP-5	Czwartorzęd	10,3	piaski	18	220	3,74
	Trzeciorzęd	80,4	iły	21,5	600	
ARP-6	Czwartorzęd	5	piaski	18	160	2,04
		Trzeciorzęd	123	iły	21,5	
		3,6	wapienie	26	600	
ARP-7	Czwartorzęd	0,5	gleby	18,5	100	5,17
		1,5	gliny	22	120	
		10	piaski	18	220	
	Trzeciorzęd	48,6	iły	21,5	600	
ARP-8	Czwartorzęd	25,7	piaski	18	500	2,65
	Trzeciorzęd	420	iły	21,5	600	
ARP-9	Czwartorzęd	13,3	piaski/gliny	20	220	1,45
	Trzeciorzęd	323	iły	21,5	600	
ARP-10	Czwartorzęd	5	piaski	18	160	2,05
		8	żwiry	22,5	220	
	Trzeciorzęd	11	iły	21,5	400	
	Trias	26,2	wapienie	26	600	
ARP-11	Czwartorzęd	0,3	gleby	18,5	100	2,45
		0,7	gliny/pyły	20	110	
		9	żwiry	22,5	210	
	Trzeciorzęd	163,8	iły	21,5	600	

Stanowisko	Okres	Miąższość, m	Rodzaj skał budujących	Ciężar objętościowy, kN/m ³	Prędkość fali poprzecznej, m/s	Współczynnik amplifikacji
ARP-12	Czwartorzęd	14,7	piaski/gliny	20	220	1,40
	Trzeciorzęd	58,5	iły	21,5	600	
		9,7	piaski	18	600	
		53,5	iły	21,5	600	
		6	piaski	18	600	
		30,3	iły	21,5	600	
		11	piaski	18	600	
		113,9	iły	21,5	600	
ARP-13	Czwartorzęd	10,8	piaski	18	220	2,05
	Trzeciorzęd	163,8	iły	21,5	600	
ARP-14	Czwartorzęd	1	gleby	18,5	100	1,96
		1	gliny	22	140	
		9	piaski	18	220	
	Trzeciorzęd	85	iły	21,5	600	
	Trias	15	margle	24	600	

Dla rejonu 1 maksymalna wartość współczynnika amplifikacji w miejscach zainstalowania aparatury wynosi od 2,64 dla nieistniejącego już stanowiska Amax 2_1 do 4,91 dla stanowiska Amax 4_2, co oznacza, że w każdym ze stanowisk drgania wywoływane eksploatacją są wzmacniane przez występujące warstwy nadkładu. Dla rejonu 2 maksymalna wartość współczynnika amplifikacji jest bardziej zróżnicowana i wynosi od 1,40 dla stanowiska ARP-12 do 6,64 dla stanowiska ARP-4. Również w tym przypadku przyjęte wartości współczynnika amplifikacji drgań sugerują, że generowane wstrząsami drgania są wzmacniane podczas przechodzenia przez luźne utwory triasowe, trzeciorzędowe i czwartorzędowe.

9.2. Analiza parametrów drgań gruntu

Po wyznaczeniu współczynnika amplifikacji drgań kolejnym etapem było dostosowanie otrzymanego z kopalni materiału obserwacyjnego (w postaci rezultatów rejestracji parametrów drgań gruntu) na potrzeby dalszych analiz.

Dla rejonu 1, ze zbioru danych wybrano zdarzenia zarejestrowane na minimum 4 stanowiskach, dla rejonu 2 - zarejestrowane na minimum 8 stanowiskach. Pominięto drgania wywołane wstrząsami o energii poniżej 10⁵ J oraz drgania wywołane wstrząsami, których epicentra znajdowały się w odległości powyżej 10 000 m od stanowisk pomiarowych, a z uwagi na brak wiarygodnych danych (wynikających z występujących

trudności w określeniu rzeczywistej głębokości wstrząsu) przyjęto $h = 0$ m, upraszczając tym samym równania (6.2) i (6.5) do postaci:

$$R_h = \sqrt{R_e^2} \quad (9.1)$$

oraz

$$R_h^* = \sqrt{l^2 + m^2} \quad (9.2)$$

co pozwoliło na wyznaczenie parametrów równania bez znajomości współrzędnej głębokości ogniska wstrząsu.

W rezultacie wstępnego przetworzenia zbioru rejestracji drgań do dalszej analizy zakwalifikowano 212 zdarzeń z rejonu 1 oraz 220 zdarzeń z rejonu 2.

W dalszej kolejności uwzględniono obliczone wcześniej wartości współczynnika amplifikacji drgań. Dla każdego ze stanowisk pomiarowych zarejestrowana wartość przyspieszeń drgań gruntu została podzielona przez wartość współczynnika amplifikacji. Uzyskano w ten sposób wartości maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań skalnego podłoża.

Wykorzystując przyjęte modele dla powyższych zbiorów obserwacji wyznaczono parametry równań (6.1), (6.3), (6.9) i wykreślono mapy rozkładu przyspieszeń drgań gruntu dla dwóch wariantów: w pierwszym obliczenia przeprowadzono uwzględniając zróżnicowanie współczynnika amplifikacji drgań, w drugim zróżnicowanie współczynnika amplifikacji drgań zostało pominięte.

Obliczenia przeprowadzono niezależnie dla każdego zdarzenia. Szczegółowe wyniki dla rejonu 1 znajdują się w załączniku 1, a dla rejonu 2 – w załączniku 2.

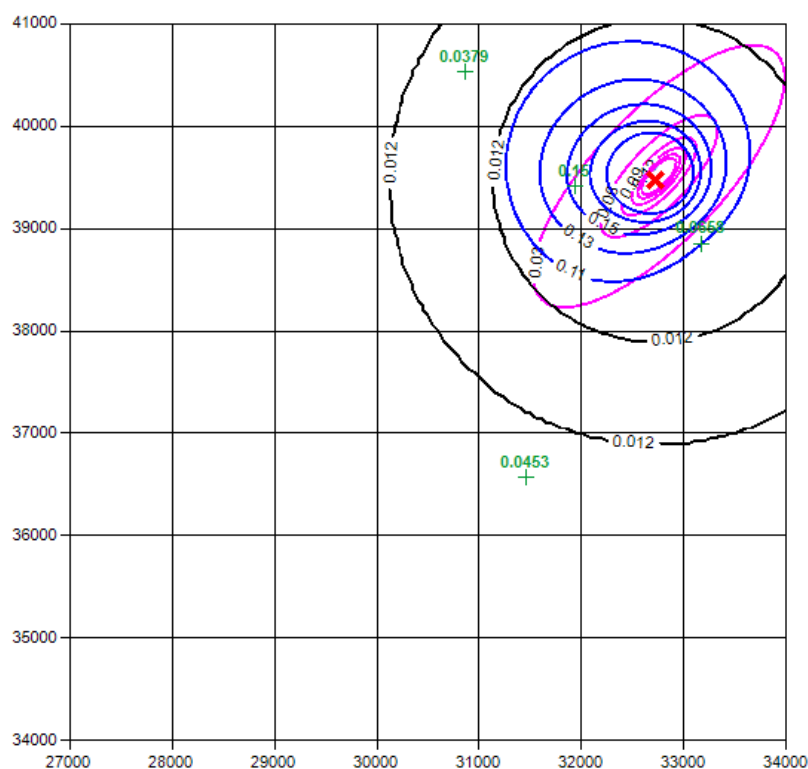
Dodatkowo, dla zobrazowania uzyskanych wyników, wybrano 4 zdarzenia, dla których przedstawiono mapy rozkładu pola przyspieszeń oraz wartość błędu średniokwadratowego, współczynnika korelacji i współczynnika determinacji pomiędzy wartością zaobserwowaną a wartością obliczoną przyspieszenia drgań gruntu. Wyniki zostały przedstawione w tab. 9.3 ÷ 9.6, a rozkłady pola przyspieszeń na rys. 9.3 ÷ 9.10, na których kolorem czarnym oznaczono rozkład dla modelu 1, fioletowym dla modelu 2 i niebieskim dla modelu 3. Dodatkowo naniesiono wartości zaobserwowane, zarejestrowane na stanowiskach pomiarowych (kolor zielony). Należy podkreślić, że uzyskana wysoka zgodność wartości obliczonych przyspieszeń drgań gruntu z wartościami zaobserwowanymi wynika z niewielkiej liczebności zbiorów danych w stosunku do liczby paramet-

trów równania (analiza została przeprowadzona dla każdego zdarzenia niezależnie – de facto wykonano aproksymację danych pomiarowych).

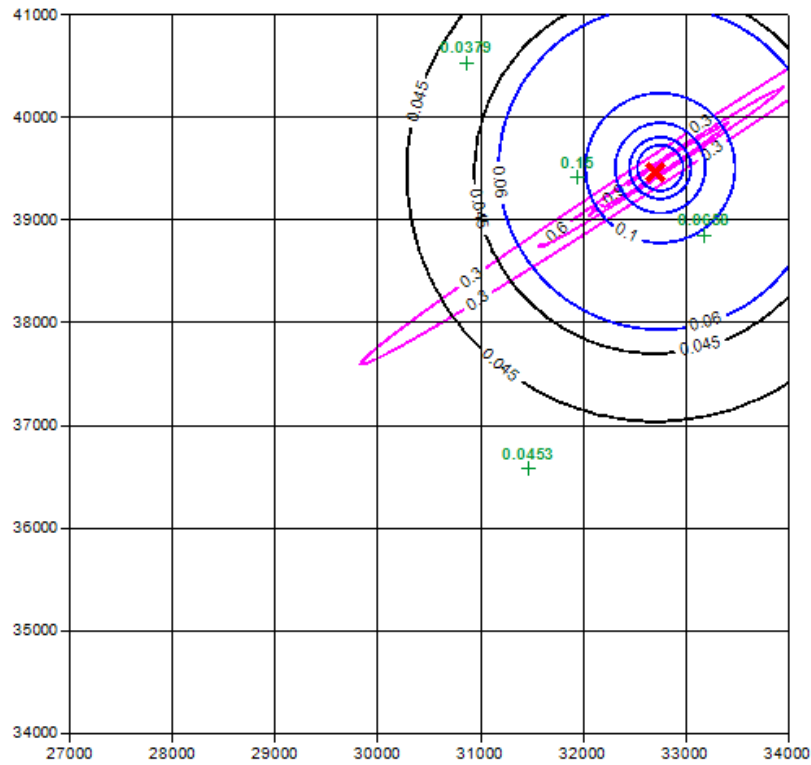
Tab. 9.3

Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 23.09.2017

Wariant	Suma kwadratów błędów SSE			Współczynnik korelacji r_k			Współczynnik determinacji r^2		
	model			model			model		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Z uwzględnieniem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,00	0,99	1,00	0,99	0,97	1,00	0,99
Z pominięciem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,00	0,74	0,98	0,72	0,55	0,97	0,52



Rys. 9.3. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 23.09.2017 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

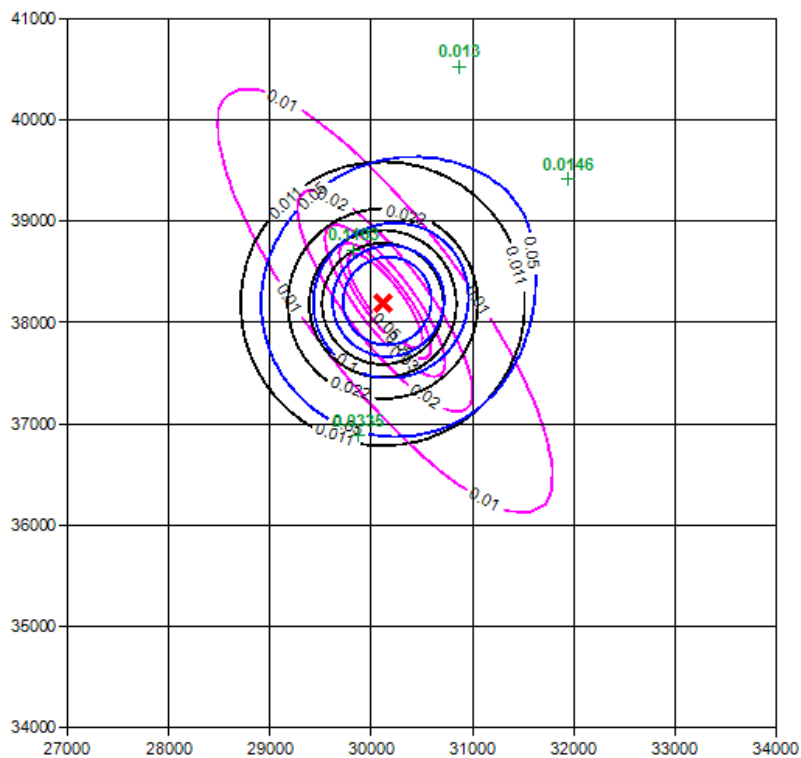


Rys. 9.4. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 23.09.2017 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s².
 Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Tab. 9.4

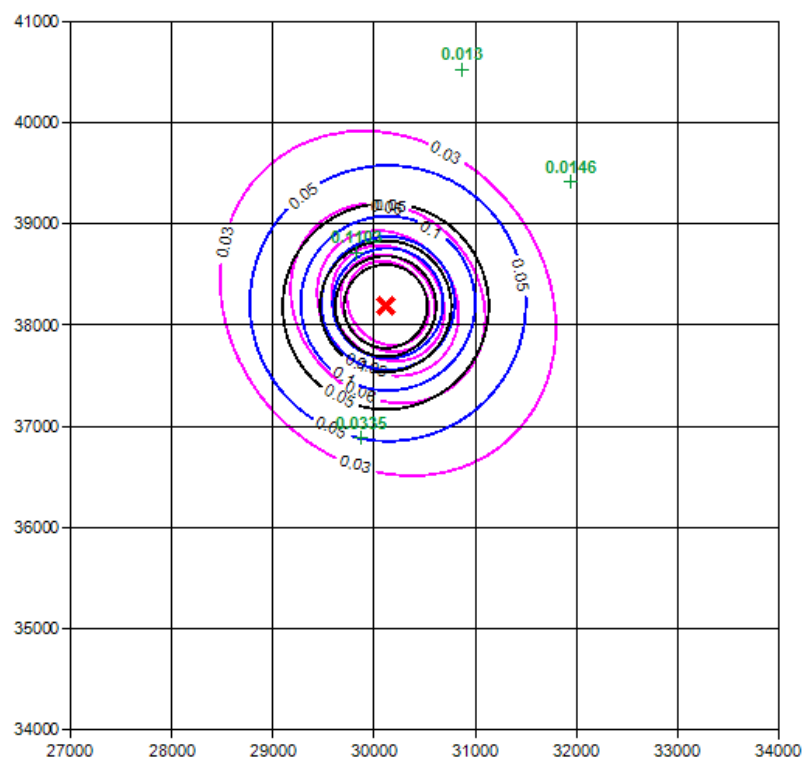
Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 30.12.2017

Wariant	Suma kwadratów błędów SSE			Współczynnik korelacji r_k			Współczynnik determinacji r^2		
	model			model			model		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Z uwzględnieniem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Z pominięciem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



Rys. 9.5. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 30.12.2017 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 .

Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

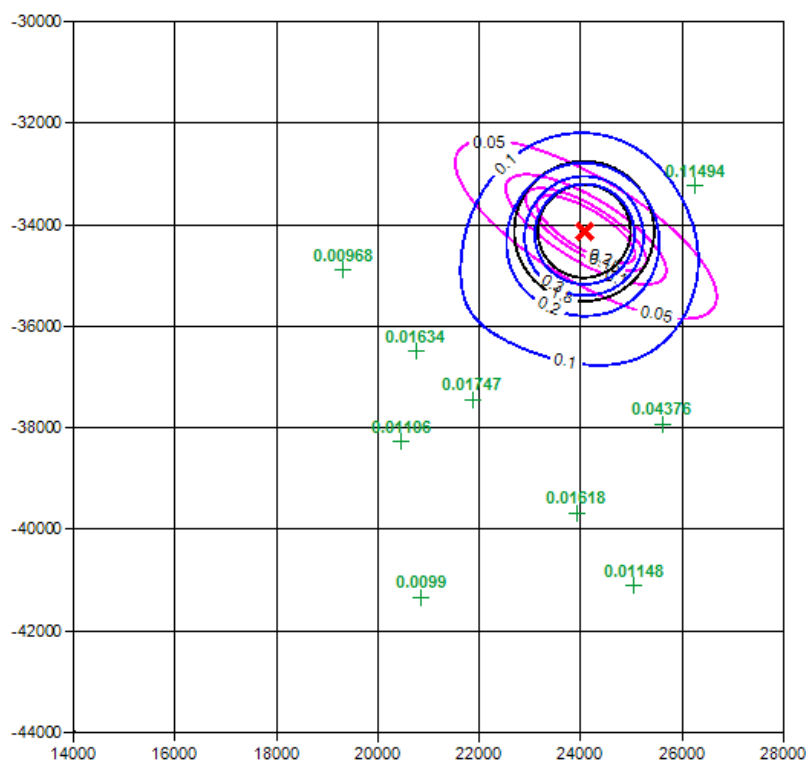


Rys. 9.6. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 30.12.2017 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 .

Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

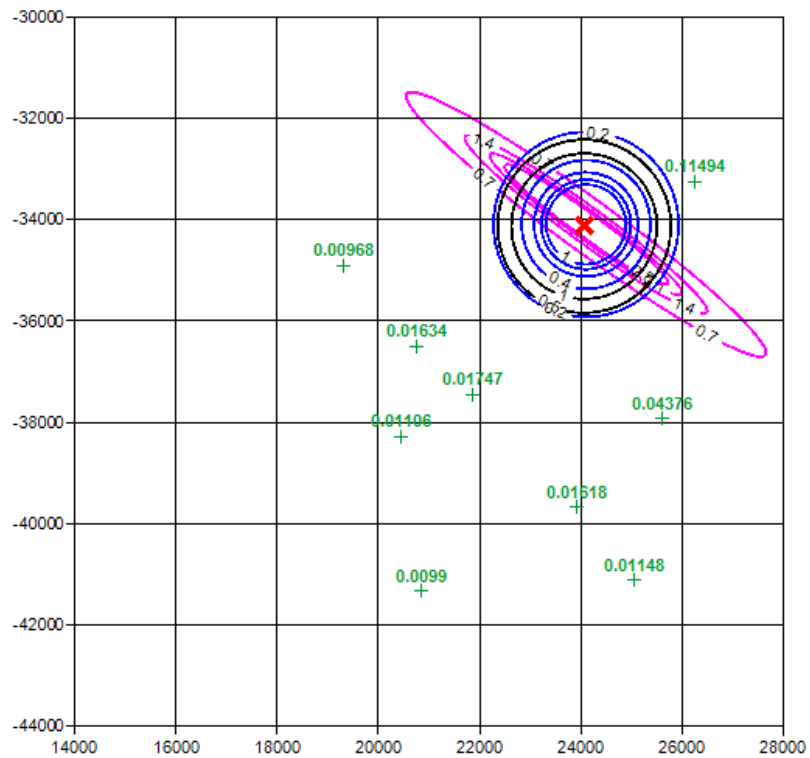
**Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2
z dnia 11.10.2014**

Wariant	Suma kwadratów błędów SSE			Współczynnik korelacji r_k			Współczynnik determinacji r^2		
	model			model			model		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Z uwzględnieniem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,01	0,87	0,52	0,87	0,76	0,27	0,76
Z pominięciem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,00	0,91	0,89	0,93	0,83	0,80	0,86



Rys. 9.7. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 11.10.2014 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 .

Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

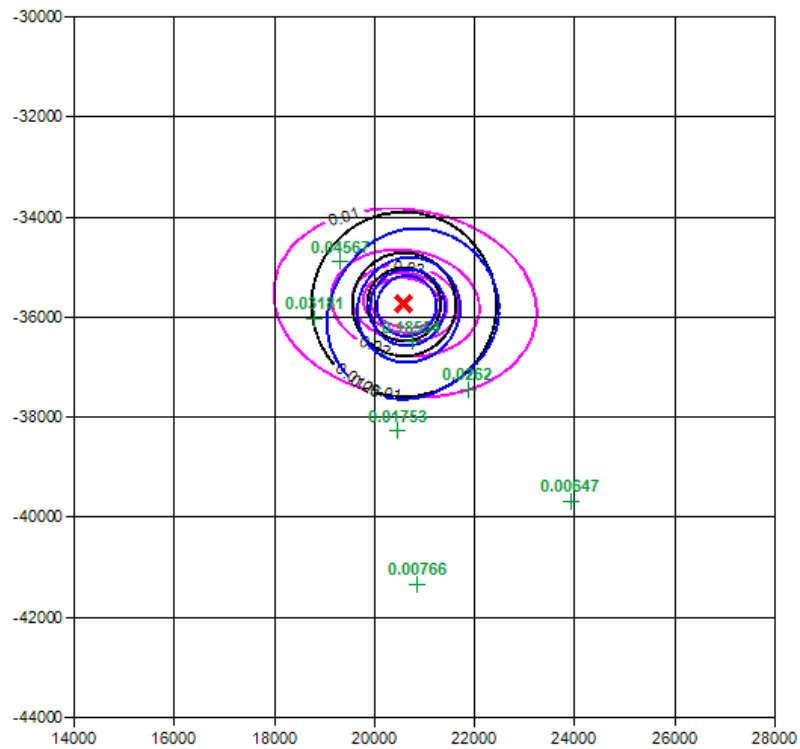


Rys. 9.8. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 11.10.2014 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 .
Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

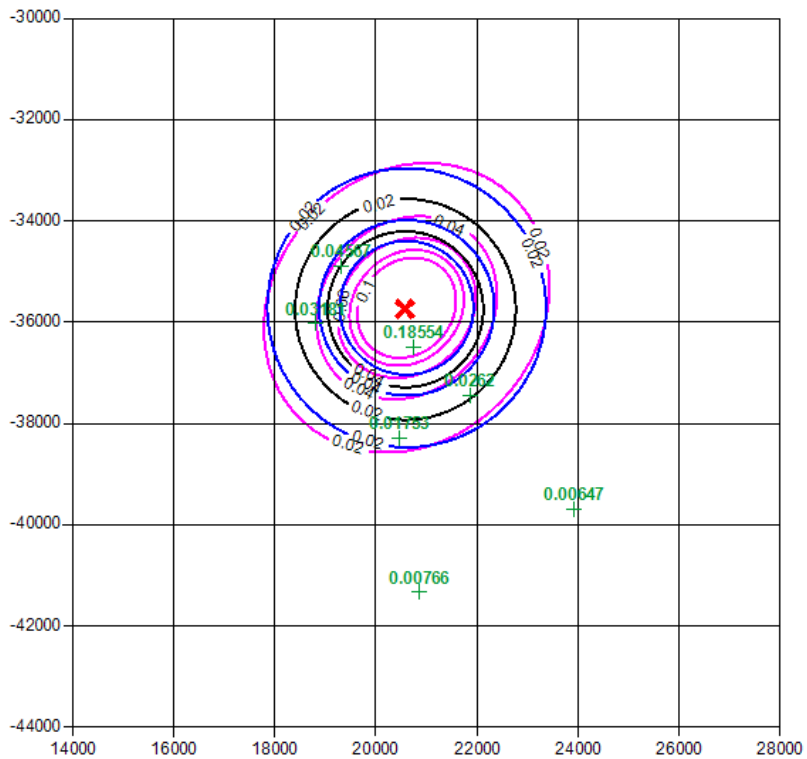
Tab. 9.6

Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 17.11.2017

Wariant	Suma kwadratów błędów SSE			Współczynnik korelacji r_k			Współczynnik determinacji r^2		
	model			model			model		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Z uwzględnieniem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,00	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98
Z pominięciem zróżnicowania amplifikacji drgań	0,00	0,00	0,00	1,00	0,99	0,99	1,00	0,98	0,98



Rys. 9.9. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 17.11.2017 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 .
 Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.



Rys. 9.10. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 17.11.2017 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 .
 Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Analizując uzyskane wyniki z obu rejonów stwierdzono, że najlepsze dopasowanie wartości prognozowanych przyspieszeń drgań gruntu do wartości zarejestrowanych uzyskuje się wykorzystując model 2, uwzględniający anizotropowość tłumienia fal. Ponadto, we wszystkich zastosowanych modelach większą zgodność obliczonej wartości przyspieszenia z wartością zaobserwowaną (mniejszy błąd dopasowania) uzyskuje się, jeżeli zróżnicowanie wartości amplifikacji drgań nie jest uwzględnione. Wyniki uzyskane dla rejonu 1 przedstawiono w tab. 9.7, a dla rejonu 2 w tab. 9.8.

Tab. 9.7

Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzeń z rejonu 1

Zróżnicowanie amplifikacji drgań	Suma kwadratów błędów SSE			Współczynnik korelacji r_k			Współczynnik determinacji r^2		
	model			model			model		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Uwzględnione	1,19	0,53	1,05	0,93	0,98	0,95	0,87	0,95	0,91
Pominięte	0,76	0,22	0,38	0,96	0,99	0,98	0,93	0,98	0,97

W rejonie 1, w przypadku wariantu uwzględniającego zróżnicowanie amplifikacji drgań błąd średniokwadratowy wynosi od 0,53 dla modelu 2 do 1,19 dla modelu 1. Wartość współczynnika korelacji i współczynnika determinacji wynosi odpowiednio: od 0,93 (model 1) do 0,98 (model 2) oraz od 0,87 (model 1) do 0,95 (model 2).

Dla wariantu, w którym pominięto zróżnicowanie amplifikacji drgań błąd średniokwadratowy wynosi od 0,22 dla modelu 2 do 0,76 dla modelu 1. Wartość współczynnika korelacji i współczynnika determinacji wynosi odpowiednio: od 0,96 (model 1) do 0,99 (model 2) oraz od 0,93 (model 1) do 0,98 (model 2).

Oznacza to, że w przypadku rejonu 1 najlepsze dopasowanie wartości oszacowanych przyspieszeń drgań gruntu do wartości zarejestrowanych przyspieszeń drgań gruntu, zarówno biorąc pod uwagę błąd średniokwadratowy, jak i współczynnik korelacji oraz współczynnik determinacji, uzyskano dla modelu, w którym uwzględniono kierunkowość rozchodzenia się drgań, przy pominięciu zróżnicowania wartości współczynnika amplifikacji drgań.

Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzeń z rejonu 2

Zróżnicowanie amplifikacji drgań	Suma kwadratów błędów SSE			Współczynnik korelacji r_k			Współczynnik determinacji r^2		
	model			model			model		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Uwzględnione	4,94	2,31	5,50	0,86	0,93	0,83	0,74	0,86	0,69
Pominięte	2,68	1,78	4,31	0,92	0,95	0,87	0,85	0,90	0,75

W rejonie 2, w przypadku wariantu uwzględniającego zróżnicowanie amplifikacji drgań błąd średniokwadratowy wynosi od 2,31 dla modelu 2 do 5,50 dla modelu 3. Wartość współczynnika korelacji i współczynnika determinacji wynosi odpowiednio: od 0,83 (model 3) do 0,93 (model 2) oraz od 0,69 (model 3) do 0,86 (model 2).

Dla wariantu, w którym pominięto zróżnicowanie amplifikacji drgań błąd średniokwadratowy wynosi od 1,78 dla modelu 2 do 4,31 dla modelu 3. Wartość współczynnika korelacji i współczynnika determinacji wynosi odpowiednio: od 0,87 (model 3) do 0,95 (model 2) oraz od 0,75 (model 3) do 0,90 (model 2).

Oznacza to, że w przypadku rejonu 2 najlepsze dopasowanie wartości oszacowanych przyspieszeń drgań gruntu do wartości zarejestrowanych przyspieszeń drgań gruntu, zarówno biorąc pod uwagę błąd średniokwadratowy, jak i współczynnik korelacji oraz współczynnik determinacji, również uzyskano dla modelu, w którym uwzględniono kierunkowość rozchodzenia się drgań, przy pominięciu zróżnicowania wartości współczynnika amplifikacji drgań

Dla obu rejonów w przypadku uwzględnienia analitycznie wyznaczonej wartości zróżnicowania amplifikacji drgań stwierdzono większy błąd oszacowania oraz niższe wartości współczynników korelacji i determinacji, co może wynikać z niedokładnego rozpoznania parametrów seismogeologicznych i geometrycznych warstw nadkładu w analizowanych obszarach. Ponadto, wartości współczynnika amplifikacji drgań w miejscu zainstalowania aparatury pomiarowej wyznaczono na podstawie danych pochodzących z otworów badawczych, które niejednokrotnie były zlokalizowane w stosunkowo znacznej odległości od stanowisk pomiarowych kopalni. Wszystkie te uproszczenia oraz fakt, że dane z analizowanych obszarów nie zawierają informacji o wartościach prędkości i przyspieszeń drgań skalnego podłoża sprawiają, że prawidłowo-

we oszacowanie wartości współczynnika amplifikacji drgań jest utrudnione. W związku z powyższym, w trakcie dalszych badań, nie uwzględniono zróżnicowania wartości współczynnika amplifikacji drgań.

W obu rejonach otrzymane wartości przyspieszeń drgań gruntu są najbardziej zbliżone do wartości zarejestrowanych w przypadku modelu 2, w którym uwzględniono kierunkowość tłumienia drgań, co świadczy o prawidłowym przyjęciu założenia, że górotwór jest ośrodkiem anizotropowym.

W celu wykazania zależności pomiędzy występującymi zaburzeniami tektonicznymi a kierunkowością rozchodzenia się drgań wywołanych zdarzeniami sejsmicznymi pochodzenia górniczego dalszej ocenie poddano zbiory z najlepszym dopasowaniem do wartości zaobserwowanych tj. model bez uwzględnienia zróżnicowania wartości amplifikacji, w którym przyjęto, że zarówno tłumienie, jak i rozpraszanie są zależne od kierunku (model 2).

9.3. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu w sąsiedztwie uskoku

W rezultacie zastosowania modelu 2, dla każdego zdarzenia określone zostały parametry równania (6.3), które umożliwiły wykreślenie map rozkładu pola przyspieszeń drgań. Każda z tych map została poddana dalszej ocenie, mającej na celu określenie, czy uzyskany rozkład anizotropowy jest związany z występującym w sąsiedztwie wstrząsu uskoku. W prowadzonych badaniach przyjęto, że przez sąsiedztwo uskoku należy rozumieć uskoku znajdujący się w odległości nie większej niż 2000 m od zdarzenia. Wstępna analiza wykazała, że występowanie kierunkowości rozchodzenia się drgań w przybliżeniu zgodnej z przebiegiem uskoku w bliskiej odległości od wstrząsu zaobserwowano:

- 1) dla 115 (53%) z 218 analizowanych zdarzeń w rejonie 1,
- 2) dla 171 (78%) z 220 analizowanych zdarzeń w rejonie 2.

Należy podkreślić, że płaszczyzny zrzutu uskoku z reguły nie są płaszczyznami pionowymi, dlatego też na potrzeby prowadzonych badań konieczne było przyjęcie pewnych uproszczeń (przebieg uskoku w analizach został odczytany z map eksploatowanych pokładów tj. pokładów, w których prowadzone roboty generowały zdarzenia powodujące drgania gruntu). Dla rejonu 1 wykorzystano mapę pokładu 706 oraz 713_{1/2}, a dla rejonu 2 - mapę pokładu 207.

Powstałe w następstwie zdarzeń rozkłady pola przyspieszeń drgań zostały dopasowane do uskoków, które występują (zostały zaznaczone na mapie pokładów) na długości wynoszącej około 1000 m i więcej. Odległość ta została odczytana z map pokładowych. Powstały w ten sposób zbiory grup zdarzeń w sąsiedztwie uskoków.

Dla rejonu 1:

- 1) zbiór 1 - 22 zdarzenia wykazujące kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem uskoku bez nazwy, o zrzucie 8 m,
- 2) zbiór 2 - 6 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Czernickiego III, o zrzucie 60 m,
- 3) zbiór 3 - 7 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Kolejowego, o zrzucie 80 m,
- 4) zbiór 4 - 51 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem uskoku Leon, o zrzucie 7 m,
- 5) zbiór 5 - 29 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku bez Rydułtowskiego II, o zrzucie 50 m.

Dla rejonu 2:

- 1) zbiór 1 - 58 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Bieruńskiego, o zrzucie 35 m,
- 2) zbiór 2 - 8 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Błędowskiego, o zrzucie 80 m,
- 3) zbiór 3 - 8 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem uskoku bez nazwy, o zrzucie 80 m,
- 4) zbiór 4 - 5 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Kolistego, o zrzucie 40 m,
- 5) zbiór 5 - 13 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Naprzeciwego, o zrzucie 45 m,
- 6) zbiór 6 - 29 zdarzeń oraz zbiór 7 - 32 zdarzenia, w obu wstrząsy wykazujące kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Smardziowickiego, o zrzucie 100 m (29 zdarzeń ze zbioru 6 znajduje się po stronie zachodniej uskoku, 32 zdarzenia ze zbioru 7 - po stronie wschodniej),
- 7) zbiór 8 - 10 zdarzeń wykazujących kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem części północnej Uskoku Środkowego, o zrzucie 60 m,

- 8) zbiór 9 - 4 zdarzenia wykazujące kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem części południowej Uskoku Środkowego, o zrzucie 60 m,
- 9) zbiór 10 - 4 zdarzenia wykazujące kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Zachodniego, o zrzucie 35 m,

Wszystkie powyższe zbiory zdarzeń, przyporządkowane do konkretnego uskoku, poddano dalszej analizie, mającej na celu wyznaczenie parametrów modelu dla każdej z grup. Przyjęto równanie z modelu 2, w którym górotwór jest traktowany jako ośrodek anizotropowy, jednak, z uwagi na zróżnicowanie energii w zbiorach, zostało ono rozszerzone o dodatkowy parametr, uwzględniający energię sejsmiczną wstrząsu:

$$\log a = \beta_0 + \beta_1 \log E + \beta_2 R^* + \beta_3 \log R^* + \varepsilon \quad (9.3)$$

gdzie:

E – energia sejsmiczna wstrząsu, J.

Wyniki estymacji oraz ocenę jakości dopasowania otrzymanych rozkładów pola przyspieszeń dla każdego zbioru zdarzeń w sąsiedztwie konkretnego uskoku przedstawiono w tab. 9.9 dla rejonu 1 oraz w tab. 9.10 dla rejonu 2.

Tab. 9.9

**Wyniki estymacji parametrów modelu oraz ocena jakości dopasowania otrzymanych rozkładów pola przyspieszeń
dla grup zdarzeń w sąsiedztwie uskoku - rejon 1**

Nazwa uskoku	Liczba wstrząsów w grupie	β_0	β_1	β_2	β_3	Błąd standardowy estymatora s	Współczynnik korelacji r_k	Współczynnik determinacji r^2
Bez nazwy	22	0	0,3661	-5,57E-09	-1,1591	0,025	0,80	0,65
Czernicki III	6	0	0,3529	0	-0,8366	0,156	0,60	0,36
Kolejowy	7	1,7909	0,3617	-3,88E-12	-1,6722	0,023	0,99	0,98
Leon	51	0	0,4394	-5,35E-09	-1,2217	0,033	0,79	0,62
Rydułtowski II	29	0	0,4700	-5,79E-13	-1,3586	0,067	0,90	0,81

Tab. 9.10

**Wyniki estymacji parametrów modelu oraz ocena jakości dopasowania otrzymanych rozkładów pola przyspieszeń
dla grup zdarzeń w sąsiedztwie uskoku - rejon 2**

Nazwa uskoku	Liczba wstrząsów w grupie	β_0	β_1	β_2	β_3	Błąd standardowy estymatora s	Współczynnik korelacji r_k	Współczynnik determinacji r^2
Bieruński	58	0,4348	0,4503	0	-1,4091	0,039	0,89	0,78
Błędowski	8	3,0872	0,3939	-8,82E-14	-1,9839	0,054	0,63	0,39
Brak	8	4,1579	0,1494	-5,86E-15	-1,8389	0,053	0,67	0,45
Kolisty	5	0,0000	0,3430	-2,27E-12	-1,0107	0,023	0,91	0,83
Naprzeciwny	13	1,9495	0,2079	-4,81E-12	-1,3837	0,031	0,78	0,61
Smardziowicki	29	0,0343	0,2033	-7,12E-06	-0,6872	0,197	0,68	0,46
	32	0,3149	0,4600	-5,66E-09	-1,4660	0,038	0,92	0,85
Środkowy	10	0,5233	0,3028	-2,13E-15	-1,2253	0,023	0,81	0,66
	4	2,0386	0,0847	-1,47E-15	-1,2815	0,007	0,95	0,90
Zachodni	4	0,2460	0,0984	-1,74E-13	-0,6381	0,005	0,75	0,57

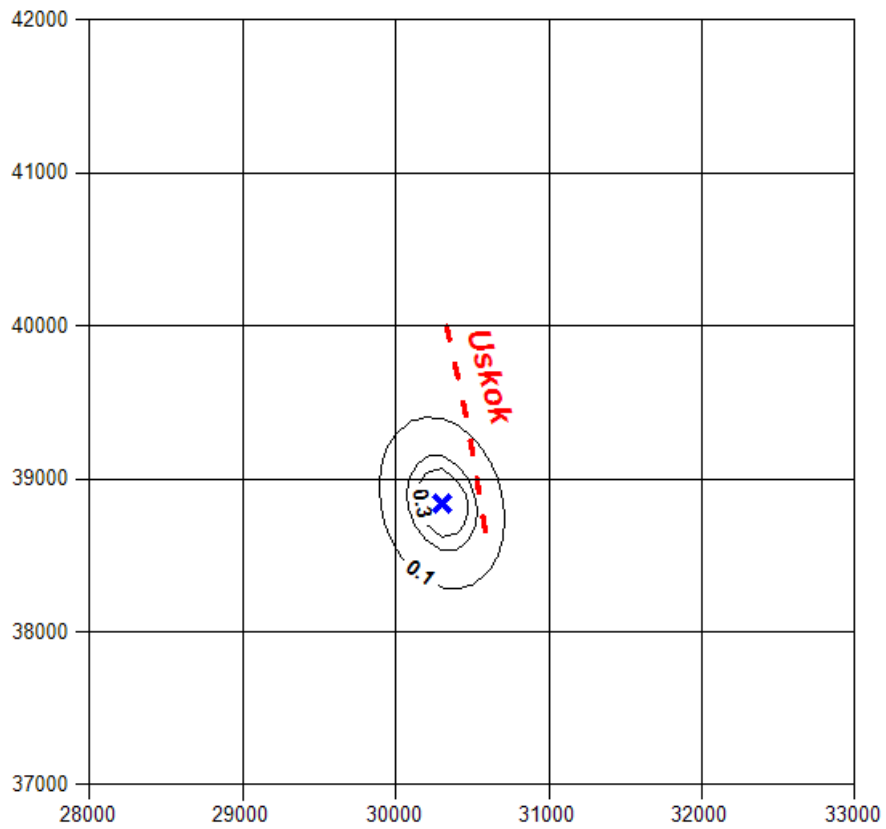
Otrzymane wyniki umożliwiły sprawdzenie, czy wyznaczone parametry równania dla zbioru kilku zdarzeń przyporządkowanych do konkretnego uskoku nadal będą wskazywały na kierunkowość rozchodzenia się drgań zgodną z przebiegiem wybranego uskoku. W tym celu dla każdego zbioru wykreślono mapę pola przyspieszeń dla hipotetycznego zdarzenia. W każdym zbiorze jako takie zdarzenie przyjęto wstrząs o energii 10^6 J i współrzędnych epicentrum obliczonych jako średnia arytmetyczna współrzędnych wstrząsów tworzących dany zbiór. Rezultaty analiz przedstawiono na rysunkach 9.11 ÷ 9.23.

Dodatkowo, w tab. 9.11 zestawiono parametry uwzględnionych w analizie uskoków (zrzut uskoku i azymut uskoku) oraz odległość epicentrum hipotetycznego zdarzenia od uskoku.

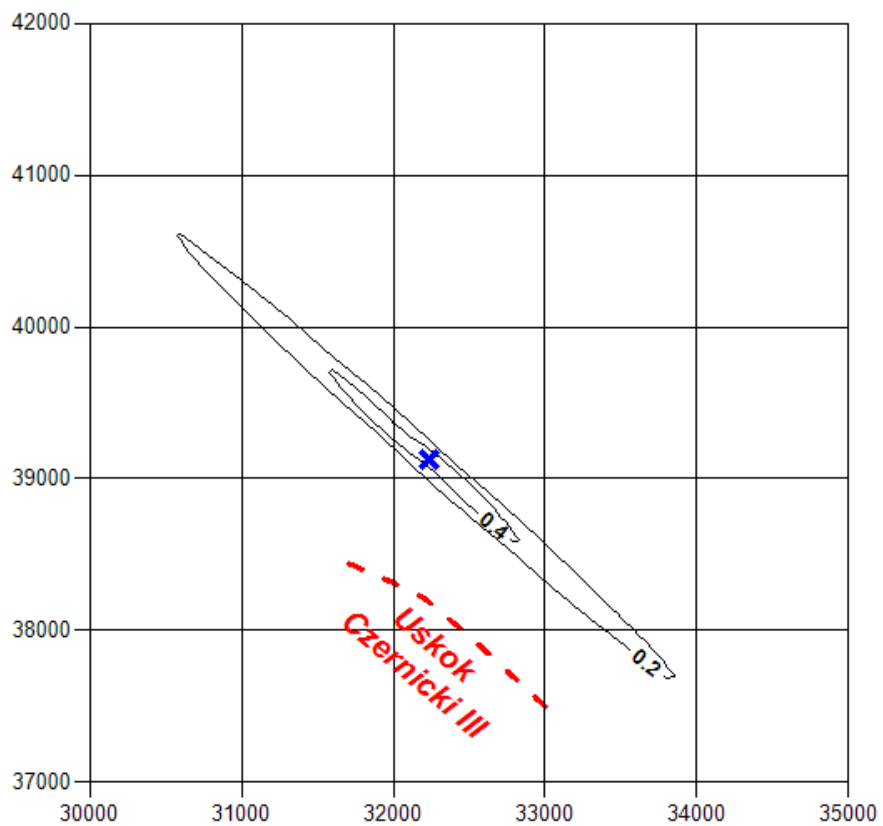
Tab. 9.11

Parametry zdarzeń i uskoków

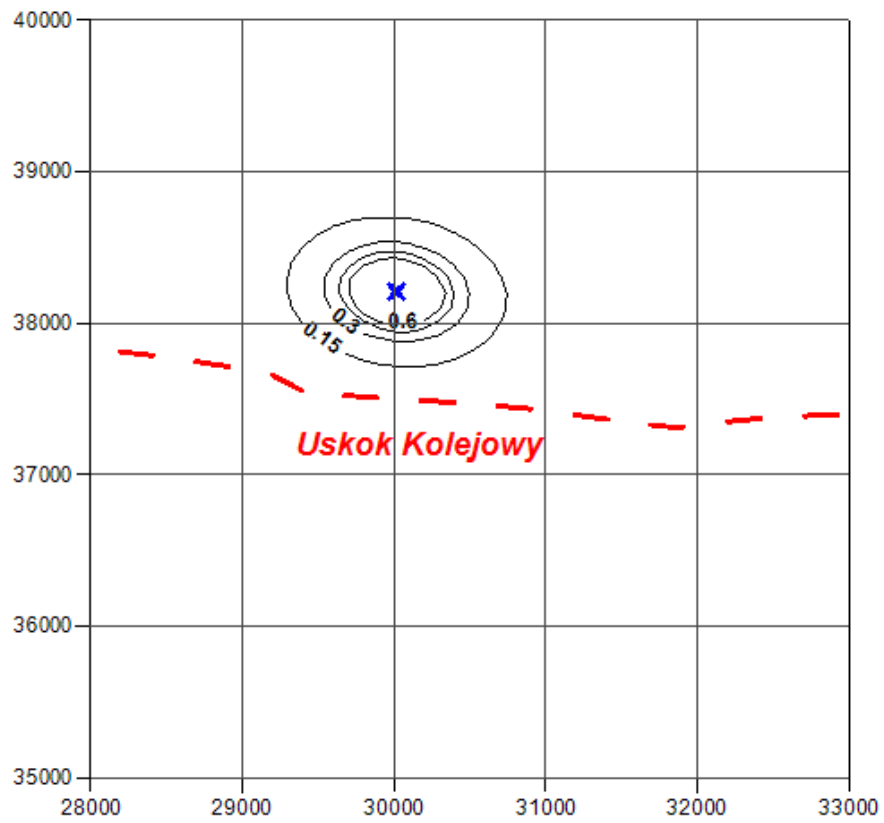
Nazwa uskoku	x_{wstrz}	y_{wstrz}	Zrzut uskoku, m	Azymut uskoku, rad	Odległość epicentrum zdarzenia od uskoku, m
Brak (rejon 1)	30300	38843	8	2,96	243
Czernicki III	32236	39123	60	2,20	863
Kolejowy	30018	38207	80	1,66	551
Leon	31439	39062	7	0,29	588
Rydułtowski II	30955	39260	50	1,62	569
Bieruński	20711	-35512	35	0,95	737
Błędowski	24073	-33957	80	2,10	712
Brak (rejon 2)	24018	-34224	80	1,49	887
Kolisty	22684	-36943	40	0,48	238
Naprzeciwny	21088	-36291	45	1,11	382
Smardziowski	18870	-36005	100	0,08	379
	20627	-35452			1330
Środkowy	20315	-35423	60	2,75	646
	21034	-37265		0,62	519
Zachodni	18710	-37305	35	2,61	33



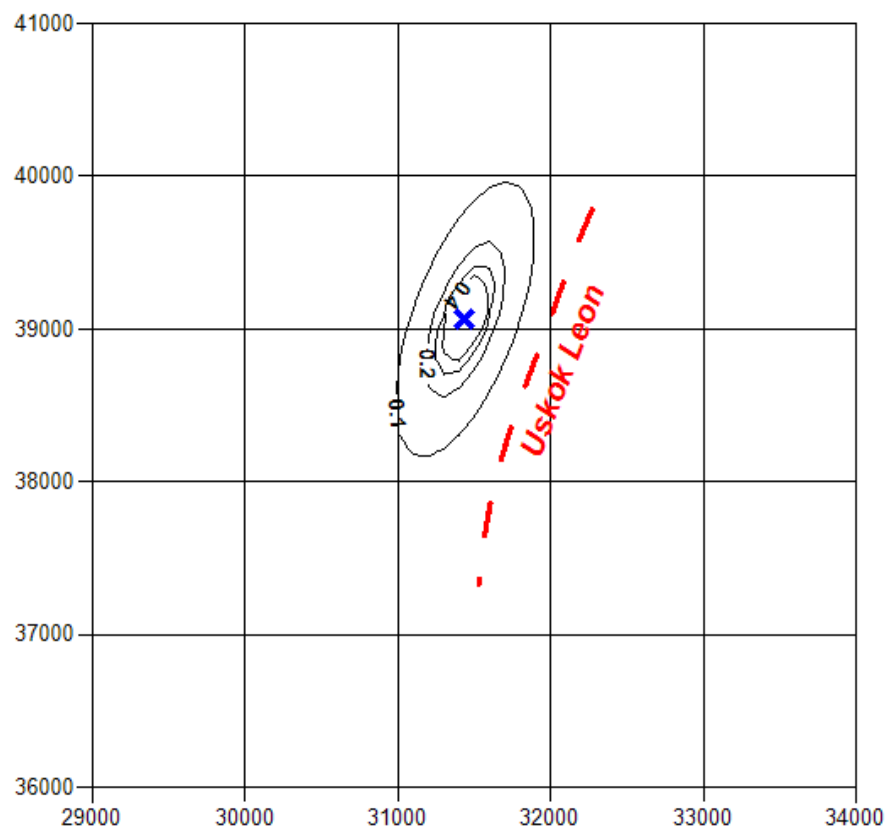
Rys. 9.11. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku (rejon 1), m/s^2



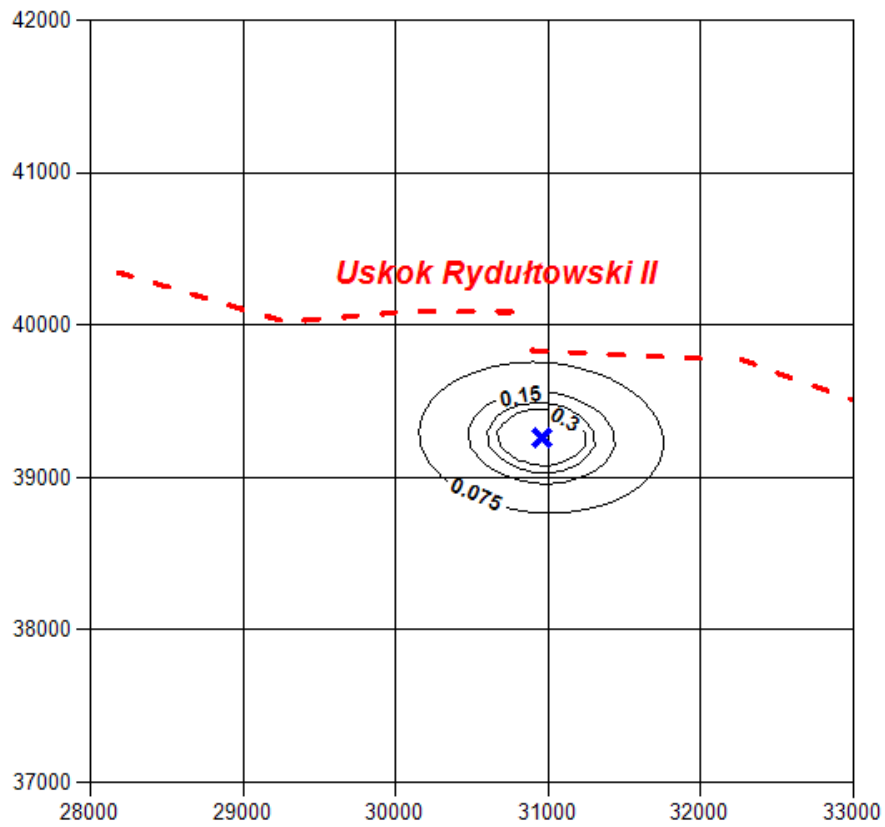
Rys. 9.12. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Czernickiego III, m/s^2



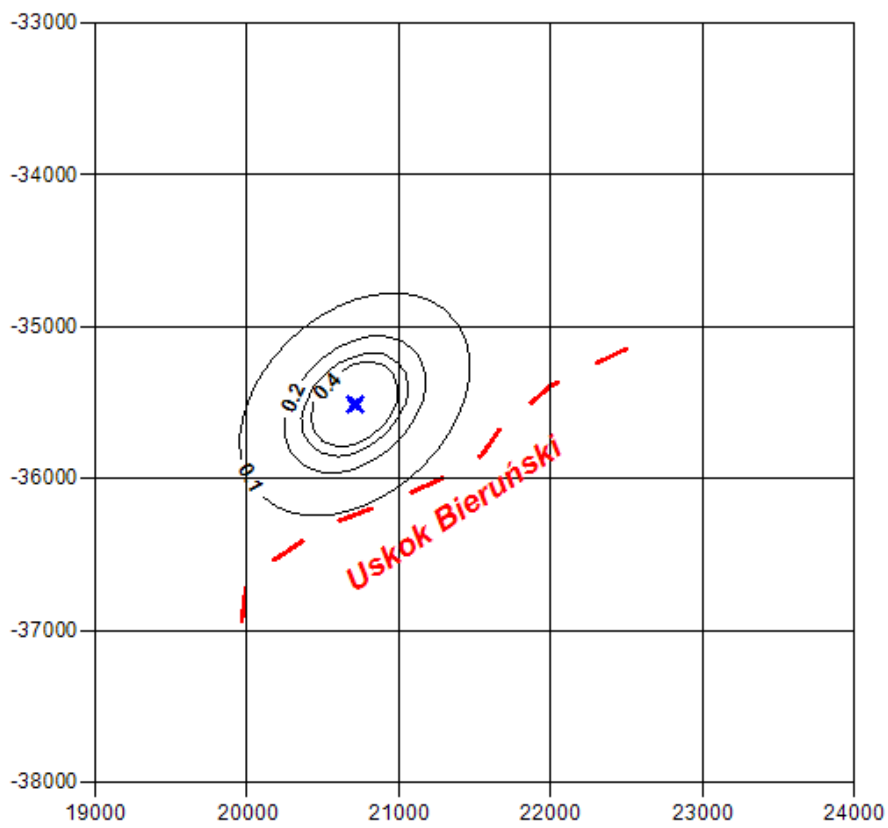
Rys. 9.13. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Kolejowego, m/s^2



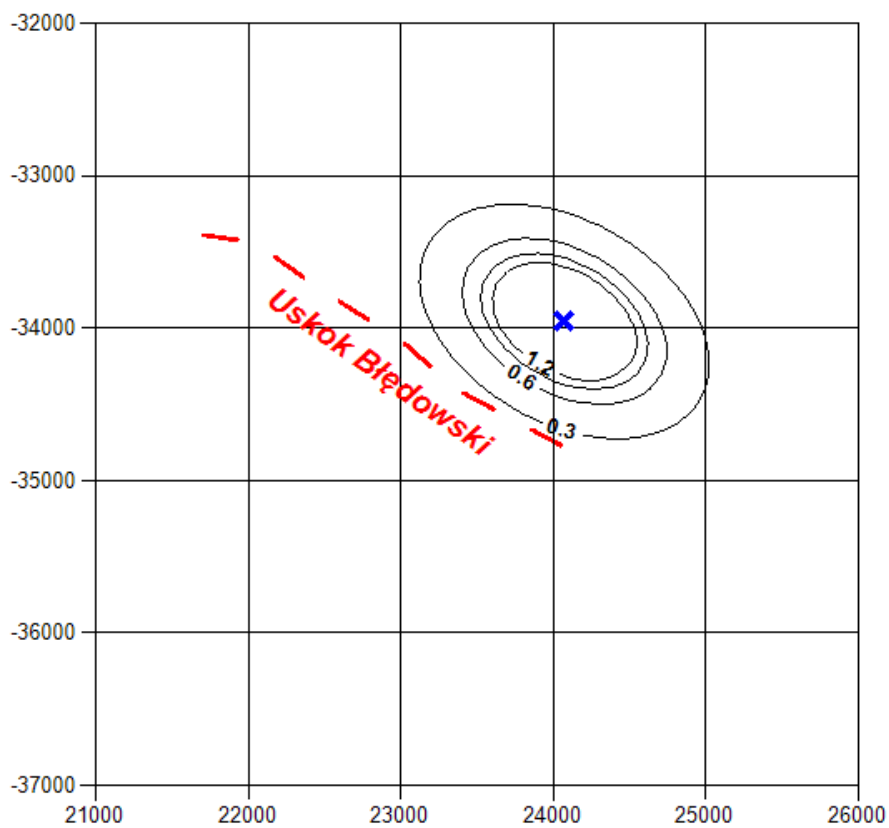
Rys. 9.14. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Leon, m/s^2



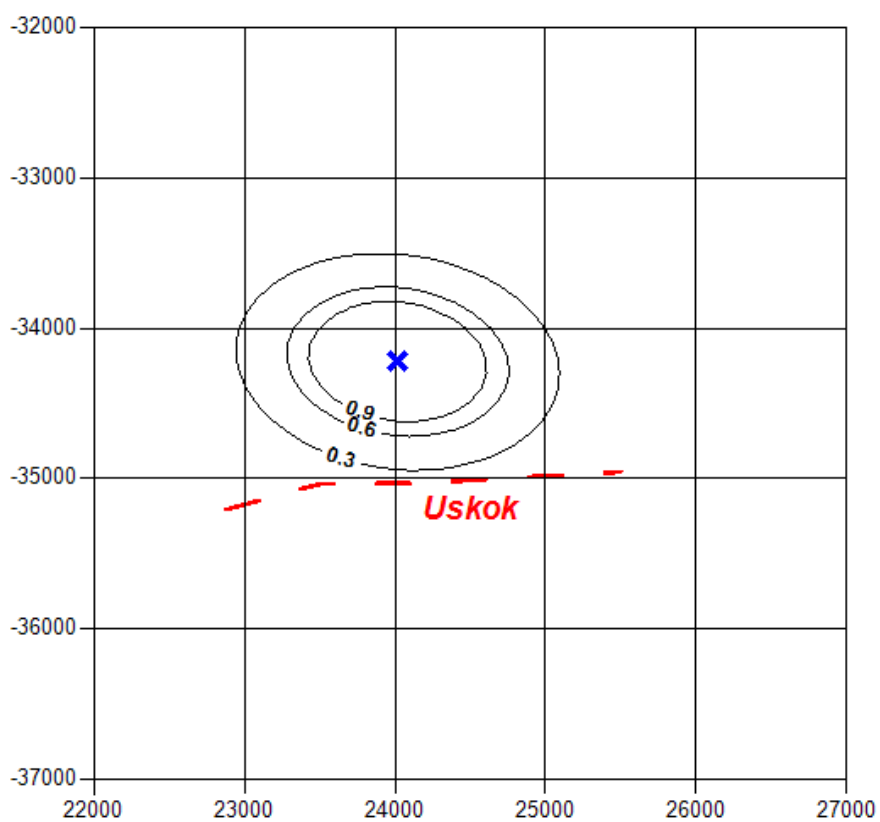
Rys. 9.15. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego II, m/s^2



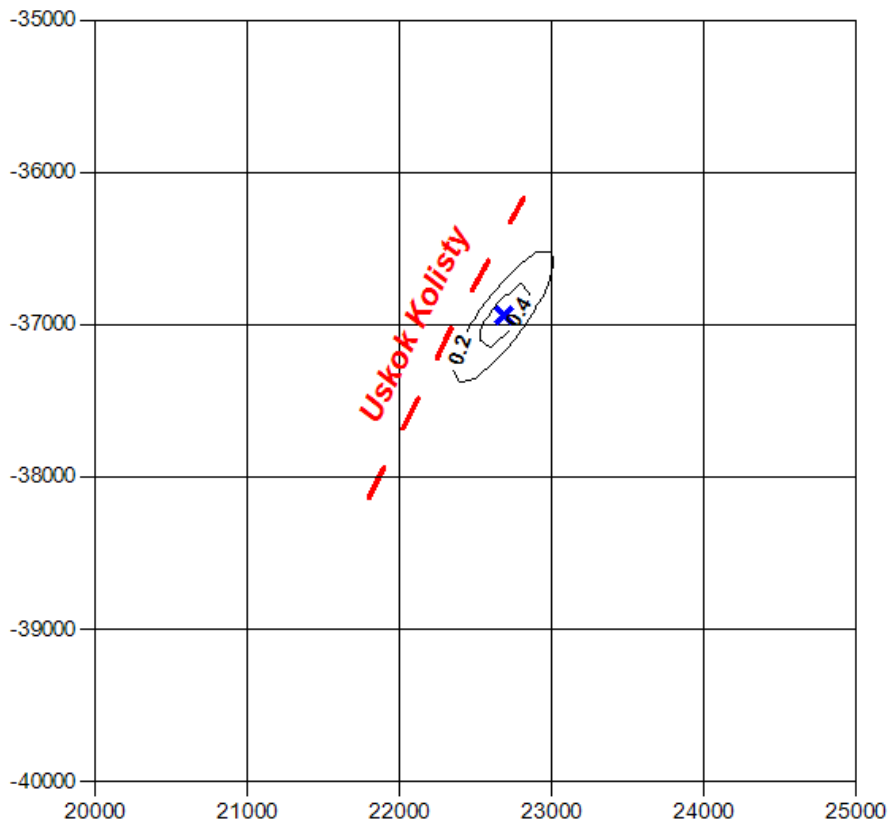
Rys. 9.16. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego, m/s^2



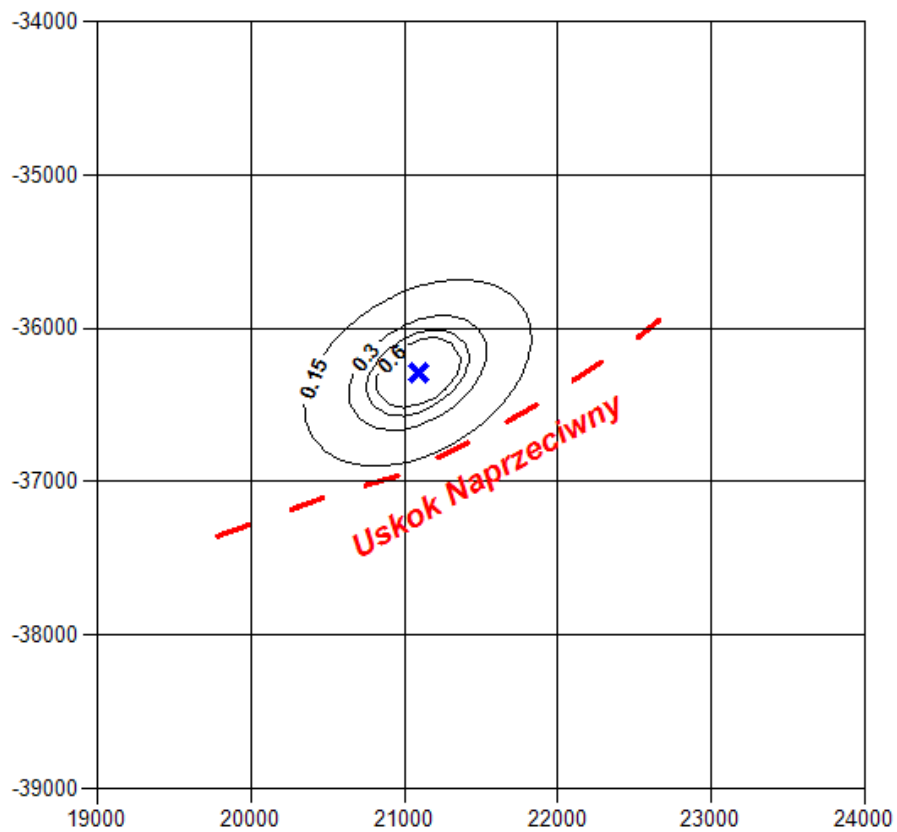
Rys. 9.17. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Bledowskiego, m/s^2



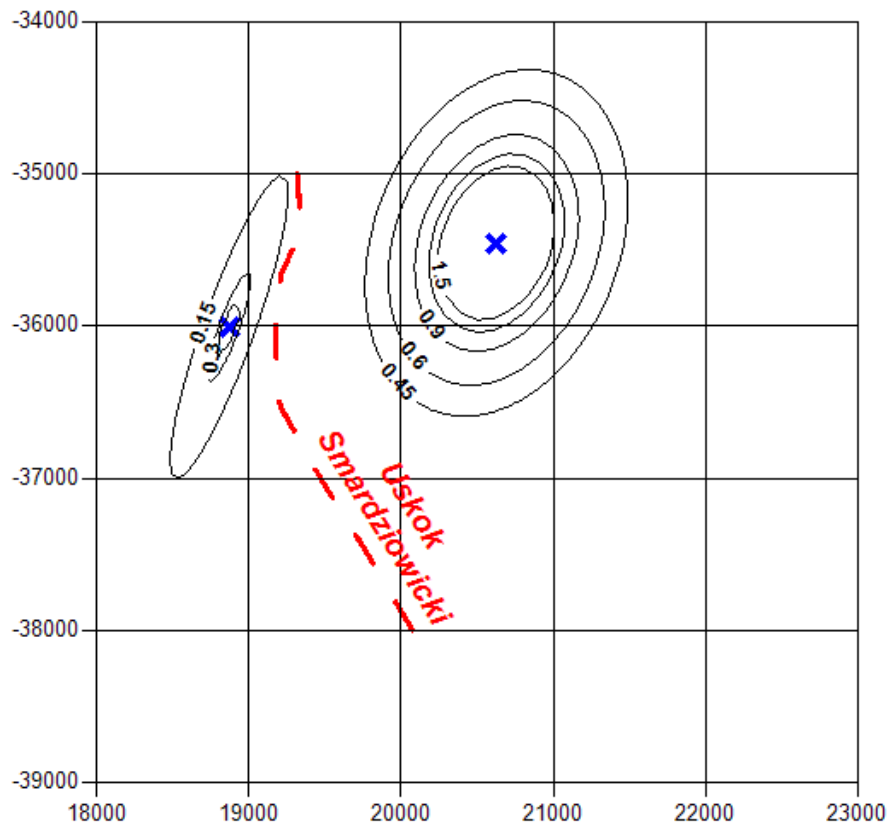
Rys. 9.18. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku (rejon 2), m/s^2



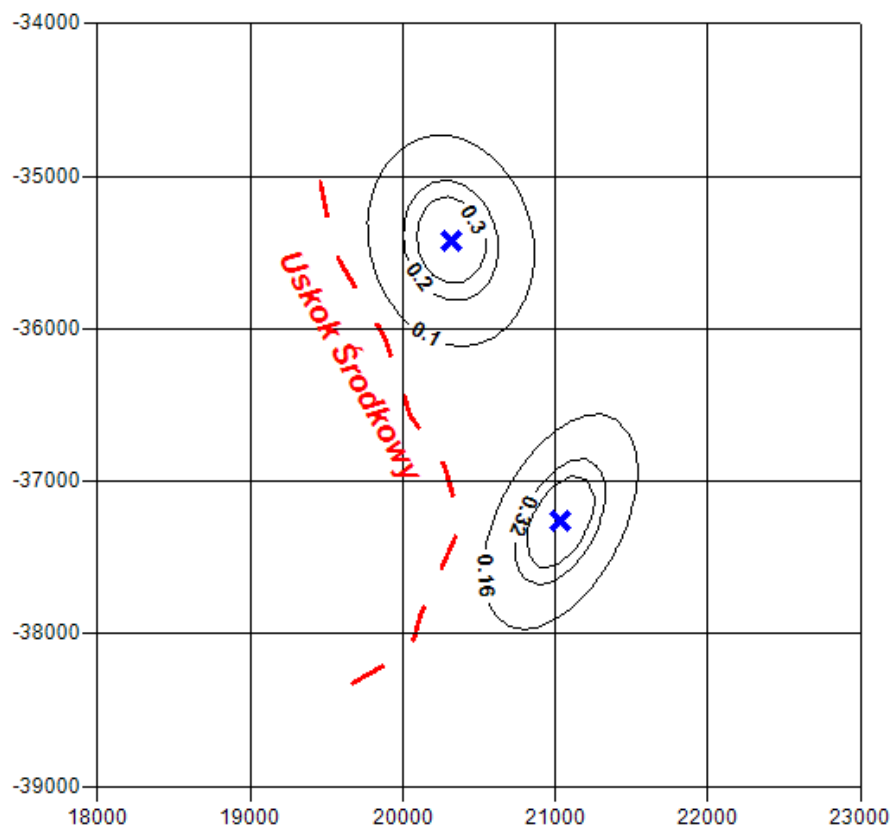
Rys. 9.19. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Kolistego, m/s^2



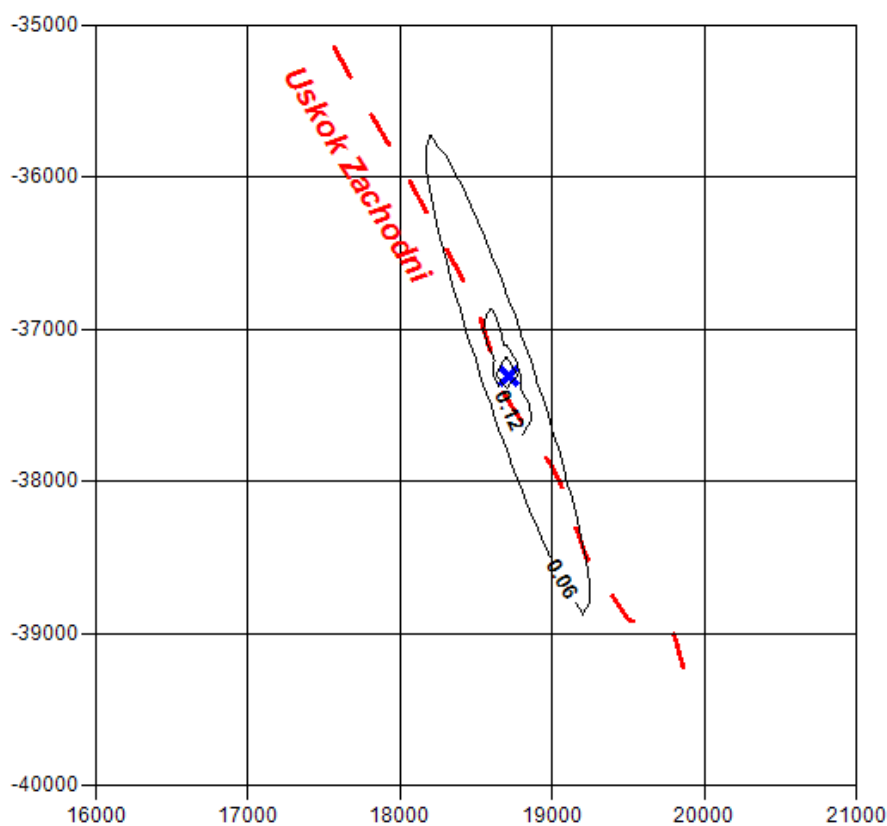
Rys. 9.20. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Naprzeciwnego, m/s^2



Rys. 9.21. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Smardziowickiego, m/s^2



Rys. 9.22. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Środkowego, m/s^2



Rys. 9.23. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Zachodniego, m/s^2

Rysunki 9.11÷9.23 przedstawiają rezultaty obliczeń, które uzyskano dla zbiorów zdarzeń o różnej liczebności. Zgodnie z tab. 9.9 i 9.10 najmniej liczny zbiór zawierał 4 zdarzenia, a najbardziej liczny 58 zdarzeń. We wszystkich przedmiotowych przypadkach wykreślone pola przyspieszeń drgań gruntu wykazują, że wyznaczone parametry równania (9.3) potwierdzają kierunkowość tłumienia drgań zgodną z przebiegiem wybranego uskoku.

W związku ze stwierdzeniem występowania rozkładu pola przyspieszeń drgań gruntu zgodnego z przebiegiem uskoku położonego w bliskim sąsiedztwie epicentrum wstrząsu w kolejnym etapie sprawdzono, czy parametry p i q , odpowiadające za przemieszczenie wzdłuż osi x oraz obrót wokół osi z , są zależne od odległości epicentrum zdarzenia od uskoku, a także azymutu uskoku i jego zrzutu. Ocenie poddano utworzony zbiór danych, wykorzystujący uskoki, w sąsiedztwie których stwierdzono występowanie minimum 10 zdarzeń o kierunkowości rozchodzenia się drgań zgodnej z przebiegiem uskoku. Dla zobrazowania rozkładu parametrów p i q , wyznaczonych za pomocą równania (6.3) na rysunkach 9.24, 9.25 i 9.26 przedstawiono:

- wartości parametru p w zależności od odległości zdarzenia od uskoku (rys. 9.24),

- wartości parametru p w zależności od iloczynu odległości zdarzenia od uskoku i jego zrzutu (rys. 9.25),
- wartości parametru q w zależności od azymutu uskoku (rys. 9.26).

Na każdym powstałym wykresie zaznaczono również linię trendu oraz określono równanie prostej dla podanych danych. Równania te przedstawiają się następująco:

$$p = 7,8318 - 0,0024 Q_u \quad (9.4)$$

$$p = 7,2847 - 0,00001(Q_u \cdot Z_u) \quad (9.5)$$

$$q = 2,2537 - 0,5717 A_u \quad (9.6)$$

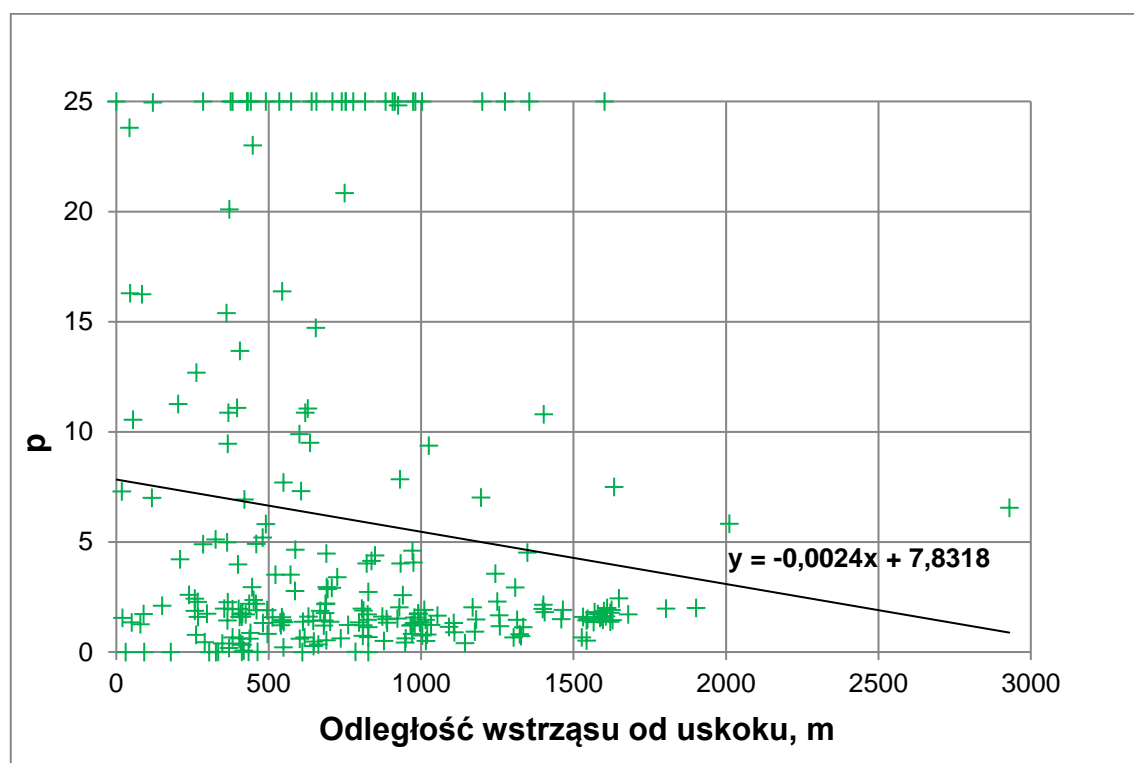
gdzie:

Q_u – odległość zdarzenia od uskoku, m,

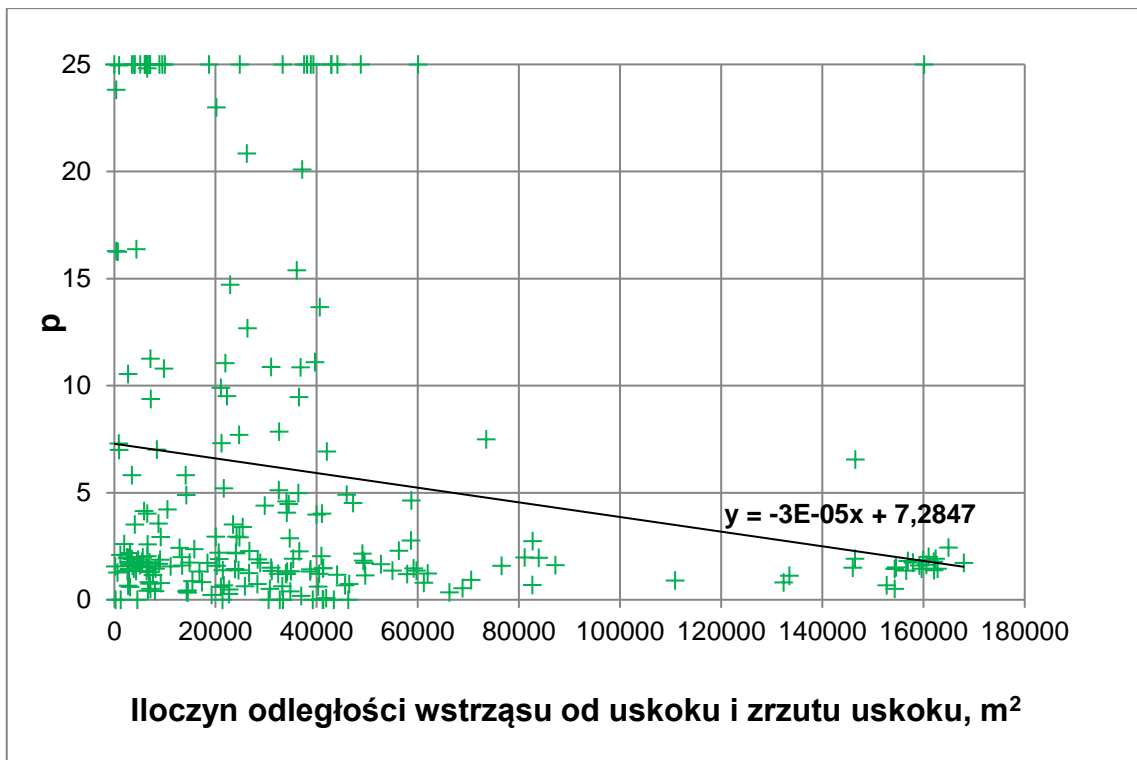
A_u – azymut uskoku, rad

Z_u – zrzut uskoku, m.

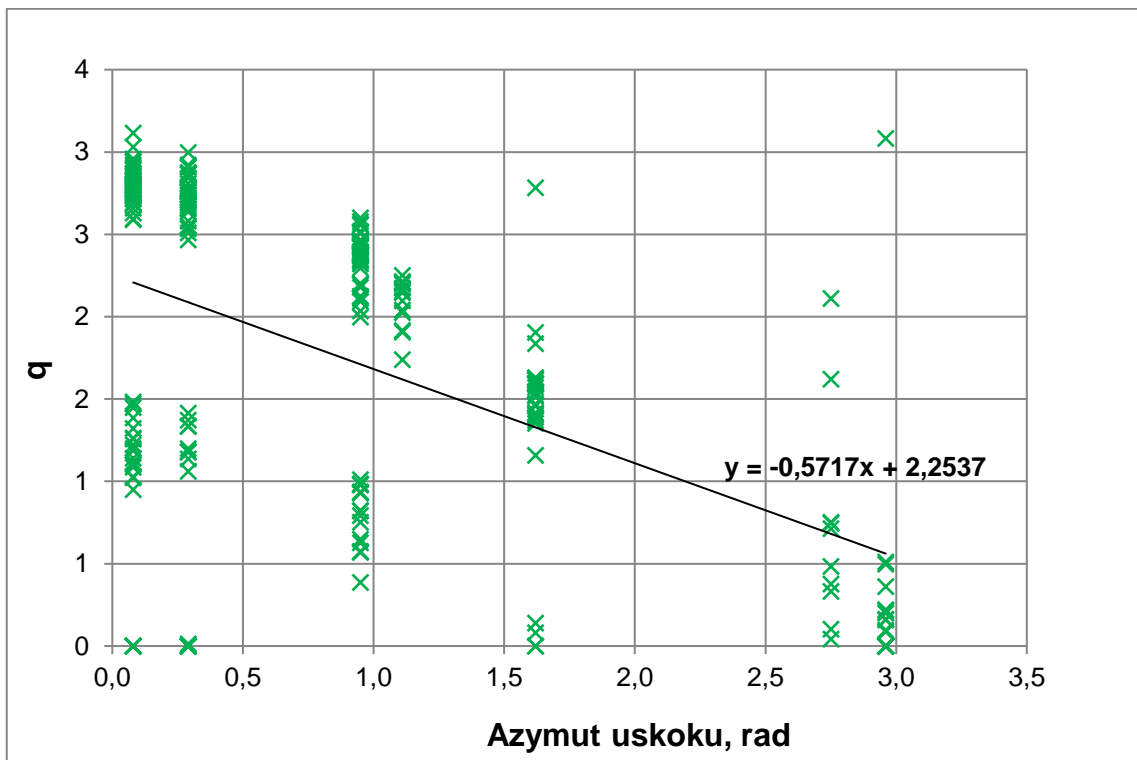
Otrzymane za pomocą równań (9.4, 9.5 i 9.6) wyniki przedstawiono w tab. 9.12.



Rys. 9.24. Zależność parametru p od odległości zdarzenia od uskoku



Rys. 9.25. Zależność parametru p w zależności od iloczynu odległości zdarzenia od uskoku i jego zrzutu



Rys. 9.26. Zależność parametru q od azymutu uskoku

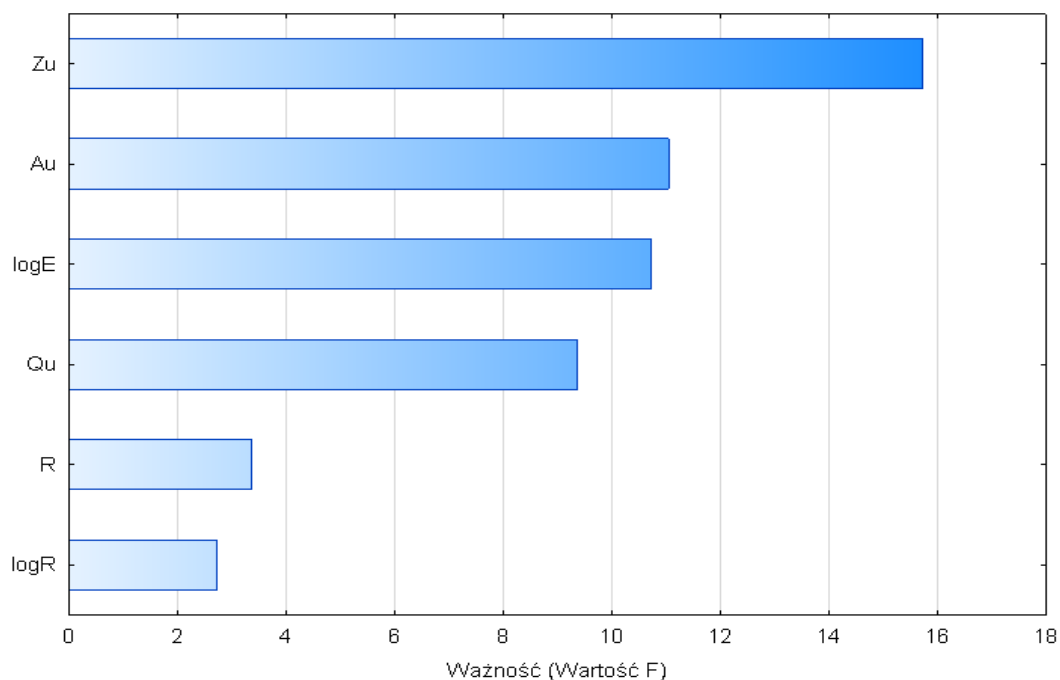
Zależności parametrów p i q od parametrów uskoku

Lp.	Szacowany parametr	Błąd standardowy estymatora s	Współczynnik korelacji r_k	Współczynnik determinacji r^2
Zależność parametru p od odległości wstrząsu od uskoku				
1.	p	8,2027	-0,1326	0,0176
Zależność parametru p od iloczynu odległości wstrząsu od uskoku i zrzutu uskoku				
2.	p	8,1593	-0,1812	0,0328
Zależność parametru q od azymutu uskoku				
3.	q	0,8652	-0,5200	0,2702

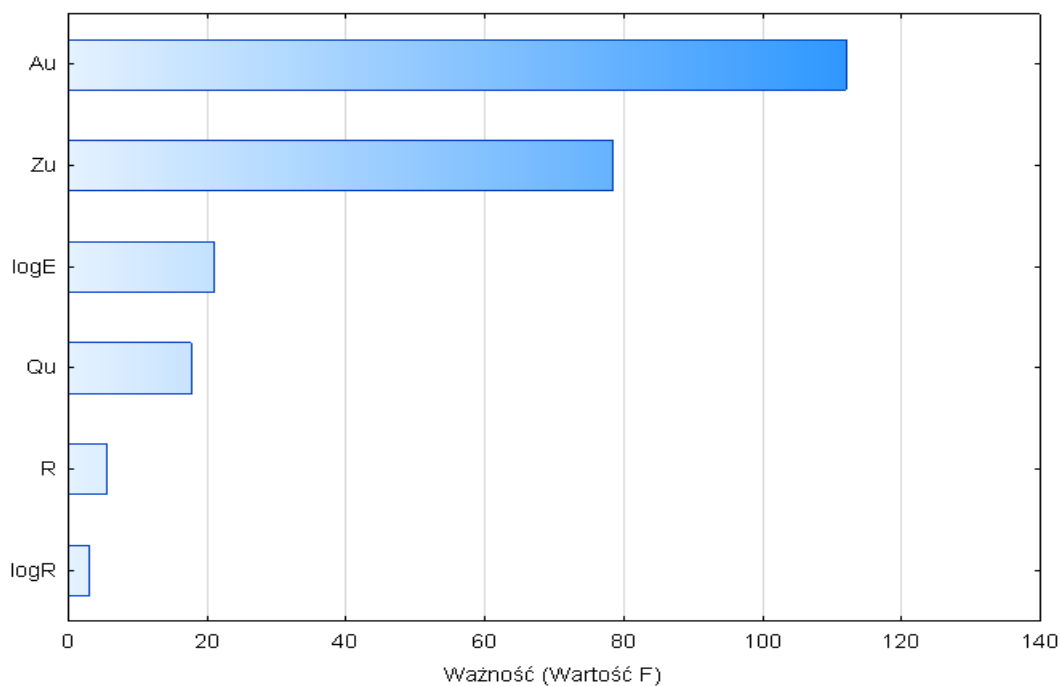
Wykresy nie wykazały prawidłowości w rozkładzie parametru p, zarówno w przypadku oceny tego parametru w stosunku do odległości zdarzenia od uskoku, jak i w stosunku do iloczynu odległości zdarzenia od uskoku i zrzutu uskoku. W przypadku parametru q stwierdzono, że jego wartość, poza kilkoma obserwacjami odstającymi, maleje wraz ze wzrostem azymutu uskoku.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że w stosunkowo niewielkich zbiorach danych, błąd standardowy estymatora parametru p dla wszystkich przypadków jest wysoki, przy niskim i bardzo niskim poziomie współczynnika korelacji i współczynnika determinacji. W przypadku zależności parametru q od azymutu uskoku stwierdzono, że błąd standardowy estymatora, mimo że kilkakrotnie niższy niż dla parametru p, również jest względnie wysoki, jednak zaobserwowano występowanie słabej korelacji ujemnej. Znajduje to potwierdzenie na wykresie (rys. 9.26), gdzie, poza pojedynczymi obserwacjami odstającymi, można zaobserwować zmniejszanie się wartości parametru q wraz ze wzrostem wartości azymutu uskoku.

Dodatkowo sprawdzono ważność zmiennych zależnych, wpływających na wartości parametrów p i q, za pomocą określenia częściowej statystyki F. Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 9.27. i 9.28.



Rys. 9.27. Ważność zmiennych niezależnych dla zmiennej zależnej p



Rys. 9.28. Ważność zmiennych niezależnych dla zmiennej zależnej q

Z wykresów otrzymanych za pomocą określenia częściowej statystyki F wynika, że uzyskane rezultaty są zbieżne z wynikami przedstawionymi na wykresach z rys. 9.24, 9.25 i 9.26. Zmienna p wykazała największą zależność od rzutu uskoku, jednak związek ten nie jest silny, zaś zmienna q wykazała największą zależność od azymutu uskoku, przy stosunkowo wysokiej wartości tej zależności.

W związku z powyższym uznano, że nie występuje związek między parametrem p równania w modelu anizotropowym, odpowiadającym za przemieszczenie wzdłuż osi x a odległością zdarzenia od uskoku oraz zrzutem uskoku, a także, że parametr q , odpowiedzialny za obrót wokół osi z ma związek z wartością azymutu uskoku. Zależność ta wymaga dalszych, bardziej szczegółowych badań, jednak pozwala stwierdzić, iż pomimo przyjętych założeń upraszczających kierunkowość rozchodzenia się fal jest zależna od uskoków występujących w bliskiej odległości od wstrząsu.

9.4. *Możliwość poprawy opisu pola przyspieszeń drgań przy wykorzystaniu sieci neuronowych*

Sprawdzenie możliwości wykorzystania sieci neuronowych do prognozy rozkładu pola maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań przeprowadzono dla wybranych zbiorów, w których stwierdzono występowanie minimum 20 zdarzeń o kierunkowości rozchodzenia się fali sejsmicznej generowanej wstrząsami górotworu indukowanymi prowadzonymi robotami górniczymi zgodnej z przebiegiem uskoku w bliskim sąsiedztwie. Jak podano wcześniej, w każdym zbiorze przyjęto takie same założenia: sieć MLP z minimalnie 1 i maksymalnie 11 neuronami w warstwie ukrytej, o funkcjach aktywacji: liniowa, logistyczna, tangens hiperboliczny, wykładnicza i sinus. Przyjęto, że 70% rejestracji to zbiór uczący, 15% to zbiór testowy i 15% - zbiór walidacyjny. Wykorzystano dane pochodzące z aparatury pomiarowej obu rejonów, analogiczne jak przy równaniu regresji (energię zdarzenia i odległość epicentralną zdarzenia od stanowiska pomiarowego) a także dwa parametry łączące wybrane zdarzenia z uskokiem w niedalekim sąsiedztwie. Pierwszy z nich to odległość zdarzenia od uskoku a drugi to kąt zawarty między uskokiem a prostą łączącą ognisko zdarzenia ze stanowiskiem. Wyniki uczenia sieci dla każdego ze zbiorów przedstawiono w tab. 9.13.

Tab. 9.13

Ocena jakości symulacji przy zastosowaniu sieci neuronowych

Nazwa uskoku	Liczba zdarzeń	Rodzaj sieci	Błąd standardowy estymatora s	Współczynnik korelacji r_k	Współczynnik determinacji r^2
Bez nazwy (rejon 1)	22	MLP 5-10-1	0,0149	0,9363	0,8766
Leon	51	MLP 5-8-1	0,0391	0,8895	0,7912
Rydułtowski II	29	MLP 5-9-1	0,0310	0,9783	0,9570
Bieruński	58	MLP 5-3-1	0,0796	0,8993	0,8088
Smardziowicki	29	MLP 5-11-1	0,0876	0,9562	0,9142
	32	MLP 5-10-1	0,0497	0,9474	0,8975

Dla porównania rezultatów uzyskanych za pomocą analizy regresji oraz przy wykorzystaniu sieci neuronowych w tab. 9.14. zestawiono sumę kwadratów błędów dla tych samych zbiorów danych.

Tab. 9.14

Porównanie wyników uzyskanych przy zastosowaniu analizy regresji oraz sieci neuronowych

Nazwa uskoku	Liczba zdarzeń	Suma kwadratów błędów SSE	
		Analiza regresji	Sieci neuronowe
Bez nazwy (rejon 1)	22	0,0542	0,0187
Leon	51	0,2275	0,1286
Rydułtowski II	29	0,5210	0,0809
Bieruński	58	0,8610	0,5329
Smardziowicki	29	10,4004	0,6439
	32	0,4284	0,2076

Dla rozpatrywanych 6 zbiorów danych, we wszystkich przypadkach zastosowanie sieci neuronowych znacznie poprawiło uzyskane wyniki, pozwalając na nawet szesnastokrotne zmniejszenie sumy kwadratów błędów (zbiór 29 zdarzeń o kierunkowości tłumienia drgań zgodnej z przebiegiem Uskoku Smardziowickiego).

Wartości współczynnika korelacji i współczynnika determinacji, analogicznie jak dla porównania sumy kwadratów błędów, przy zastosowaniu metody analizy regresji osiągnęły niższe wartości niż przy zastosowaniu sieci neuronowych.

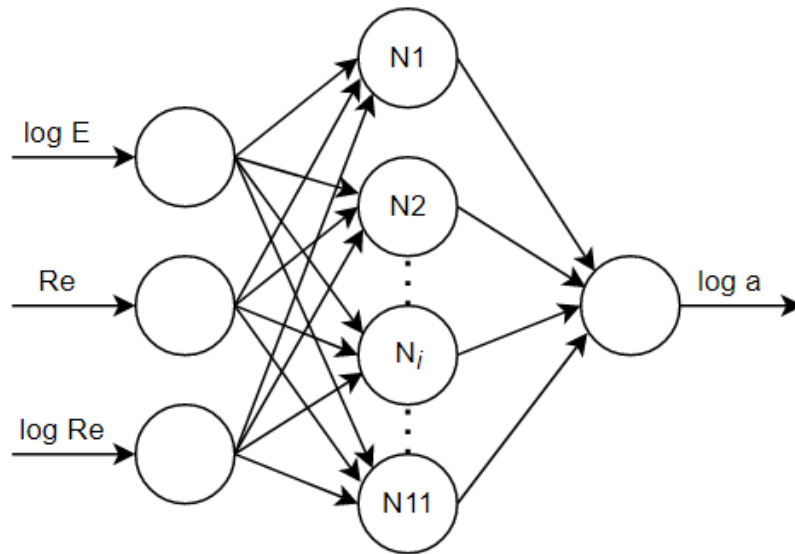
Pozwala to na stwierdzenie, że prawidłowo zaprojektowana sieć neuronowa może z powodzeniem zostać wykorzystana w badaniu zagadnień kierunkowości tłumienia drgań.

W pracy przeprowadzono także dodatkową analizę wykorzystującą sieci neuronowe. Sprawdzono w niej, czy wykorzystanie obliczonych parametrów p i q , odpowiadających za kierunkowość rozchodzenia się fal, pozwala na poprawę opisu pola przyspieszeń drgań gruntu. W celu sprawdzenia możliwości poprawy oszacowania wartości przyspieszeń drgań gruntu utworzono jeden zbiór danych, który składał się ze wszystkich zdarzeń uwzględnionych w tab. 9.13:

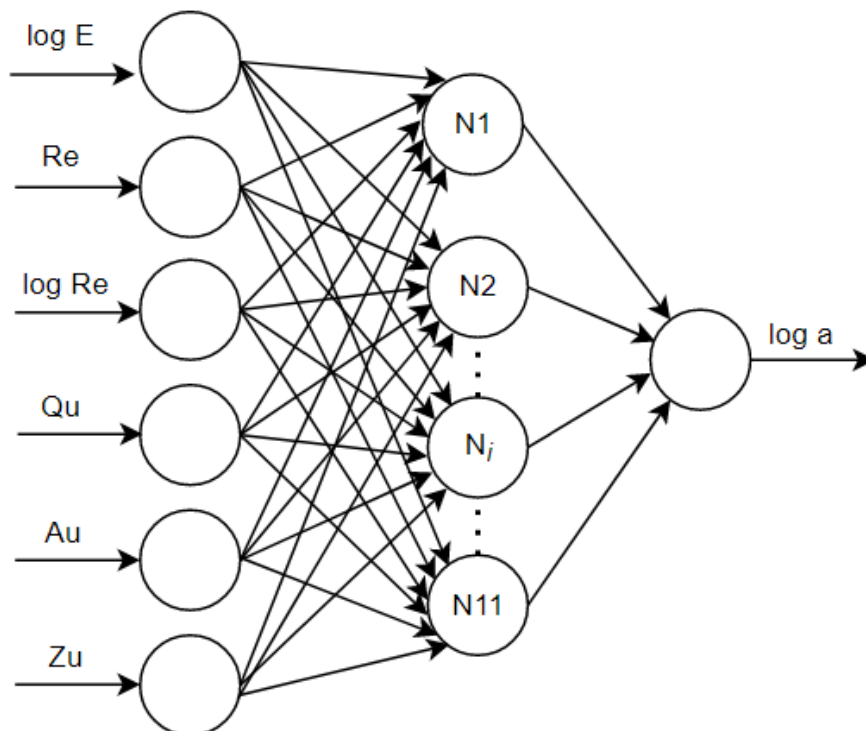
- 1) 22 zdarzenia wykazujące kierunkowość rozchodzenia się drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem uskoku bez nazwy w rejonie 1,
- 2) 51 zdarzeń wykazujących kierunkowość rozchodzenia się drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem uskoku Leon,
- 3) 29 zdarzeń wykazujących kierunkowość rozchodzenia się drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Rydułtowskiego II,
- 4) 58 zdarzeń wykazujących kierunkowość rozchodzenia się drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Bieruńskiego,
- 5) 61 zdarzeń wykazujących kierunkowość rozchodzenia się drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem Uskoku Smardziowickiego (29 zdarzeń znajdujących się po stronie zachodniej uskoku i 32 zdarzenia znajdujących się po stronie wschodniej uskoku).

Analizę przeprowadzono w oparciu o dwa modele. Pierwszy model bazował wyłącznie na danych pochodzących z aparatury pomiarowej kopalń, czyli na energii zdarzenia i odległości epicentralnej od stanowiska pomiarowego. Drugi model został rozszerzony o odległości wstrząsów od uskoków, azymuty uskoków i zrzuty uskoków. Ponownie przyjęto sieć MLP z minimalnie 1 i maksymalnie 11 neuronami w warstwie ukrytej, o wszystkich dostępnych funkcjach aktywacji, z podziałem na zbiór uczący 70%, testo-

wy – 15% i walidacyjny – 15%. Schematy obu modeli przedstawiono na rys. 9.29 i 9.30.

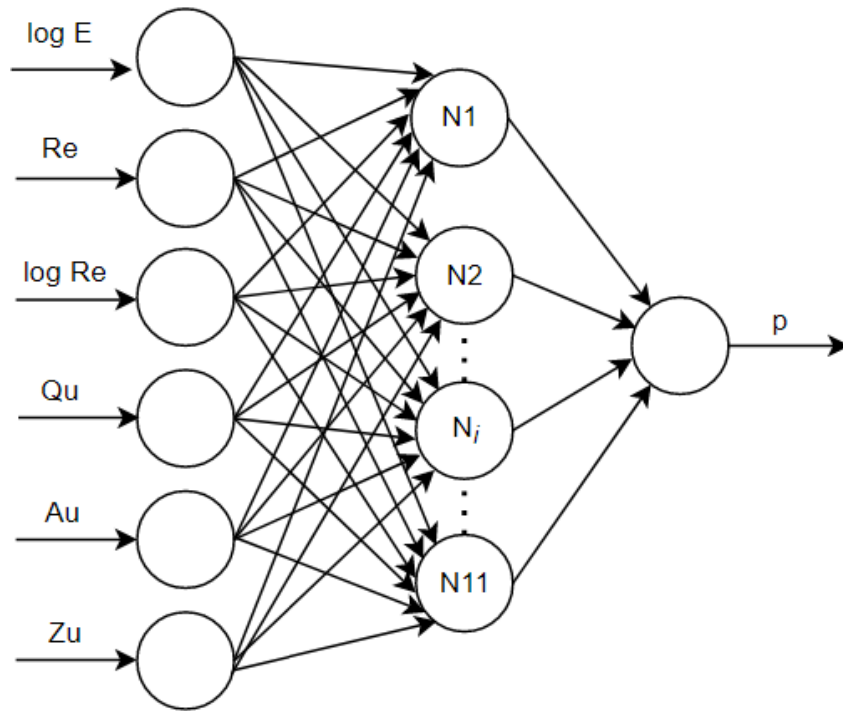


Rys. 9.29. Schemat modelu 1 - sieci neuronowe

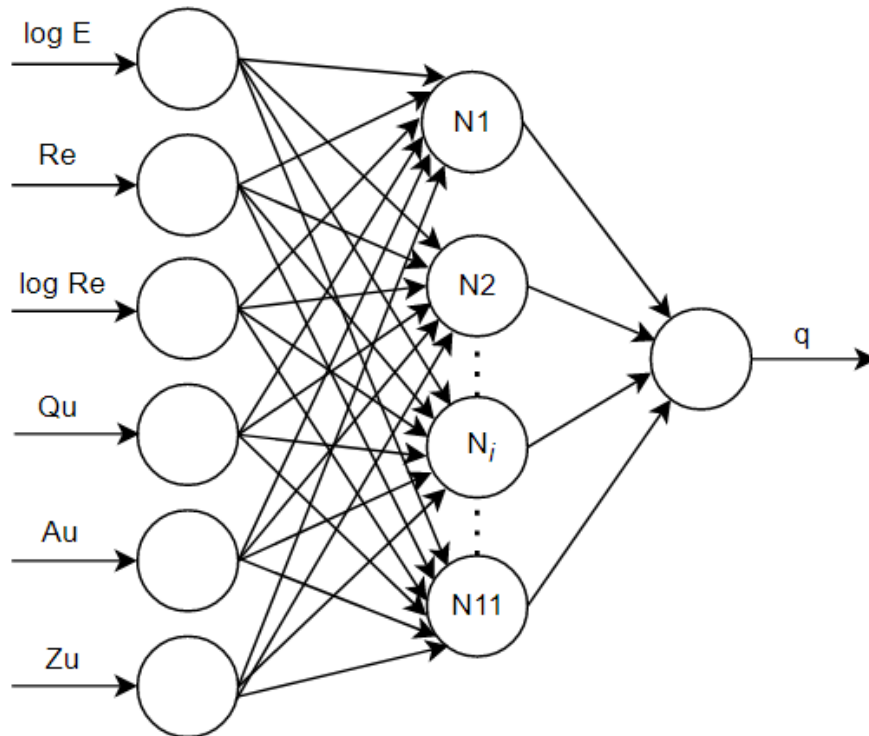


Rys. 9.30. Schemat modelu 2 - sieci neuronowe

Ponadto, na podstawie danych z modelu 2, przeprowadzono analizę wartości wyznaczonych za pomocą równania regresji (6.3) parametrów p (model 2a) i q (model 2b), co schematycznie przedstawiono na rys. 9.31 i 9.32.



Rys. 9.31. Schemat modelu 2a - sieci neuronowe



Rys. 9.32. Schemat modelu 2b - sieci neuronowe

Wyniki analizy dla całego zbioru danych otrzymane za pomocą modeli 1, 2, 2a i 2b przedstawiono w tab. 9.15.

Tab. 9.15

**Ocena możliwości poprawy opisu pola przyspieszeń przy
uwzględnieniu kierunkowości rozchodzenia się fal**

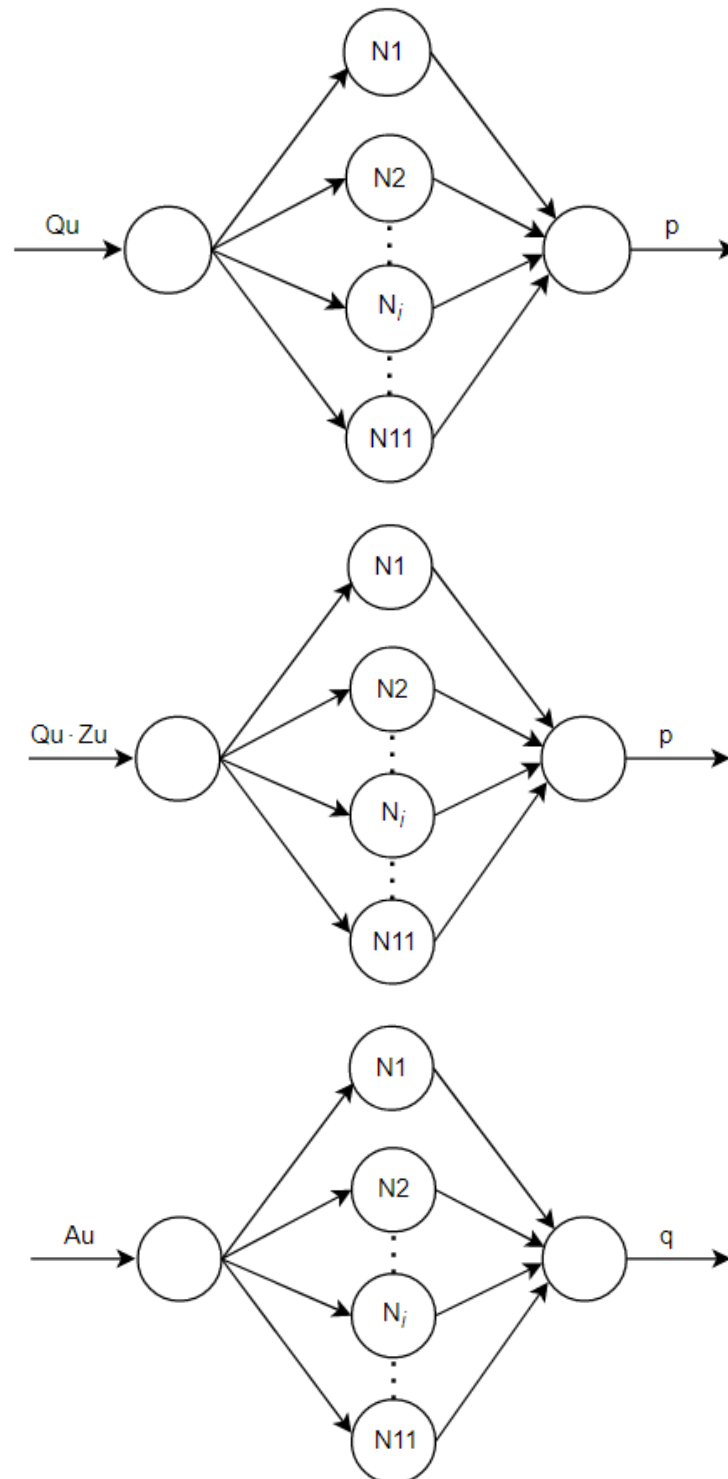
Parametr	Błąd standardowy estymatora s	Współczynnik korelacji r_k	Współczynnik determinacji r^2
model 1			
loga	0,2276	0,8811	0,7764
model 2			
loga	0,2159	0,8940	0,7992
model 2a			
p	5,6972	0,6723	0,4520
model 2b			
q	0,7199	0,6753	0,4561

Prognoza wartości przyspieszeń drgań gruntu wykazała, że wyniki otrzymane przy zastosowaniu modelu, w którym wykorzystano wyłącznie energię wstrząsu oraz odległość epicentralną zdarzenia od uskoku są bardzo zbliżone do wyników otrzymanych przy zastosowaniu modelu, który rozszerzono o dodatkowe parametry w postaci odległości zdarzenia od uskoku, azymutu uskoku i zrzutu uskoku. Zgodnie z danymi zawartymi w tab. 9.15 model 2 jest nieznacznie lepszy od modelu 1, a wartości błędu standardowego estymatora oraz współczynnika korelacji i współczynnika determinacji są porównywalne.

Dodatkowo stwierdzono, że dla posiadanych zbiorów danych, zastosowanie sieci neuronowej do prognozy wartości parametru p, odpowiedzialnego za przemieszczenie wzdłuż osi x, który w przyjętym modelu jest zależny od energii wstrząsu oraz odległości epicentralnej wstrząsu od stanowiska pomiarowego, a także parametrów związanych z dopasowanymi uskokami w postaci: odległości wstrząsu od uskoku, azymutu uskoku i zrzutu uskoku, nie pozwala na uzyskanie satysfakcjonujących wyników. W tym przypadku błąd standardowy estymatora s jest na nieakceptowalnie wysokim poziomie. Równocześnie ten sam model wykorzystany do prognozy wartości parametru q, odpowiedzialnego za obrót wokół osi z, umożliwił uzyskanie stosunkowo niskiego błędu standardowego estymatora s. Wartość współczynnika korelacji i współczynnika determinacji, zarówno dla modelu, w którym analizowano wartości parametru p, jak i dla

modelu, w którym analizie poddano parametr q , jest na podobnym poziomie, wynoszącym 0,7, co oznacza występowanie dość silnej korelacji dodatniej.

Ponadto sprawdzono możliwość określenia parametrów p i q za pomocą zmiennych wykorzystanych w równaniu 9.4, 9.5 i 9.6. Schematy zastosowanych w tym celu sieci przedstawiono na rys. 9.33.



Rys. 9.33. Schematy sieci neuronowych do wyznaczenia parametrów p i q

Wyniki estymacji parametru p w zależności od odległości zdarzenia od uskoku oraz w zależności od iloczynu odległości zdarzenia od uskoku i zrzutu uskoku oraz parametru q w zależności od azymutu uskoku zostały przedstawione w tab. 9.16.

Tab. 9.16

Zależności parametrów p i q od parametrów uskoku

Parametr	Błąd standardowy estymatora s	Współczynnik korelacji r_k	Współczynnik determinacji r^2
zależność parametru p od odległości zdarzenia od uskoku			
p	7,1603	0,3627	0,1315
zależność parametru p od iloczynu odległości zdarzenia od uskoku i zrzutu uskoku			
p	6,7220	0,4940	0,2441
zależność parametru q od azymutu uskoku			
q	0,8725	0,4438	0,1969

Uzyskane rezultaty pozwalają stwierdzić, że sieci neuronowe mogą zostać z powodzeniem zastosowane do prognozy przyspieszeń drgań gruntu. W wyniku przeprowadzonych analiz uzyskano bardziej precyzyjny opis dla przypadków zbiorów, w których stwierdzono występowanie minimum 20 zdarzeń o kierunkowości rozchodzenia się fali sejsmicznej generowanej wstrząsami górotworu indukowanymi prowadzonymi robotami górniczymi zgodnej z przebiegiem uskoku w bliskim sąsiedztwie. Stwierdzono również, że rozszerzenie modelu podstawowego o dodatkowe parametry nie przyniosło znaczącej poprawy prognozowanych rezultatów. Oba modele charakteryzują się podobną wartością błędu standardowego estymatora oraz współczynnika korelacji. Oszacowanie wartości parametrów p i q przy pomocy sieci neuronowych również uległo tylko nieznacznej poprawie. Zdecydowanie lepsze wyniki uzyskano zaś dla wartości współczynników korelacji i determinacji.

10. Przykład praktycznego zastosowania wybranych modeli uwzględniających kierunkowość tłumienia drgań

Przeprowadzone analizy, których rezultaty zaprezentowano w rozprawie, miały na celu ocenę możliwości poprawy opisu pola przyspieszeń przy uwzględnieniu kierunkowości tłumienia drgań, zależnej od właściwości uskoku znajdującego się w bliskim sąsiedztwie epicentrum wstrząsu.

Dla sprawdzenia możliwości zastosowania uzyskanych rezultatów przeprowadzono dwie symulacje, z wykorzystaniem metody analizy regresji oraz za pomocą sieci neuronowej.

Wykorzystano po jednym zdarzeniu z każdego rejonu. Oba zdarzenia zostały zarejestrowane przez aparaty pomiarowe kopalń, jednak nie zostały uwzględnione na żadnym z etapów prowadzonych w rozprawie obliczeń, z uwagi na fakt, że rejestracje te odnotowano na mniej niż 4 stanowiskach dla rejonu 1, i na mniej niż 8 stanowiskach dla rejonu 2.

Zdarzenie 1, o energii $4,59E+05$ J i epicentrum o współrzędnych (31782; 40087) wystąpiło 29.01.2013 r. w rejonie 1, w odległości 296 m od Uskoku Rydułtowskiego II i zostało zarejestrowane przez 3 stanowiska pomiarowe na powierzchni.

Zdarzenie 2, o energii $9,00E+05$ J i epicentrum o współrzędnych (20358; -35751) wystąpiło 27.02.2016 r. w rejonie 2, w odległości 746 m od Uskoku Bieruńskiego i zostało zarejestrowane przez 7 stanowisk pomiarowych na powierzchni.

Pierwsza symulacja bazowała na wynikach otrzymanych za pomocą analizy regresji, przy wykorzystaniu zmodyfikowanej postaci relacji tłumienia. Równania te, dla wybranych uskoków przyjmują postać:

- dla zdarzeń w rejonie Uskoku Rydułtowskiego

$$\log a = 0,47 \log E - 1,36 \log R^* \quad (10.1)$$

- dla zdarzeń w rejonie Uskoku Bieruńskiego:

$$\log a = 0,43 + 0,45 \log E - 1,41 \log R^* \quad (10.2)$$

Na podstawie równania (10.1) dla zdarzenia 1 i równania (10.2) dla zdarzenia 2 oszacowano wartości przyspieszeń drgań gruntu w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej.

Otrzymane wartości przyspieszeń drgań gruntu dla wszystkich stanowisk pomiarowych zestawiono z wartościami zaobserwowanymi, zarejestrowanymi na tych stanowiskach po wystąpieniu zdarzenia.

Rezultaty przedstawiono w tab. 10.1 dla zdarzenia 1, w rejonie Uskoku Rydułtowskiego II i tab. 10.2 dla zdarzenia 2, w rejonie uskoku Bieruńskiego.

Tab. 10.1

Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą analizy regresji przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego II

Stanowisko	$a_{obl}, m/s^2$	$a_{obs}, m/s^2$
Amax1	0,0087	0,0131
Amax2_2	0,0046	bd.
Amax3	0,0350	0,0334
Amax4_2	0,0128	0,0243
Amax5	0,0337	bd.

Tab. 10.2

Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą analizy regresji przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego

Stanowisko	$a_{obl}, m/s^2$	$a_{obs}, m/s^2$
ARP 1	0,0146	0,0182
ARP 2	0,0036	0,0082
ARP 3	0,0123	0,0155
ARP 4	0,0605	0,1684
ARP 5	0,0149	0,0135
ARP 6	0,0052	bd.
ARP 7	0,0043	bd.
ARP 8	0,0028	bd.

Stanowisko	$a_{obl}, m/s^2$	$a_{obs}, m/s^2$
ARP 9	0,0048	0,0097
ARP 10	0,0063	bd.
ARP 11	0,0097	bd.
ARP 12	0,0043	bd.
ARP 13	0,0029	bd.
ARP 14	0,0308	0,0516

Stwierdzono, że uzyskane wyniki są zbliżone do wartości zaobserwowanych, a otrzymane wartości błędów predykcji są porównywalne z błędami uzyskiwanymi w przypadku rozpatrywania każdego zdarzenia oddzielnie. Można zatem uznać, że wyznaczone parametry równań kierunkowych mogą zostać z powodzeniem wykorzystane do analizy przyszłych zdarzeń występujących w sąsiedztwie uskoków.

Druga symulacja została przeprowadzona przy wykorzystaniu sieci neuronowych. Wykorzystano sieć uwzględniającą anizotropowy charakter ośrodka skalnego, dla której wejściami ilościowymi są: energia wstrząsu i odległość epicentralna zdarzenia oraz parametry łączące wybrane zdarzenia z uskokiem w niedalekim sąsiedztwie (odległość zdarzenia od uskoku i kąt zawarty między uskokiem a prostą łączącą ognisko zdarzenia ze stanowiskiem). Wartości oszacowanych przyspieszeń drgań gruntu na każdym stanowisku aparatury pomiarowej zestawiono z wartościami zaobserwowanymi, zarejestrowanymi po wystąpieniu zdarzenia. Wyniki przedstawiono w tab. 10.3 dla zdarzenia 1, w rejonie Uskoku Rydułtowskiego II i tab. 10.4 dla zdarzenia 2 w rejonie Uskoku Bieruńskiego.

Tab. 10.3

Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą sieci neuronowych przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia 1

Stanowisko	$a_{obl}, m/s^2$	$a_{obs}, m/s^2$
Amax1	0,0139	0,0131
Amax2_2	0,0087	bd.
Amax3	0,0183	0,0334
Amax4_2	0,0132	0,0243
Amax5	0,0435	bd.

Tab. 10.4

Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą sieci neuronowych przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia 2

Stanowisko	$a_{obl}, m/s^2$	$a_{obs}, m/s^2$
ARP 1	0,0132	0,0182
ARP 2	0,0072	0,0082
ARP 3	0,0074	0,0155
ARP 4	0,1153	0,1684
ARP 5	0,0104	0,0135
ARP 6	0,0068	bd.
ARP 7	0,0081	bd.
ARP 8	0,1310	bd.
ARP 9	0,0064	0,0097
ARP 10	0,0364	bd.
ARP 11	0,0111	bd.
ARP 12	0,0067	bd.
ARP 13	0,0110	bd.
ARP 14	0,0345	0,0516

Uzyskane wartości przyspieszeń drgań gruntu są zbliżone do wyników uzyskanych za pomocą analizy regresji, co również potwierdza, że odpowiednio wytrenowaną sieć można zastosować w przypadku nowych zdarzeń. Dla zobrazowania powyższego, w tab. 10.5 przedstawiono sumę uzyskanych wartości błędów średniokwadratowych dla obu zdarzeń.

Tab. 10.5

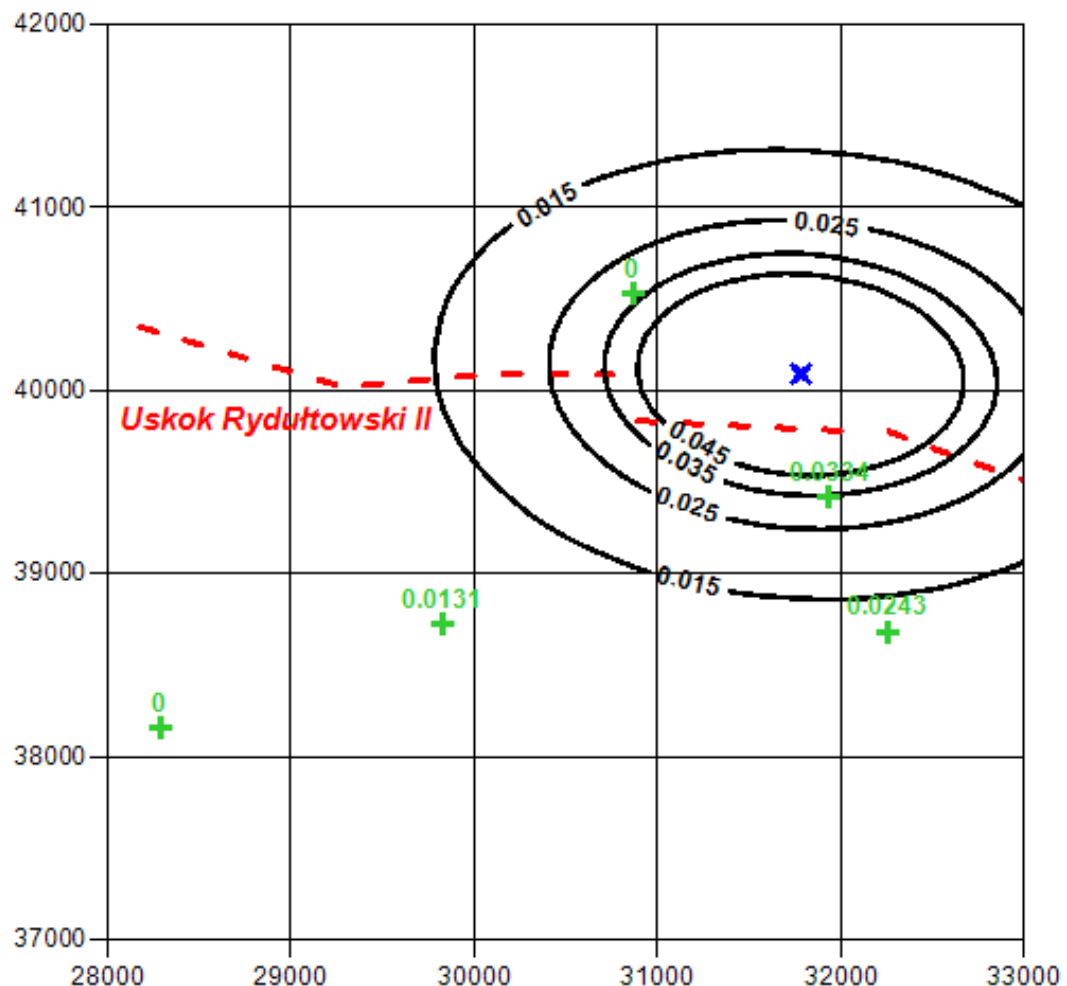
Porównanie wartości błędów średniokwadratowych wyników uzyskanych za pomocą analizy regresji i sieci neuronowych

Zdarzenie	SSE – analiza regresji	SSE – sieci neuronowe
Zdarzenie 1	0,0002	0,0004
Zdarzenie 2	0,0121	0,0032

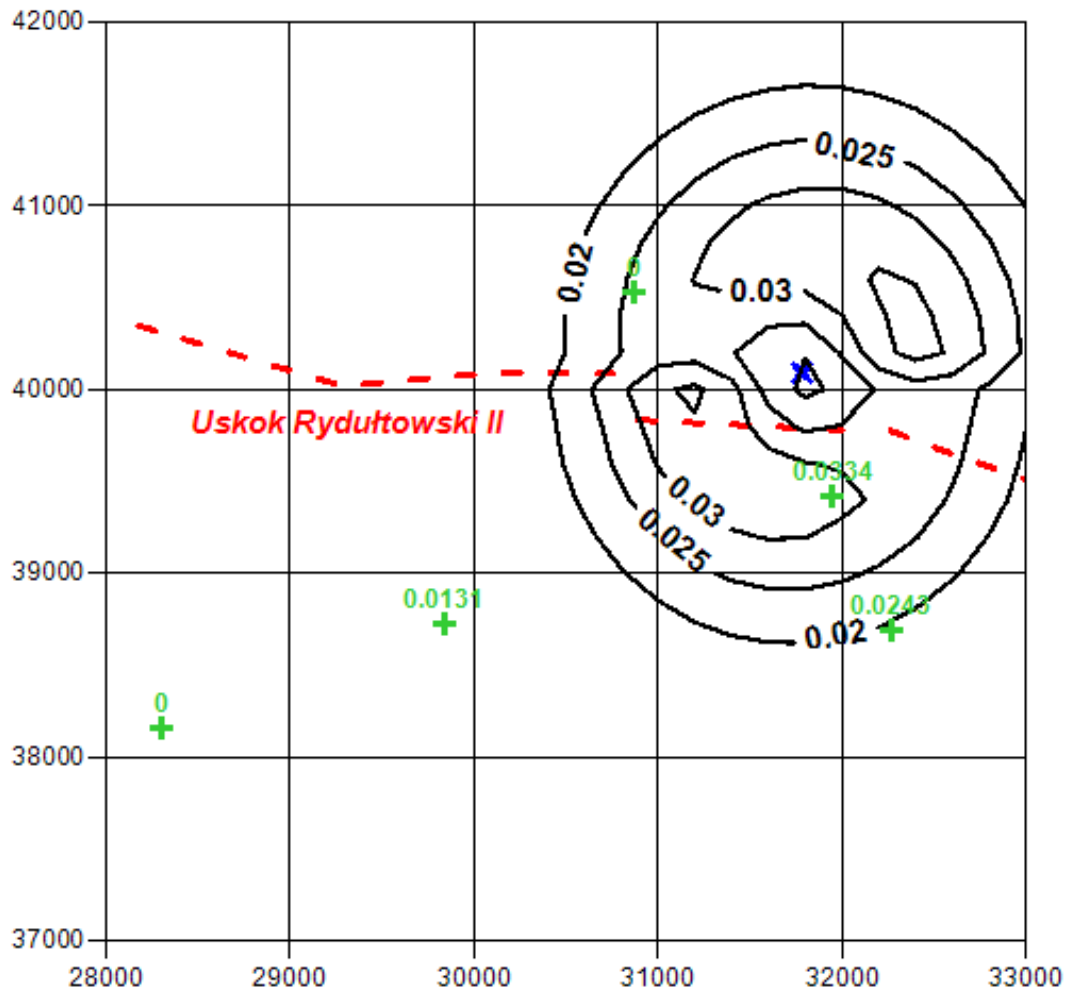
W przypadku zdarzenia 1, z rejonu 1, analiza regresji wykazała nieco lepsze dopasowanie do wartości obserwowanych niż sieci neuronowe. W przypadku zdarzenia 2,

z rejonu 2 analiza przeprowadzona za pomocą sieci neuronowych zdecydowanie poprawiła rezultaty uzyskane za pomocą analizy regresji. Akceptowalnie małe wartości błędów wykazują, że możliwe jest wykorzystanie otrzymanych w pracy rezultatów do przyszłych analiz.

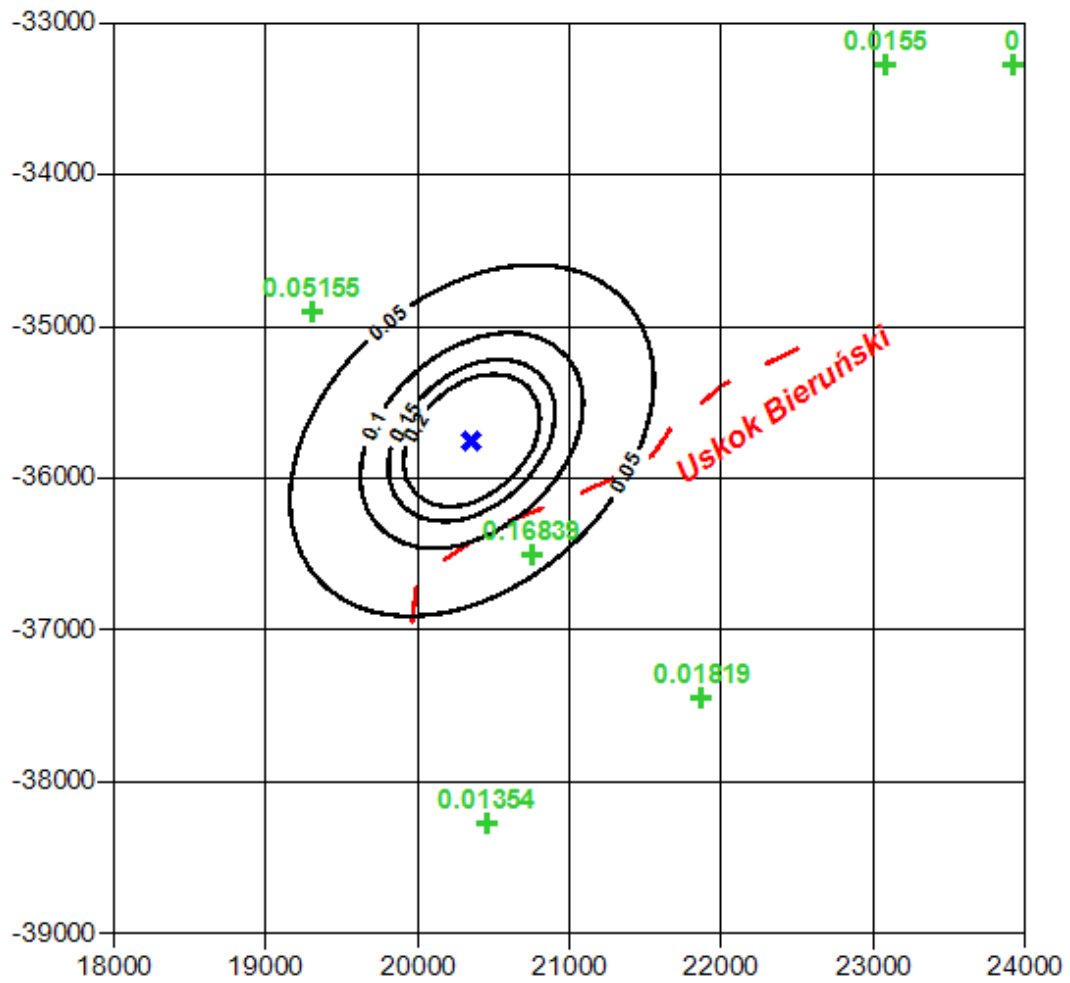
Dodatkowo, dla zobrazowania uzyskanych rezultatów, wykreślono rozkłady pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskane przy wykorzystaniu analizy regresji, przy zastosowaniu zmodyfikowanej postaci relacji tłumienia, uwzględniającej kierunkowość tłumienia drgań (rys. 10.1 dla zdarzenia 1 oraz rys. 10.3 dla zdarzenia 2) oraz rozkłady pola przyspieszeń dla obu zdarzeń uzyskane przy wykorzystaniu sieci neuronowych (rys. 10.2 dla zdarzenia 1 oraz rys. 10.4 dla zdarzenia 2). Wartości zaobserwowane, zarejestrowane na stanowiskach pomiarowych, zaznaczono na każdym z rysunków na zielono.



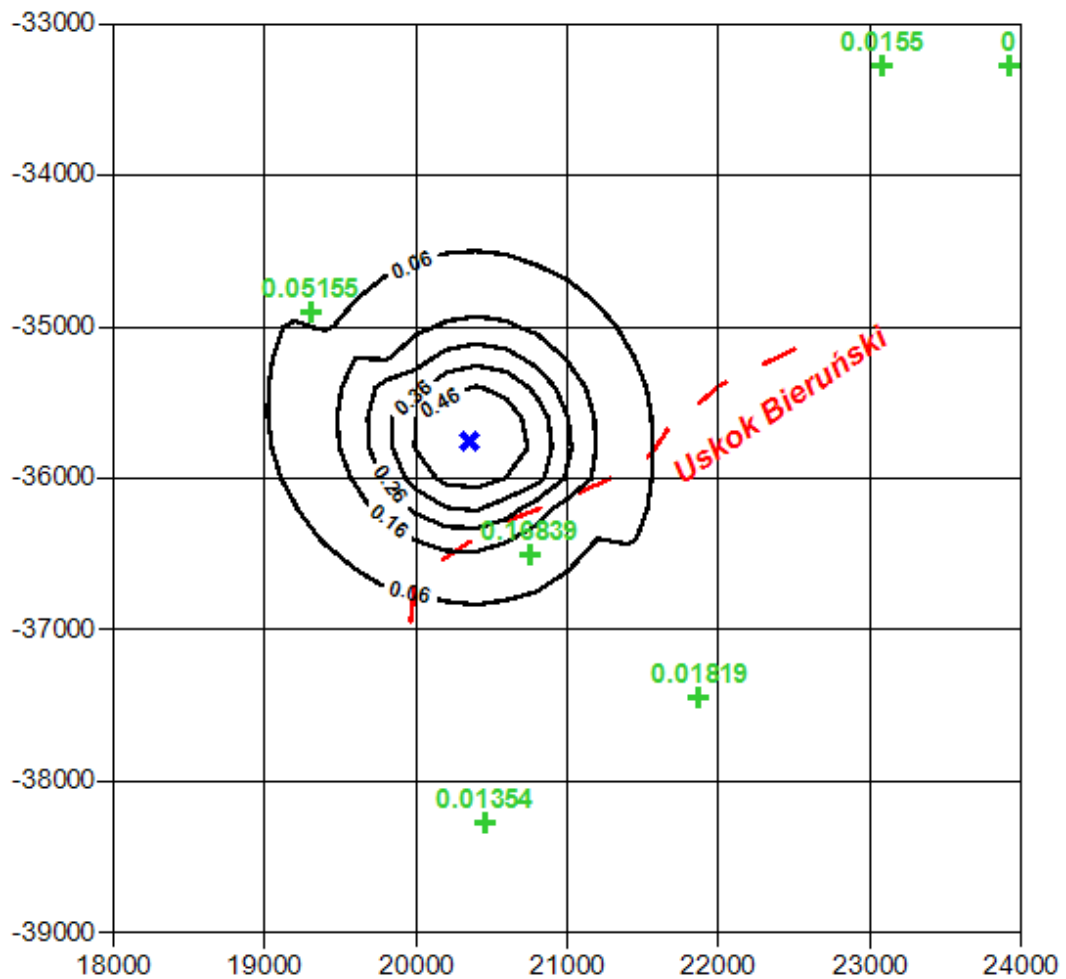
Rys. 10.1. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu analizy regresji dla zdarzenia 1, w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego, m/s^2



Rys. 10.2. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu sieci neuronowych dla zdarzenia 1, w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego, m/s^2



Rys. 10.3. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu analizy regresji dla zdarzenia 2, w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego, m/s^2



Rys. 10.4. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu sieci neuronowych dla zdarzenia 2, w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego, m/s^2

Rysunki obrazują możliwe rozkłady pola przyspieszeń drgań gruntu będące następstwem zarejestrowanych zdarzeń sejsmicznych. Dla zdarzenia 1, w obu przypadkach wykreślony rozkład jest w przybliżeniu zgodny z przebiegiem Uskoku Rydułtowskiego II. Dla zdarzenia 2 zgodność rozkładu z przebiegiem Uskoku Bieruńskiego jest wyraźnie obserwowalna w przypadku zastosowania analizy regresji i tylko nieznacznie obserwowalna w przypadku sieci neuronowych. W związku z powyższym można uznać, że rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu ma związek w występującymi zaburzeniami tektonicznymi.

11. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przeprowadzone badania dotyczyły rozkładu amplitud przyspieszeń drgań powierzchni generowanych przez wstrząsy górotworu indukowane prowadzoną działalnością górniczą w odniesieniu do lokalnych warunków geologicznych. Teza pracy zakładała, że istnieje związek między występującymi zaburzeniami tektonicznymi obszaru górniczego a rozkładem pola przyspieszeń drgań. Aby wykazać istnienie tej zależności wykorzystano analizę regresji oraz sztuczne sieci neuronowe.

Podstawą analizy były dwa zbiory danych zawierających przypadki drgań zarejestrowane przez aparatury pomiarowe kopalń w latach 2008 – 2018 oraz 2009 – 2019. Ocena występujących warunków geologicznych była możliwa dzięki prowadzonym w obu rejonach badaniom, na podstawie map geologiczno-górnich, tworzonych zarówno dla eksploatowanych pokładów, jak i dla warstw tworzących nadkład obszaru górniczego.

W badaniach zastosowano kilka modeli obliczeniowych, bazujących na analizie regresji oraz sztucznych sieciach neuronowych. Na potrzeby analizy regresji stworzono trzy modele wykorzystujące zmodyfikowaną relację tłumienia. Pierwszy model zakładał, że górotwór jest ośrodkiem izotropowym, w którym tłumienie i rozpraszanie są niezależne od kierunku rozchodzenia się drgań. W drugim modelu przyjęto, że górotwór jest ośrodkiem anizotropowym, w którym tłumienie i rozpraszanie są zależne od kierunku rozchodzenia się drgań. W trzecim modelu założono, że tłumienie jest zależne od kierunku rozchodzenia się drgań, a rozpraszanie zachodzi niezależnie od kierunku. Analizy wykonane za pomocą sieci neuronowych zostały przeprowadzone w oparciu o modele obliczeniowe, dla których przyjęto sieć MLP z minimalnie 1 i maksymalnie 11 neuronami w warstwie ukrytej. Dodatkowo w każdym zbiorze poddawanych analizie określono, że 70% to zbiór uczący, 15% - zbiór testowy i 15% - zbiór walidacyjny.

W prowadzonych obliczeniach przyjęto wpływ jednego uskoku na rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu. Spośród istniejących zaburzeń tektonicznych uwzględniono wyłącznie te, których rozpoznanie, zgodnie z mapami geologiczno-górnich, pozwala stwierdzić, że występują one na długości nie mniejszej niż 1000 m. Ponadto założono, że uskoki nie mogą znajdować się w odległości większej niż 2000 m od zdarzenia powodującego drganie gruntu na powierzchni. Z uwagi na trudności w dokładnym określeniu głębokości wstrząsu, w prowadzonych obliczeniach pominięto współrzędną z.

Nieuwzględnione zostały także inne aspekty mające wpływ na rozchodzenie się fali sejsmicznej, jak np. mechanizm ogniska wstrząsu.

Obliczenia przeprowadzono na grupie 212 zdarzeń z rejonu 1 i 220 zdarzeń z rejonu 2. Zbiory danych zawierały 887 zarejestrowanych przypadków drgań z rejonu 1 oraz 2095 zarejestrowanych przypadków drgań z rejonu 2. Energia zdarzeń, które wywołały drgania gruntu w analizowanych zbiorach wynosiła od $1,49 \cdot 10^5$ J do $1,00 \cdot 10^8$ J w rejonie 1 oraz od $4,00 \cdot 10^5$ J do $2,00 \cdot 10^8$ J w rejonie 2.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustalono, że:

- 1) w przypadku metody analizy regresji zastosowanie modelu anizotropowego do analizy rozkładu pola przyspieszeń znacząco poprawiło jakość oszacowania wartości przyspieszeń drgań gruntu (w porównaniu do klasycznej postaci relacji tłumienia),
- 2) 53% zdarzeń z rejonu 1 i 73% zdarzeń z rejonu 2 wykazuje kierunkowość tłumienia drgań w przybliżeniu zgodną z przebiegiem uskoku znajdującego się w bliskiej odległości od epicentrum wstrząsu,
- 3) dla rozpatrywanych zbiorów rejestracji przyspieszeń drgań gruntu nie udało się stwierdzić występowania zależności pomiędzy wielkością zrzutu a parametrem p modelu uwzględniającego kierunkowość tłumienia drgań (wiele zdarzeń wykazało kierunkowość rozchodzenia się drgań zgodną z uskokiem Leon, o zrzucie wynoszącym zaledwie średnio 7 m),
- 4) występowanie zależności między odległością zdarzenia od uskoku i zrzutem uskoku a parametrem q równania anizotropowego, odpowiadającym za obrót wokół osi z , wymaga potwierdzenia w dalszych badaniach,
- 5) stwierdzono zależność między azymutem uskoku a parametrem q równania anizotropowego odpowiadającym za obrót wokół osi z ,
- 6) rezultaty uzyskiwane przy zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych poprawiły wyniki uzyskane przy zastosowaniu metody analizy regresji, co świadczy o tym, że odpowiednio wytrenowana sieć neuronowa może zostać z powodzeniem zastosowana do prognozy rozkładu wartości przyspieszeń drgań na powierzchni terenu.

Na uwagę zasługuje fakt, że mimo złożoności problemu i przyjętych uproszeń w tworzonych modelach kierunkowy rozkład pola przyspieszeń składowych poziomych drgań gruntu jest wyraźny. Zdecydowana większość analizowanych zdarzeń wykazywała się anizotropią tłumienia fali sejsmicznej. Przyjęte założenia umożliwiły dopasowanie ponad 65% zarejestrowanych zdarzeń do uskoku znajdującego się w bliskiej odległości.

Otrzymane rezultaty pozwalają na stwierdzenie, że występujące zaburzenia tektoniczne mają wpływ na rozkład pola maksymalnych amplitud przyspieszeń drgań rejestrowanych na powierzchni terenu, tym samym teza pracy została udowodniona.

Literatura

1. Akyol N., Akinci A., Eyidoğan H. (2002): *Separation of Source, Propagation and Site Effects from S Waves of Local Earthquakes in Bursa Region, Northwestern Turkey*. Pure and Applied Geophysics vol. 159, str. 1253-1269.
2. Bańka P. (2013): *Wybrane problemy opisu przyspieszeń drgań gruntu wywołanych wstrząsami górniczymi*. Przegląd Górniczy nr 5, s. 31-41.
3. Bańka P., Cichy T., Kołodziejczyk P. (2016): *Wykorzystanie sieci neuronowych do prognozy zagrożenia sejsmicznego*. Przegląd Górniczy nr 4, str. 1-6.
4. Bańka P., Kołodziejczyk P., Lier E. (2016): *Wykorzystanie wyników pomiarów parametrów drgań gruntu do wyznaczenia wartości współczynnika amplifikacji drgań*. Przegląd Górniczy nr 4, str. 71-79.
5. Bańka P., Lier E., Fernandez M. M., Chmiela A., Muñiz Z. F., Sanchez A. B. (2020): *Directional Attenuation Relationship for Ground Vibrations Induced by Mine Tremors*. Journal of Mining Science nr 56, str. 236-245.
6. Bardet J., Tobita T. (2001): *A Computer Program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposit*. University of Southern California.
7. Campbell K.W. (1981): *Near-source attenuation of peak horizontal acceleration*. Bulletin of the Seismological Society of America vol. 71, No. 6, str. 2039-2070.
8. Campbell K.W., Bozorgnia Y. (2014): *NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped linear acceleration response spectra*. Earthquake Spectra vol. 30, issue 3, str. 1087-1115.
9. Cichosz P. (2007): *Systemy uczące się*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
10. Cianciara A. (2014): *Sposób oceny parametrów drgań gruntu wywołanych wstrząsami górniczymi*. Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN nr 86, str. 115-121.
11. Chodacki J. (2016): *New Ground Motion Prediction Equation for Peak Ground Velocity and Duration of Ground Motion for Mining Tremors in Upper Silesia*. Acta Geophysica vol. 64, str. 2449-2470.
12. Chodacki J. (2014): *Regionalne relacje tłumienia przyspieszenia drgań w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Wiadomości górnicze nr 7-8, str. 387-395.
13. Dec J. (2004): *Badania sejsmiczne w określaniu zagrożeń powierzchni w rejonach starej działalności górniczej*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 9, str. 21-24.

14. Dindarloo S. (2015): *Prediction of blast-induced ground vibrations via genetic programming*. International Journal of Mining Science and Technology vol. 25, str. 1011-1015.
15. Dubiński J., Gerlach Z. (1983): *Ocena oddziaływania wstrząsów górotworu na środowisko naturalne*. Przegląd Górniczy nr 3, str. 135-142.
16. Dubiński J., Lurka A., Stec K. (2006): *Badanie zależności pomiędzy radiacją sejsmiczną a mechanizmem ognisk wstrząsów górotworu na podstawie rejestracji sejsmologicznych i sejsmometrycznych*. Materiały Sympozjum Warsztaty 2006, str. 65-77.
17. Dubiński J., Mutke G., Stec K., Lurka A., Barański A. (2008): *Zasady stosowania górniczej skali intensywności drgań GSI-GZWKW do oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w Zakładach Górniczych Kompanii Węglowej SA na obiekty budowlane i ludzi*. Główny Instytut Górnictwa.
18. Dubiński J., Mutke G., Tataro T., Muszyński L., Barański A., Kowal T. (2013): *Zasady stosowania zweryfikowanej Górniczej Skali Intensywności drgań GSI-GZWKW-2012 do prognozy i oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją złóż węgla kamiennego w zakładach górniczych Kompanii Węglowej S.A. na obiekty budowlane i na ludzi*. Wydawnictwo Kompanii Węglowej.
19. Ehret D., Rohn J., Hannich D., Grandas C., Huber G. (2010): *Numerical Modelling of Seismic Site Effects Incorporating Non-linearity and Groundwater Level Changes*. Journal of Earth Science vol. 21, str. 931-940.
20. *Elektroniczny Podręcznik Statystyki* (<http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>, dostęp 10.11.2018). StatSoft.
21. Elnashai A.S., Di Sarno L. (2008): *Fundamental of Earthquake Engineering*. Wydawnictwo Willey.
22. Esteva L., Rosenblueth E. (1964): *Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes*. Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica No. 2, str. 1-18.
23. Ferreira C. (2001): *Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems*. Complex Systems vol. 13, str. 87-129.
24. Gatmiri B. (2008): *Local site effect evaluation in seismic risk mitigation*. [w:] Schanz T., Iankov R. (red.): *Coupled Site and Soil-Structure Interaction Effects with Application to Seismic Risk Mitigation*, str. 89-99.

25. Golik A., Mendecki M. (2012): *Ground-Motion Prediction Equations for Induced Seismicity in the Main Anticline and Main Syncline, Upper Silesian Coal Basin, Poland*. Acta Geophysica vol. 60, str. 410-425.
26. Gruca A. (2013): *Eksploracja danych*. Raport Obserwatorium ICT.
27. Gutkowski T., Dym C. (1976): *Propagation of ground vibration: A review*. Journal of Sound and Vibration vol. 49, str. 179-193.
28. Jakubowski J., Lenart Ł., Ożóg Ł. (2014): *Przybliżony model dobowej emisji energii sejsmicznej indukowanej eksploatacją górniczą*. Przegląd Górniczy nr 3, str. 18-25.
29. Joyner W.B., Boore D.M. (1981): *Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California, earthquake*. Bulletin of the Seismological Society of America vol. 71, No. 6, str. 2011-2038.
30. Joyner W.B., Boore D.M. (1993): *Methods for regression analysis of strong-motion data*. Bulletin of the Seismological Society of America vol 83, No. 2, str. 469-487.
31. Khandelwal M., Kankar P., Harsha S. (2010): *Evaluation and prediction of blast induced ground vibration using support vector machine*. Mining Science and Technology vol. 20, str. 64-70.
32. *Kompleksowy Projekt Eksploatacji Pokładów Zagrożonych Tąpaniami na lata 2016-2019 w Kopalni Węgla Kamiennego „Rydułtowy”*. Rydułtowy 2016.
33. *Kompleksowy Projekt Eksploatacji Pokładów Zagrożonych Tąpaniami w Polskiej Grupie Górniczej Sp. z o. o. Oddział KWK Piast-Ziemowit na lata 2016-2020*. Ruch Piast. Bieruń 2016.
34. Kornowski J. (2008): *Prognoza maksymalnych przyspieszeń od wstrząsów górniczych – estymatory regionalne, lokalne i kombinowane*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Górnictwo i Geologia t. 3.
35. Kostić S., Perc M., Vasović N., Trajković S. (2013): *Predictions of Experimentally Observed Stochastic Ground Vibrations Induced by Blasting*. Plos One vol. 8.
36. Kościelny P., Syrek B. (1985): *Pomiar parametrów drgań gruntu przy wykorzystaniu powierzchniowego stanowiska sejsmicznego w kopalni „Wujek”*. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences, M-6 (176), str. 467-475.
37. Kot S., Jakubowski J., Sokołowski A. (2011): *Statystyka*. Wydawnictwo Difin.

38. Krawiec K., Stefanowski J. (2003): *Uczenie maszynowe i sieci neuronowe*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
39. Kuźniar K. (2011): *Neural networks for the analysis of mine-induced building vibrations*. Computer Assisted Methods in Engineering and Sciences vol. 18, str. 147-159.
40. Kuźniar K., Chudyba Ł. (2010): *Wykorzystanie sieci neuronowych do prognozowania przekazywania drgań wzbudzanych wstrząsami górnictwymi z gruntu na budynek*. Czasopismo Techniczne. Budownictwo, t. R. 107, str. 109-117.
41. Kuźniar K., Tataro T. (2014): *Przekazywanie drgań od wstrząsów górnictwowych z gruntu na fundamenty budynków różnego typu*. Przegląd Górniczy nr 6, str. 30-34.
42. Larose D. (2012): *Metody i modele eksploracji danych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
43. Lasocki S. (2013): *Site Specific Prediction Equations for Peak Acceleration of Ground Motion Due to Earthquakes Induced by Underground Mining in Legnica-Głogów Copper District in Poland*. Acta Geophysica vol. 61, str. 1130-1155.
44. Lasocki S., Olszewska D. (2003): *Wpływ niejednorodnych efektów lokalnych na dokładność prognozy rozprzestrzeniania się drgań – przykład terenu miasta Polkowic*. Materiały Sympozjum Warsztaty 2003, str. 113-126.
45. Lasocki S., Szybiński M., Matuszczyk J., Mirek J., Pielesz A. (2000): *Prognozowanie drgań powierzchni wywołanych wstrząsami górnictwymi – przegląd krytyczny*. Materiały Sympozjum Warsztaty 2000, str. 261-279.
46. Lomnitz C., Rosenblueth E. (1976): *Seismic risk and engineering decisions*. Wydawnictwo Elsevier.
47. Marcak H. (2013): *Cycles in mining seismicity*. Journal of Seismology vol. 17, str. 961-974.
48. Marcak H. (2008): *Parameters of a ground motion model induced by mining exploitation*. Archives of Mining Sciences vol. 53, str. 335-348.
49. Markowski E., Kornowski J., Zuberek W. M. (2002): *Podsumowanie i analiza wyników powierzchniowych obserwacji przyspieszeń pochodzących od wstrząsów górnictwowych z zakładów górnictwowych zrzeszonych w Bytomskiej Spółce Węglowej S.A. za okres 1998- 2000*. Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi Oddział Górnoląski.
50. Marmureanu G., Marmureanu A., Cioflan C. (2013): *Nonlinear seismology a reality. The quantitative data*. Romanian Reports in Physics vol. 65, str. 512-523.

51. McGarr A., Bicknell J., Sembera E., Green R. (1989): *Analysis of Exceptionally Large Tremors in Two Gold Mining Districts of South Africa*. Pure and Applied Geophysics vol. 129, str. 295-307.
52. Miller R.D., Xia J., Park C., Ivanov J., Geier N., Laflen D. (1999): *Using MASW to Map Bedrock in Olathe, Kansas*. Open-file report No 99-9.
53. Mirończuk M. (2010): *Przegląd i klasyfikacja zastosowań, metod oraz technik eksploracji danych*. Studia i Materiały Informatyki Stosowanej, t. 2, nr 2, str. 35-46.
54. Mitchell T. (1997): *Machine Learning*. Wydawnictwo MCGraw-Hill.
55. Morzy T. (2013): *Eksploracja danych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
56. Musson R.W.W., Cecić I. (2011): *Intensity and intensity scales*, [w:] Bormann P. (red.): *New Manual of Seismological Observatory Practice*. GFZ German Research Centre for Geosciences.
57. Mutke G. (1991): *Metoda prognozowania parametrów drgań podłoża generowanych wstrząsami górniczymi w obszarze GZW*. Rozprawa doktorska (niepublikowana).
58. Mutke G. (2019): *Oddziaływanie górniczych wstrząsów sejsmicznych na powierzchnię*. Wydawnictwo GIG.
59. Mutke G., Barański A., Chodacki J., Dubiński J., Kowal T., Lurka A., Muszyński L., Stec K. (2017): *Górnicza Skala Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 dla oceny skutków drgań wywołanych w środowisku powierzchniowym zjawiskami sejsmicznymi indukowanymi eksploatacją węgla kamiennego*. Praca statutowa nr 11207156-120. Główny Instytut Górnictwa.
60. Mutke G. (red.), Barański A., Chodacki J., Dubiński J., Kowal T., Lurka A., Muszyński L., Stec K. (2018): *Zasady stosowania Górnicznej Skali Intensywności Sejsmicznej GSIS-2017 do prognozy oceny skutków oddziaływania wstrząsów indukowanych eksploatacją na obiekty budowlane oraz klasyfikacji ich odporności dynamicznej*. Instrukcja nr 23 Głównego Instytutu Górnictwa.
61. Mutke G., Dworak J. (1992): *Czynniki warunkujące efekt sejsmiczny wstrząsów górniczych na powierzchniowe obiekty budowlane w obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Publications of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences, M-16 (245), str. 115-128.
62. Nakamura Y. (2000): *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*. 12th World Conference on Earthquake Engineering, str. 1-9.

63. Neighbors C., Liao E., Cochran E., Chung A., Lawrence J., Belmonte A., Miller M., Sepulveda H. (2011): *Preliminary site response study in the bio bio region, Chile using the κ method*. Materiały sympozjum Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion.
64. Olszewska D. (2008): *Ocena efektów lokalnych i struktury częstotliwościowej sygnałów sejsmometrycznych dla poprawy dokładności prognozy rozprzestrzeniania drgań wzbudzanych wstrząsami górnictwymi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym*. Rozprawa doktorska.
65. Olszewska D., Lasocki S. (2004): *Application of the horizontal to vertical spectral ratio technique for estimating the site characteristics of ground motion caused by mining induced seismic events*. Acta Geophysica vol. 52, str. 301-318.
66. Osowski S. (2013): *Metody i narzędzia eksploracji danych*. Wydawnictwo BTC.
67. Över S., Büyüksaraç A., Bekta Ö., Filazi A. (2011): *Assessment of potential hazard and site effect in Antakya (Hatay Province), SE Turkey*. Environmental Earth Sciences vol. 62, str. 313-326.
68. Piętka A., Danek T., Leśniak A. (2009): *Numerical modeling of ground vibration caused by underground tremors in the LGOM mining area*. Gospodarka surowcami mineralnymi t. 25, str. 261-271.
69. Pilecka E., Szermer-Zaucha R. (2015): *Analiza rozkładu szkód górnictwowych po wysokoenergetycznych wstrząsach z dnia 21 kwietnia 2011 r. i 7 czerwca 2013 r. w kopalni „Rydułtowy-Anna” na tle lokalnej tektoniki*. Przegląd Górniczy nr 1, str. 74-82.
70. Pilecka E., Szermer-Zaucha R. (2012): *Statystyczna analiza wpływu lokalnej tektoniki związanej z wysokoenergetyczną sejsmicznością na szkody w obiektach budowlanych na terenie KWK Piast*. Przegląd Górniczy nr 3, str. 86-98.
71. Pitilakis K. (2004): *Site effects*. [w:] Ansal A. (red.): Recent Advances in Earthquake Geological Engineering and Microzonation. str. 139-197.
72. PN-82/B-02001: *Obciążenia budowli. Obciążenia stałe*.
73. Satoh T., Kawase H. (1992): *Local site effects on weak and strong ground motions at the ashigara valley, Japan*. Symposium on Earthquake Disaster Prevention, vol. 1, str. 227-236.
74. Si H., Midorikawa S. (2000): *New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of faulty type and site condition*. 12th World Conference on Earthquake Engineering.

75. Siata R., Chodacki J. (2005): *Zastosowanie metody MASW do wyznaczania profilu prędkościowego warstw przypowierzchniowych*. Materiały Sympozjum Warsztaty 2005, str. 493-499.
76. Skowrya S., Rudowski M. (2008): *Implementacja wybranych algorytmów eksploracji danych na Oracle 10g*. Politechnika Warszawska.
77. Tadasiewicz R. (2015): *Neural networks in mining sciences – general overview and some representative examples*. Archives of Mining Sciences vol. 60, str. 971-984.
78. Tadasiewicz R. (2007): *Odkrywanie właściwości sieci neuronowych przy użyciu programów w języku C#*. Wydawnictwo Polskiej Akademii Umiejętności.
79. Triantafyllidis P., Hatzidimitriou P., Suhadolc P. (2001): *1-D Theoretical Modeling for Site Estimations in Thessaloniki: Comparison with Observations*. Pure and Applied Geophysics vol. 158, str. 2333-2347.
80. Uzoegbo H.C., Li K. (2008): *Mine induced events and its effect on nearby settlements in South Africa*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering.
81. Zakrzewicz M. (1997): *Data Mining i odkrywanie wiedzy w bazach danych*. Materiały konferencji PLOUG'97.

Spis rysunków

Rysunek 4.1. Schemat modelu przyjętego do oszacowania wartości współczynnika amplifikacji drgań.

Rys. 6.1. Wpływu wartości parametru p na rozkład pola przyspieszeń.

Rys. 6.2. Wpływu wartości parametru q na rozkład pola przyspieszeń.

Rys. 7.1. Główne uskoki występujące w rejonie 1 (rzut na płaszczyznę pokładów 706 lub 7131/2).

Rys. 7.2. Główne uskoki występujące w rejonie 2 (rzut na płaszczyznę pokładu 207).

Rys 8.1. Lokalizacja stanowisk aparatury pomiarowej wraz z zaznaczeniem epicentrow wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 1.

Rys 8.2. Lokalizacja stanowisk aparatury pomiarowej wraz z zaznaczeniem epicentrow wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 2.

Rys. 9.1. Zależność współczynnika amplifikacji od częstotliwości dla stanowisk pomiarowych w rejonie 1.

Rys. 9.2. Zależność współczynnika amplifikacji od częstotliwości dla stanowisk pomiarowych w rejonie 2.

Rys. 9.3. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 23.09.2017 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.4. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 23.09.2017 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.5. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 30.12.2017 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.6. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 30.12.2017 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.7. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 11.10.2014 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.8. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 11.10.2014 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.9. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 17.11.2017 przy uwzględnieniu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.10. Mapa rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 17.11.2017 przy pominięciu zróżnicowania wartości amplifikacji drgań, m/s^2 . Model 1 – kolor czarny, model 2 - kolor fioletowy, model 3 – kolor niebieski.

Rys. 9.11. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku (rejon 1), m/s^2 .

Rys. 9.12. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Czernickiego III, m/s^2 .

Rys. 9.13. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Kolejowego, m/s^2 .

Rys. 9.14. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Leon, m/s^2 .

Rys. 9.15. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego II, m/s^2 .

Rys. 9.16. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego, m/s^2 .

Rys. 9.17. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Błudowskiego, m/s^2 .

Rys. 9.18. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku (rejon 2), m/s^2 .

Rys. 9.19. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Kolistego, m/s^2 .

Rys. 9.20. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Naprzeciwego, m/s^2 .

Rys. 9.21. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Smardziowickiego, m/s^2 .

Rys. 9.22. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Środkowego, m/s^2 .

Rys. 9.23. Rozkład przyspieszeń w sąsiedztwie Uskoku Zachodniego, m/s^2 .

Rys. 9.24. Zależność parametru p od odległości zdarzenia od uskoku.

Rys. 9.25. Zależność parametru p w zależności od iloczynu odległości zdarzenia od uskoku i jego zrzutu.

Rys. 9.26. Zależność parametru q od azymutu uskoku.

Rys. 9.27. Ważność zmiennych niezależnych dla zmiennej zależnej p .

Rys. 9.28. Ważność zmiennych niezależnych dla zmiennej zależnej q .

Rys. 9.29. Schemat modelu 1 - sieci neuronowe.

Rys. 9.30. Schemat modelu 2 - sieci neuronowe.

Rys. 9.31. Schemat modelu 2a - sieci neuronowe.

Rys. 9.32. Schemat modelu 2b - sieci neuronowe.

Rys. 9.33. Schematy sieci neuronowych do wyznaczenia parametrów p i q .

Rys. 10.1. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu analizy regresji dla zdarzenia 1, w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego, m/s^2 .

Rys. 10.2. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu sieci neuronowych dla zdarzenia 1, w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego, m/s^2 .

Rys. 10.3. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu analizy regresji dla zdarzenia 2, w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego, m/s^2 .

Rys. 10.4. Rozkład pola przyspieszeń drgań gruntu uzyskany przy zastosowaniu sieci neuronowych dla zdarzenia 2, w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego, m/s^2 .

Spis tabel

Tab. 8.1. Zestawienie wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 1 latach 2009 – 2018.

Tab. 8.2. Zestawienie wstrząsów wysokoenergetycznych w rejonie 2 w latach 2008 – 2019.

Tab. 9.1. Wartości współczynnika amplifikacji drgań w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej w rejonie 1.

Tab. 9.2. Wartości współczynnika amplifikacji drgań w miejscach zainstalowania aparatury pomiarowej w rejonie 2.

Tab. 9.3. Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 23.09.2017.

Tab. 9.4. Ocena, jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 1 z dnia 30.12.2017.

Tab. 9.5. Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 11.10.2014.

Tab. 9.6. Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzenia z rejonu 2 z dnia 17.11.2017.

Tab. 9.7. Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzeń z rejonu 1.

Tab. 9.8. Ocena jakości dopasowania rozkładu pola przyspieszeń dla zdarzeń z rejonu 2.

Tab. 9.9. Wyniki estymacji parametrów modelu oraz ocena jakości dopasowania otrzymanych rozkładów pola przyspieszeń dla grup zdarzeń w sąsiedztwie uskoku - rejon 1.

Tab. 9.10. Wyniki estymacji parametrów modelu oraz ocena jakości dopasowania otrzymanych rozkładów pola przyspieszeń dla grup zdarzeń w sąsiedztwie uskoku - rejon 2.

Tab. 9.11. Parametry zdarzeń i uskoku.

Tab. 9.12. Zależności parametrów p i q od parametrów uskoku.

Tab. 9.13. Ocena jakości symulacji przy zastosowaniu sieci neuronowych.

Tab. 9.14. Porównanie wyników uzyskanych przy zastosowaniu analizy regresji oraz sieci neuronowych.

Tab. 9.15. Ocena możliwości poprawy opisu pola przyspieszeń przy uwzględnieniu kierunkowości rozchodzenia się fal.

Tab. 9.16. Zależności parametrów p i q od parametrów uskoku.

Tab. 10.1. Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą analizy regresji przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia w sąsiedztwie Uskoku Rydułtowskiego II.

Tab. 10.2. Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą analizy regresji przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia w sąsiedztwie Uskoku Bieruńskiego.

Tab. 10.3. Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą sieci neuronowych przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia 1.

Tab. 10.4. Porównanie wartości zaobserwowanych i oszacowanych za pomocą sieci neuronowych przyspieszeń drgań gruntu dla zdarzenia 2.

Tab. 10.5. Porównanie wartości błędów średniokwadratowych wyników uzyskanych za pomocą analizy regresji i sieci neuronowych.