



Stanisław LASOCKI*, Beata ORLECKA-SIKORA**, Konstantinos LEPTOKAROPOULOS***,
Grzegorz LIZUREK****, Mariusz STERZEL*****, Tomasz SZEPIENIEC*****,
Grzegorz MUTKE***** oraz zespół IS-EPOS

Platforma IS-EPOS jako nowoczesne narzędzie w badaniach sejsmiczności antropogenicznej

Streszczenie: Platforma IS-EPOS jest prototypem Tematycznego Węzła Sejsmiczności Antropogenicznej. Będzie ona elementem europejskiej multidyscyplinarnej platformy badawczej tworzonej w ramach projektu EPOS (*European Plate Observing System*). IS-EPOS to platforma internetowa pozwalająca na dostęp i analizę danych geofizycznych i przemysłowych do badań naukowych w zakresie sejsmiczności antropogenicznej. Dane zorganizowane są w tzw. epizody sejsmiczności, czyli kompletne zestawy danych geofizycznych i technologicznych opisujące dany przypadek sejsmiczności. Obecnie dostępnych jest sześć epizodów sejsmiczności indukowanej: cztery epizody z Polski, jeden z Niemiec i jeden z Wietnamu. Platforma IS-EPOS zawiera także serwisy obliczeniowe oraz wizualizacji danych. Serwisy przetwarzające dane można podzielić na dwie podstawowe grupy: programy do podstawowych operacji na katalogu sejsmicznym, danych produkcyjnych oraz sejsmogramach i programy do zaawansowanego przetwarzania danych.

Serwisy są udostępnione użytkownikowi przez jego osobistą przestrzeń roboczą, gdzie może wgrywać odpowiednie dane i przeprowadzać na nich wybrane przez siebie analizy.

Wszystkie serwisy i epizody posiadają szczegółową dokumentację oraz bibliografię dotyczącą metodyki dostępne dla użytkowników platformy IS-EPOS. Szczególnym elementem dokumentacji jest specjalnie przygotowany podręcznik użytkownika platformy, w którym zawarto wszelkie informacje potrzebne do efektywnej pracy z platformą. Platforma IS-EPOS została stworzona jako produkt końcowy projektu IS-EPOS sfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w Osi priorytetowej 2: Infrastruktura Sfery B+R, działanie 2.3: Inwestycje związane z rozwojem infrastruktury informatycznej nauki. Platforma jest dostępna bezpłatnie dla zarejestrowanych użytkowników pod adresem: <https://tcs.ah-epos.eu>.

Słowa kluczowe: sejsmiczność antropogeniczna, sejsmiczność indukowana, metody komputerowe, e-research

* Prof. dr hab., ** Dr hab. inż., *** Dr, prof. PAN, **** Dr, Instytut Geofizyki PAN, Warszawa.

***** Dr, ***** Mgr inż., Akademickie Centrum Komputerowe – Cyfronet, Kraków; e-mail: lizurek@igf.edu.pl.

***** Dr hab. inż., prof. GIG, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.

IS-EPOS: digital research space to facilitate an integrated approach to induced seismicity

Abstract: In this paper we present the IS-EPOS IT-platform which is an open virtual access point for researchers studying anthropogenic seismicity and related hazards. The IS-EPOS platform constitutes a digital research space for providing permanent and reliable access to advanced Research Infrastructures (RI) to the Induced Seismicity (IS) Community. This objective is implemented as a prototype which offers access to various datasets related to selected anthropogenic seismicity cases, specialized software for elementary and advanced data analysis and document repositories. The relevant seismic and non-seismic data are gathered in the so-called episodes of induced seismicity. The IS-EPOS platform integrates presently six episodes of anthropogenic seismicity respectively linked to underground hard rock and coal mining in Poland, hydroelectric energy production and geothermal energy production experiments in Germany. The researcher accessing the platform can make use of low level software services for data browsing, selecting and visualizing and a number of high level services for advanced data processing out of which the probabilistic seismic analysis service group is particular rich. The IS-EPOS platform is a prototype of the Thematic Core Services (TCS) Anthropogenic Hazards (AH) belonging to the pan-European multidisciplinary research platform created within the European Plate Observing System (EPOS) long term plan for the integration of national and transnational research infrastructures for solid earth science in Europe. The platform is available for registered users for free (<https://tcs.ah-epos.eu>).

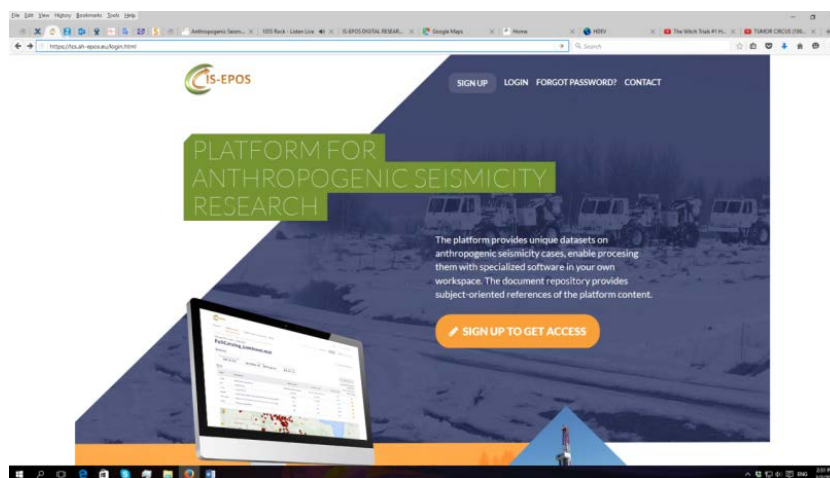
Keywords: anthropogenic Hazards; Induced Seismicity; web-platform; Research Infrastructure for Georesources; EPOS

Wprowadzenie

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na energię i surowce mineralne problematyka oceny zagrożeń wywoływanych poszukiwaniem i eksploatacją złóż budzi coraz większe zainteresowanie naukowców, przedstawicieli przemysłu oraz przedstawicieli władz lokalnych, organizacji pozarządowych i społeczeństwa. Sejsmiczność antropogeniczna jest niechcianym efektem ubocznym prowadzenia działalności przemysłowej. Co więcej, może ona stanowić poważny problem w rejonach, gdzie wcześniej nie notowano wstrząsów. Zainteresowanie świata nauki sejsmicznością indukowaną doprowadziło do zwiększenia liczby publikacji naukowych w tej tematyce w ciągu ostatnich kilku lat. Główne obszary badań skupiały się na związku sejsmiczności z górnictwem odkrywkowym i podziemnym (Stec 2007; Marcak i Mutke 2013; Orlecka-Sikora i in. 2014; Lizurek, Lasocki 2014; Kozłowska i in. 2015), konwencjonalnym i niekonwencjonalnym wydobyciem węgłowodorów, w tym gazu z łupków (Suckale 2009; Skoumal i in. 2015; Wang i in. 2016), eksploatacją sztucznych zbiorników wodnych (Wiszniewski i in. 2015; Yadav i in. 2015), produkcją energii geotermalnej (Martínez-Garzón i in. 2014a; Izadi i Elsworth 2014; Izadi i Elsworth 2015), podziemnym składowaniem płynów (Keranen i in. 2014; Rutqvist i in. 2014), eksperymentami związanymi z wierceniami i iniekcją płynów (Vavryčuk i in. 2008) a także z innymi procesami technologicznymi, które mogą wpłynąć na zaburzenie stanu naprężeń w ośrodku skalnym. Mimo że większość wstrząsów antropogenicznych jest słaba, to ich odczuwalność może być jednak uciążliwa dla mieszkańców danego obszaru. W związku z tym faktyczny społeczno-ekonomiczny wpływ takich zjawisk to zmniejszenie lub zatrzymanie produkcji w danym obszarze, straty materialne, zniszczenie infrastruktury oraz w najgorszym przypadku urazy i śmierć pracowników i mieszkańców zagrożonego wstrząsami obszaru.

Zagrożenie sejsmicznością antropogeniczną jest bezpośrednio związane z technologiami wywołującymi wstrząsy (Davies i in. 2013). Warto jednak zauważyć, że integralną częścią

procesu odpowiedzi ośrodka skalnego na ingerencję jest zjawisko pęknięcia. Stąd też prowadzi się badania w celu znalezienia podobieństw w procesie pęknięcia ośrodka skalnego wywołanego różnymi technologiami. Takie podejście wydaje się być najlepszą drogą do pełnego zrozumienia procesu fizycznego stojącego za sejsmicznością antropogeniczną. Szansę na to daje integracja badań naukowych oparta na najnowocześniejszych technologiach informatycznych wokół tej wspólnej cechy. Platforma IS-EPOS jest odpowiedzią na taką potrzebę, będąc wirtualną przestrzenią badawczą umożliwiającą stały dostęp do zaawansowanej infrastruktury badawczej dla naukowców zajmujących się problematyką sejsmiczności antropogenicznej (rys. 1). Platforma jest stroną internetową umożliwiającą dostęp do



Rys. 1. Strona główna platformy IS-EPOS

Fig. 1. The homepage of IS-EPOS web-platform

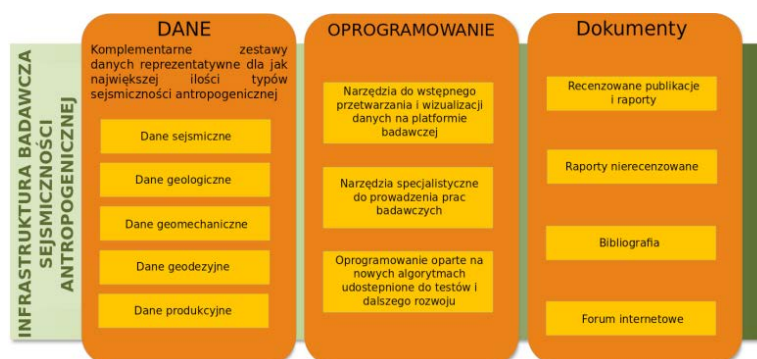
zróżnicowanych zestawów danych związanych z wybranymi przypadkami sejsmiczności antropogenicznej, a także do specjalistycznego oprogramowania naukowego działającego on-line oraz repozytorium dokumentów. Zestawy danych sejsmicznych, technologicznych i pomocniczych zebrane są w postaci tzw. epizodów sejsmiczności antropogenicznej. Przez epizod rozumiany jest kompletny zestaw danych opisujący przypadek sejsmiczności wywołanej lub indukowanej przez działalność ludzką, który może w pewnych warunkach stanowić zagrożenie dla ludzi, infrastruktury lub środowiska naturalnego. Epizod zawiera zbiór danych z konkretnego wycinka czasu opisujący sejsmiczność, technologię indukującą (np. wielkość ciśnienia zatłaczanego do otworu geotermalnego) i inne dane opisujące obszar, w jakim dochodzi do wstrząsów.

1. Platforma IS-EPOS

Wysoka jakość badań naukowych w zakresie sejsmiczności antropogenicznej jest uzależniona od jakości danych. W badaniach takich niezbędne są nie tylko dane sejsmiczne, ale także dane technologiczne opisujące ingerencję w skały przez daną aktywność przemy-

słową, zazwyczaj związaną z wydobyciem kopalin bądź produkcją energii. Tego typu dane będące zwykle własnością firm wydobywczych i energetycznych są zwykle niedostępne dla niezależnych naukowców, którzy szukają nowych, innowacyjnych sposobów na wyjaśnienie zjawisk związanych z sejsmicznością indukowaną. Platforma IS-EPOS otwiera nowe możliwości w badaniach z zakresu nauk o Ziemi dzięki integracji danych i dostępowi do nich on-line wraz z metodami ich analizy. Dobrą stroną tego podejścia jest dostęp do danych multidyscyplinarnych zbieranych poprzez różne systemy obserwacyjne, laboratoria badawcze i wyniki eksperymentów obliczeniowych.

Jednym z głównych celów projektu IS-EPOS było stworzenie prototypu Tematycznego Węzła Sejsmiczności Antropogenicznej (*Thematic Core Service – Anthropogenic Hazards, TCS AH*) w postaci platformy internetowej dla celów projektu EPOS (*European Plate Observing System*), który ma za zadanie integrację infrastruktury badawczej obejmującej pomiary i modelowanie z zakresu nauk o Ziemi w Europie. Obecnie prototyp platformy jest w pełni funkcjonalny i stanowi jednocześnie pierwszą wersję Węzła Sejsmiczności Antropogenicznej, który będzie dalej rozwijany w ramach fazy wdrażania projektu EPOS. Integracja infrastruktury badawczej w ramach platformy odbyła się na dwóch poziomach: pierwszy to zebranie danych z poszczególnych epizodów oraz ich dostosowanie w Centrum Danych, druga warstwa to integracja zasobów danych wraz z oprogramowaniem w obrębie tematycznego węzła sejsmiczności antropogenicznej wraz z dokumentacją dotyczącą epizodów i oprogramowania (rys. 2). Platforma IS-EPOS obecnie składa się z jednego Centrum Danych oraz sześciu epizodów sejsmiczności antropogenicznej związanych z różnymi technologiami indukującymi wstrząsy (górnictwo podziemne, eksploatacja sztucznych zbiorników wodnych oraz produkcji energii geotermalnej) z trzech krajów (Polski, Niemiec i Wietnamu).



Rys. 2. Infrastruktura badawcza zintegrowana w ramach IS-EPOS

Fig. 2. Research Infrastructures integrated inside IS-EPOS

1.1. Poziomy dostęp

IS-EPOS to platforma internetowa, której zadaniem jest pomoc w realizacji badań i umożliwienie poprawy jakości wyników badań nad sejsmicznością antropogeniczną. Głównym i podstawowym użytkownikiem platformy są naukowcy. Przedstawiciele przemysłu (np. geofizycy na kopalniach) i społeczeństwa (urzędnicy odpowiadający za dostosowanie planów

zagospodarowania przestrzennego w rejonach przemysłowych i poprzemysłowych) są również przewidziani jako ważni odbiorcy informacji zawartych na platformie. Dostęp do zasobów na platformie jest sprofilowany w zależności od roli użytkownika. Podstawowe dane i związane z nim oprogramowanie są udostępnione w sposób otwarty dla wszystkich użytkowników i nie wymaga ono rejestracji na platformie, pozwala to na anonimowe przeglądanie podstawowych zasobów. Zarejestrowani użytkownicy mają poszerzony dostęp do danych względem użytkowników anonimowych, szczególnie dotyczy to specjalistycznego oprogramowania naukowego, które udostępnione jest tylko użytkownikom zarejestrowanym i zaliczonym do odpowiedniej grupy użytkowników. Pewne ograniczenia dostępu poprzez rejestrację użytkowników zostały wprowadzone ze względów bezpieczeństwa, aby przeciwdziałać celowym lub przypadkowym nadużyciom w wykorzystaniu udostępnionych zasobów, a także w celu odpowiedniego sprofilowania dostępu do zaawansowanych narzędzi badawczych. Przyjęto zasadę, że dane i oprogramowanie są otwarte w obrębie społeczności naukowej zajmującej się badaniem antropogenicznych zagrożeń, ponadto dokumentacja dotycząca badań z użyciem platformy powinna być otwarta, a użycie jej udokumentowane w publikacjach wynikających z tych badań. Z powyższych założeń wynika wymóg rejestracji użytkowników chcących wykorzystać dane i oprogramowanie do konkretnych prac naukowych. Pobieranie materiałów z platformy IS-EPOS jest możliwe po zaakceptowaniu Regulaminu Pobierania Danych. W związku z opisaną polityką dostępności można wyróżnić cztery podstawowe grupy użytkowników: naukowiec, przedstawiciel partnera przemysłowego, zarejestrowany użytkownik oraz niezarejestrowany anonimowy użytkownik

Każdy zarejestrowany użytkownik otrzymuje osobistą przestrzeń roboczą na serwerze, na której może zapisywać dane, przeprowadzać obliczenia i zapisywać ich wyniki. Wielkość przestrzeni na serwerze zależy od grupy, do której należy użytkownik. Największą przestrzeń przewidziano dla użytkowników z grupy naukowców, a najmniejszą dla anonimowego użytkownika. Przestrzeń użytkownika jest widoczna i dostępna tylko dla niego. W ramach poszerzenia funkcjonalności przestrzeni roboczej dla każdego użytkownika oddano następujące dodatkowe serwisy: wgrywania danych, pobierania danych, pobierania wyników obliczeń, pobierania oprogramowania, wgrywania dokumentów do repozytorium

1.2. Epizody sejsmiczności antropogenicznej

Epizod sejsmiczności antropogenicznej to kompletny zestaw danych geofizycznych, geodezyjnych i technologicznych skorelowanych czasowo i przestrzennie opisujący sejsmiczność wywołaną przez określoną technologię eksploatacji zasobów w konkretnym miejscu. Dane w epizodzie sejsmiczności antropogenicznej powinny zawierać dane sejsmiczne i produkcyjne oraz wszelkie dodatkowe dane przydatne w opisie danego przypadku sejsmiczności (np. geologiczne, geofizyczne, geodezyjne, tektoniczne, geomechaniczne). Centrum Danych prowadzi bazę danych dla poszczególnych epizodów (obecnie dla sześciu).

Epizody te to:

- BOBREK MINE – sejsmiczność związana z eksploatacją ściany 3 pokładu 503 kopalni Bobrek-Centrum,
- CZORSZTYN – sejsmiczność związana z eksploatacją sztucznego zbiornika Czorsztyn w Zespole Elektrowni Wodnych Niedzica,

- GROSS SCHOENEBECK – sejsmiczność związana z eksperymentalnym pozyskiwaniem energii geotermalnej w Gross Schoenebeck (Niemcy),
- LGCD – sejsmiczność wywołwana wydobywaniem rudy miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym,
- SONG TRANH – sejsmiczność związana z eksploatacją sztucznego zbiornika Song Tranh 2 na rzece Song Tranh w centralnym Wietnamie,
- USCB – sejsmiczność wywołwana wydobywaniem węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.

Dane na podstawie zapytania użytkownika np. poprzez wyszukiwarke danych są udostępniane na platformie IS-EPOS. Zadaniem Centrum Danych jest rejestracja dostawców danych i wspomaganie procesu przekazywania ich do bazy danych. Obecnie dane są dostarczane przez trzech dostawców: Instytut Geofizyki PAN, Główny Instytut Górnictwa i Kompanię Węglową SA (Kopalnię Bobrek-Centrum). Centrum Danych jest przygotowane do przyjęcia nowych epizodów od nowych dostawców.

Część epizodów zawiera ciągłe dane sejsmiczne, w innych udostępniono sygnały oraz komplementarne z nimi katalogi wstrząsów. Ponadto dostarczone są informacje o położeniu czujników zarówno sejsmicznych, jak i innych używanych w danym epizodzie (np. czujników ciśnienia w otworach wiertniczych). Dane produkcyjne związane z poszczególnymi epizodami zawierają zróżnicowane typy danych: objętość zatłaczanego płynu do otworu, położenie frontu eksploatacji, ciśnienie płynu zatłoczonego do otworu wiertniczego, poziom wody, trajektorie otworów wiertniczych, geometrię ściany wydobywczej i inne.

1.3. Usługi dostępu do oprogramowania naukowego

Platforma IS-EPOS umożliwia dostęp do specjalistycznego oprogramowania naukowego w zakresie oceny zagrożenia działalnością przemysłową, w szczególności antropogenicznego zagrożenia sejsmicznego. Część oprogramowania została stworzona i udostępniona na podstawie licencji GNU wersji 3 i nowszych (<http://www.gnu.org/licenses/>). Oprogramowanie zostało zgrupowane wokół wybranych tematów dotyczących problematyki badawczej sejsmiczności antropogenicznej. Usługa dostępu do tych narzędzi oraz części narzędzi wizualizacji danych jest realizowana przez przestrzeń roboczą użytkownika, do której można ściągać wybrane i niezbędne do przeprowadzenia obliczeń dane dotyczące epizodów. Poprzez możliwość zastosowania konkretnego oprogramowania do wybranych lub skompilowanych przez użytkownika danych jest możliwe prowadzenie badań naukowych zorientowanych na konkretny epizod (praca poprzez użycie różnych metod na danych z jednego zestawu z wybranego epizodu) lub na wybraną metodykę badawczą (zastosowanie jednej metody na różnych zestawach danych z wybranych epizodów).

1.3.1. Oprogramowanie do obliczania parametrów probabilistycznego stacjonarnego zagrożenia sejsmicznego

Usługa ta umożliwia wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz skumulowanej funkcji rozkładu magnitudy przy pomocy zestawu programów. Do wyznaczenia rozkładu magnitudy zastosowano cztery różne metody: nieograniczoną metodę nieparamet-

trycznej estymacji jądrowej, metodę nieparametrycznej estymacji jądrowej dla rozkładu magnitud ograniczonego od góry, metodę największej wiarygodności używającą nieograniczonego rozkładu Gutenberga-Richtera, metodę największej wiarygodności używającą ograniczonego od góry rozkładu Gutenberga-Richtera. Górna granica rozkładu magnitudy jest wyznaczana na podstawie formuły przedstawionej przez Kijko i Sellevolla (1989). Dodatkowo wyznaczane są takie parametry jak aktywność sejsmiczna, wartość współczynnika b w rozkładzie Gutenberga-Richtera czy też parametry wygładzania w zależności od wybranej metody. Wymienione parametry mogą zostać następnie użyte w probabilistycznej analizie zagrożenia sejsmicznego, np. w szacowaniu prawdopodobieństwa przewyższenia zadanej magnitudy, maksymalnej magnitudy oraz średniego czasu powrotu.

1.3.2. Oprogramowanie do wyznaczania zmiennego w czasie zagrożenia sejsmicznego (wokół postępującego frontu robót górniczych)

Usługa udostępniająca oprogramowanie do wyznaczania zmiennego w czasie zagrożenia sejsmicznego jest dedykowana dla celów badania sejsmiczności związanej z górnictwem. Jej główną funkcją jest wyznaczenie parametrów zagrożenia sejsmicznego związanych z postępowaniem robót górniczych i ewentualne wykazanie zależności pomiędzy sejsmicznością a postępowaniem frontu robót. Oprogramowanie to działa analogicznie jak oprogramowanie do obliczania parametrów stacjonarnego zagrożenia sejsmicznego (1.3.1). Parametry zagrożenia są wyznaczane dla każdego okna czasowego, a następnie prezentowane graficznie.

1.3.3. Oprogramowanie do wyznaczania zmiennego w czasie zagrożenia sejsmicznego (w wybranym obszarze)

Ta usługa to uogólnienie programów do wyznaczania zmiennego w czasie zagrożenia sejsmicznego. Można ją zastosować w dowolnym epizodzie. Oprogramowanie to działa analogicznie jak oprogramowanie do obliczania parametrów stacjonarnego zagrożenia sejsmicznego (1.3.1). Parametry zagrożenia są wyznaczane dla każdego okna czasowego, a następnie prezentowane graficznie w postaci odpowiednich wykresów.

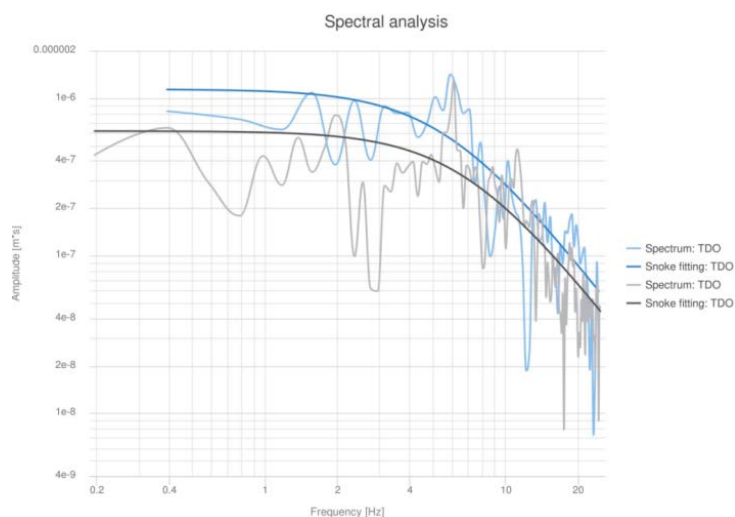
1.3.4. Oprogramowanie do wyznaczania progu kompletności katalogu sejsmicznego

Próg kompletności katalogu sejsmicznego (M_c) zdefiniowany jest jako najmniejsza magnituda dla jakiej wszystkie zjawiska w określonym czasie i przestrzeni zostały zarejestrowane przez sieć pomiarową. Jest to podstawowy parametr używany w wielu analizach sejsmicznych. Na platformie IS-EPOS używane są cztery różne metody obliczania M_c zaproponowane przez Wiemera i Wyssa (2000). Są to: metoda maksymalnej krzywizny, test 90% i 95% zgodności dopasowania oraz test zgodności dopasowania zmodyfikowany według Leptokarpoulos i in. (2013).

1.3.5. Analiza spektralna

Za pomocą tego oprogramowania możliwe jest wyznaczenie parametrów źródła sejsmicznego na podstawie analizy spektralnej fal P i S. Na podstawie widma fal wyznaczane

są dwa niezależne parametry: poziom spektralny i częstotliwość narożna (rys. 3). Do ich oszacowania używany jest algorytm dopasowania Snoke'a (1987). Na podstawie założonego modelu źródła (Brune 1970) i wyznaczonych parametrów spektralnych wyznaczane są dla każdego zapisu moment sejsmiczny, magnituda momentu, energia fal P i S, promień źródła, spadek naprężeń, naprężenie pozorne i ślizg na uskoku.



Rys. 3. Spektrum zapisu fali S na horyzontalnych składowych sejsmometru

Fig. 3. S-waves spectra from two horizontal components in the same station

1.3.6. Inwersja Tensora Momentu Sejsmicznego

Za pomocą tego oprogramowania jest wyznaczany mechanizm wstrząsu w postaci tensora momentu sejsmicznego. Jest to implementacja programu „focimt” (Kwiatkiewicz i Martínez-Garzon 2016) w środowisku internetowym. Program korzysta z wartości i znaku przemieszczenia pierwszych wstąpień fali P zarejestrowanych na stacjach sejsmicznych. Wartości te następnie są użyte do inwersji tensora momentu sejsmicznego (<http://www.induced.pl/focimt/>).

1.3.7. Lokalizacja wstrząsów

Oprogramowanie TRMLOC (Dębski 2015; Dębski i Klejment 2016) umożliwia inwersję pierwszych wstąpień fali sejsmicznej do uzyskania lokalizacji hipocentrum wstrząsu. Algorytm inwersji jest oparty na teorii probabilistycznej inwersji (Dębski 2015), dzięki temu jest możliwe wyznaczenie najbardziej prawdopodobnej lokalizacji i innych zdefiniowanych estymatorów, a także wyznaczenie przedziałów niepewności wyznaczonej lokalizacji.

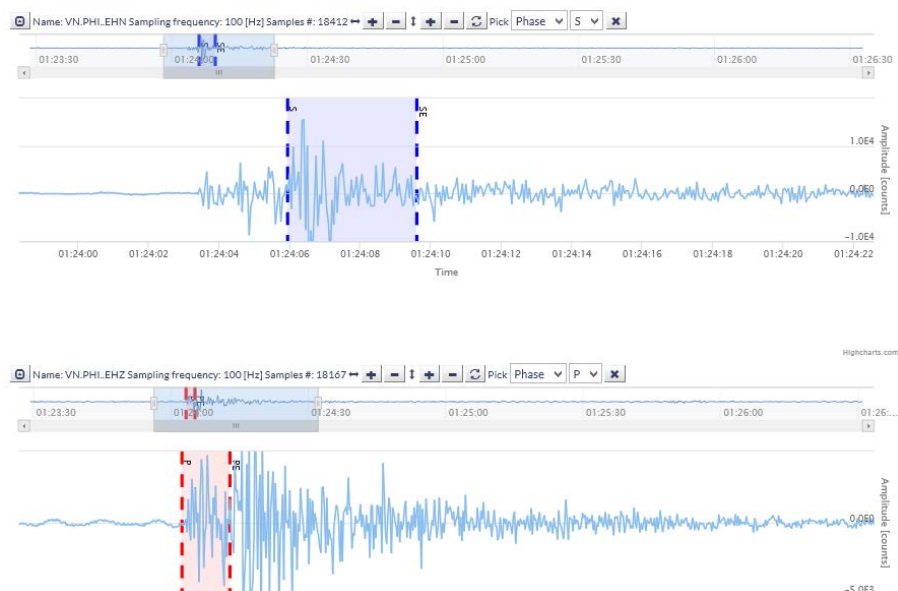
1.3.8. Inwersja pola naprężeń

Oprogramowanie do wyznaczania dominującego pola naprężeń na podstawie mechanizmów zjawisk sejsmicznych opiera się na pakiecie MSATSI (Martínez-Garzón i in. 2014b).

Używając tego pakietu, otrzymuje się orientację przestrzenną głównych osi naprężeń powodujących powstanie zjawisk sejsmicznych oraz wartość względnego stosunku wielkości naprężeń głównych σ_1 , σ_2 , σ_3 (parametr R). Powyższe parametry mogą zostać wyznaczone dla wybranego obszaru punktowo (przypadek 0D), dla profilu lub zmian w czasie (przypadek 1D) lub całego obszaru podzielonego na mniejsze fragmenty (przypadek 2D). Algorytm MSATSI jest oparty na bibliotece SATSI (Hardebeck i Michael 2006).

1.3.9. Oprogramowanie do podstawowych operacji na danych

Ta sekcja zawiera programy do podstawowych operacji na danych, w tym narzędzia służące do: przeliczania układów współrzędnych, wyznaczania charakterystyki sejsmometru, pikowania fal sejsmicznych (rys. 4), wyszukiwania i wyboru sygnałów do przetwarzania, filtrowania katalogów sejsmicznych oraz przeliczania magnitud wyznaczonych różnymi metodami do wybranego typu magnitudy.



Rys. 4. Przykład działania narzędzia do pikowania fal sejsmicznych, fala P (dolny panel) i fala S (górny panel)

Fig. 4. Picking tool demonstration, P-wave phase (bottom) and S-wave phase (top)

1.3.10. Usługi wizualizacji

Wizualizacja danych i wyników przetwarzania są istotną częścią platformy. Narzędzia te pozwalają na zilustrowanie rozwoju sejsmiczności razem ze zmianami parametrów produkcyjnych w czasie dla każdego epizodu. W zależności od rodzaju technologii indukującej wstrząsy możemy wyróżnić następujące narzędzia wizualizacji:

- wizualizacja postępu frontu robót górniczych,
- aktywność sejsmiczna wraz ze zmianami poziomu wody w zbiorniku, objętości wody w zbiorniku, tempo zatłaczania płynu do otworu lub ciśnienie zatłaczanego płynu,

- histogramy tempa zatłaczania i ciśnienia płynu ,
- mechanizmy wstrząsów w postaci „pilek plażowych” na mapie lub indywidualnie dla konkretnego zjawiska,
- zintegrowane wizualizacje najważniejszych danych z epizodu oraz wizualizacje 3D.

1.4. Repozytorium dokumentów

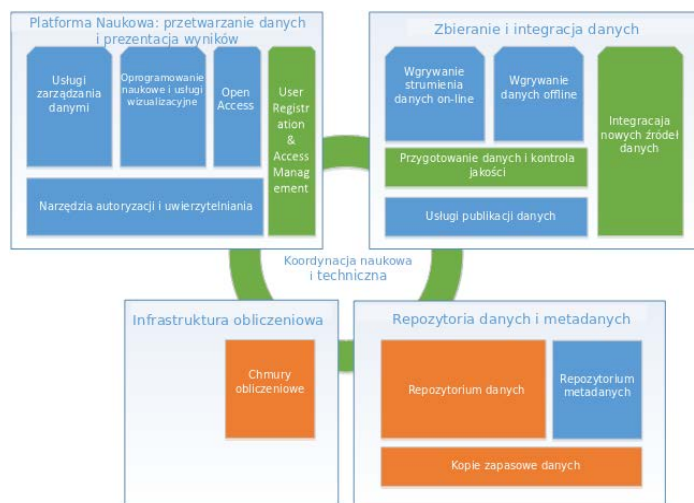
Repozytorium dokumentów, utworzone jako integralna część platformy IS-EPOS, bazuje na oprogramowaniu EPrints (<http://www.eprints.org/software/>). Zgodnie z założeniami projektu jest to oprogramowanie typu *open source* o szerokich możliwościach konfiguracyjnych, co pozwoliło na odpowiednie dostosowanie wzorcowej bazy na potrzeby tworzonej platformy. W repozytorium dostępne są następujące typy dokumentów: artykuły naukowe, książki, fragmenty książek, raporty, prace, pliki graficzne, materiały konferencyjne i warsztatowe, materiały edukacyjne, Podręcznik Użytkownika Platformy IS-EPOS, inne (np. filmy). Dokumenty te są przypisane do odpowiednich epizodów i/lub oprogramowania. Dodatkowo istnieje możliwość ich przeglądania według tematu, autorów oraz roku wydania.

Repozytorium dokumentów stanowi ważny element platformy głównie ze względu na fakt, że zagrożenia związane z działalnością przemysłową mogą powodować konflikty pomiędzy społeczeństwem a przedstawicielami przemysłu. Negatywną reakcją społeczności lokalnych wywołuje w szczególności zagrożenie bezpieczeństwa budowli cywilnych. Stąd też ważne jest, aby naukowo zweryfikowane informacje w postaci publikacji i innych materiałów były dostępne w jednym miejscu. Dzięki temu transfer i upowszechnienie wiedzy na temat sejsmiczności antropogenicznej i zagrożeń z nią związanych będą szybsze i bardziej efektywne.

2. Architektura Systemu

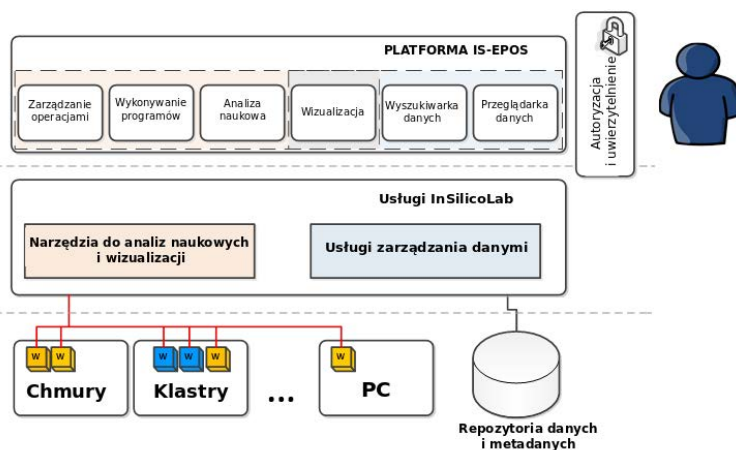
IS-EPOS został stworzony jako portal naukowy. Jest to platforma internetowa, dzięki której naukowcy mają dostęp do danych związanych z epizodami sejsmiczności antropogenicznej oraz do zasobów obliczeniowych pozwalających na zaawansowane operacje na danych. Zasoby udostępniane na platformie IS-EPOS z jednej strony są dostarczane przez Repozytoria Danych i Metadanych (Centrum Danych), zarządzane w komponencie Zbierania i Integracji Danych, a z drugiej przy pomocy Infrastruktury Obliczeniowej. Funkcjonalny związek pomiędzy tymi komponentami Węzła Sejsmiczności Antropogenicznej zaprezentowano na rysunku 5. Wszystkie elementy systemu są zarządzane przez Naukowo-Techniczną Procedurę Koordynacji. Elementy Węzła Sejsmiczności Antropogenicznej przedstawia rysunek 6.

Implementacja Tematycznego Węzła Sejsmiczności Antropogenicznej odbywa się na podstawie schematu InSilicoLab (Kocot i in. 2014), który zawiera wszystkie składowe niezbędne do funkcjonowania oprogramowania i usług na platformie IS-EPOS i w ogólności w całym Węźle. Technologia InSilicoLab pozwala również na integrację z zaawansowaną infrastrukturą obliczeniową, co umożliwi uruchomienie oprogramowania w chmurze obliczeniowej, klastrach serwerów o wysokiej wydajności obliczeniowej lub na osobnych



Rys. 5. Węzeł Sejsmiczności Antropogenicznej i zależności pomiędzy komponentami. Niebieskie pola oznaczają rozwiązania IT, zielone – procesy weryfikacji przeprowadzane przez przeszkolonych specjalistów, pomarańczowe – oznaczają zewnętrzną infrastrukturę do której dostęp następuje w trakcie używania niektórych programów i usług

Fig. 5. TCS and its relations to other components. The blue color is used for IT solutions built within the project; the green color marks verification processes that have to be performed by the appointed individuals; the orange color is used for external infrastructure components used by other services



Rys. 6. Schemat implementacji oprogramowania i usług poprzez technologię InSilicoLab w Węźle Sejsmiczności Antropogenicznej (Kocot i in. 2014)

Fig. 6. TCS services implementation based on the InSilicoLab framework (Kocot et al. 2014)

serwerach bądź prywatnych komputerach. Schemat implementacji oprogramowania i usług w Węźle Sejsmiczności Antropogenicznej zaprezentowano na rysunku 6. InSilicoLab opiera się na tak zwanych workerach, gdzie odbywają się obliczenia, których wyniki są następnie przekazywane użytkownikowi przez platformę IS-EPOS lub inne portale naukowe. Poprzez

usługi InSilicoLab możliwe jest zarządzanie i przeprowadzanie równoległe obliczeń o zróżnicowanym stopniu skomplikowania (zajmujących od kilku sekund lub minut po wielogodzinne obliczenia). Programy mogą być również uruchamiane w kaskadzie, gdzie wynik jednych obliczeń jest przekazywany do kolejnego etapu.

Infrastruktura oparta na InSilicoLab jest zintegrowana ze środowiskiem Liferay (<http://www.liferay.com>). Za jego pomocą wprowadzone zostały mechanizmy autoryzacji i uwierzytelnienia wraz z interfejsami dla użytkownika i administratorów zarządzających prawami dostępu do danych i oprogramowania. Dodatkowo *Liferay* posiada mechanizm tworzenia dokumentacji typu „wiki” i jej publikacji w postaci stron internetowych.

Podsumowanie

Platforma IS-EPOS to w pełni funkcjonalny prototyp Tematycznego Węzła Sejsmiczności Antropogenicznej dla celów projektu EPOS. W obrębie węzła zintegrowano komplementarne dane geofizyczne i technologiczne dotyczące sześciu wybranych przypadków do oceny zagrożenia sejsmicznością antropogeniczną. Takie zbiory danych skorelowane w czasie i w przestrzeni oraz powiązane z czynnikiem technologicznym wywołującym sejsmiczność nazwano Epizodami Sejsmiczności Antropogenicznej. Platforma stanowi stronę www, na której użytkownicy mają dostęp do: oprogramowania przetwarzającego dane, usług wizualizacji danych oraz narzędzi do przeglądania i wyszukiwania danych. Głównym celem stworzenia tej wirtualnej przestrzeni badawczej było trwałe i bezpieczne udostępnienie zaawansowanej infrastruktury badawczej dla społeczności naukowej, w konsekwencji ułatwienie prowadzenia wysokiej jakości badań naukowych oraz promocja dostępu do najnowocześniejszych metod i wspieranie efektywnej współpracy z międzynarodowymi sieciami informatycznymi działającymi na rzecz badań naukowych. Prototypowy Węzeł został udostępniony dla użytkowników w styczniu 2016. Dane, oprogramowanie i wszelkie usługi powiązane są otwarte dla naukowców z instytucji badawczych i uniwersytetów oraz partnerów przemysłowych, a także wszystkich innych zainteresowanych tym tematem. IS-EPOS jest dostępny bezpłatnie pod adresem <https://tcs.ah-epos.eu/>.

Praca została częściowo wykonana w ramach projektu IS-EPOS: Cyfrowa przestrzeń badawcza sejsmiczności indukowanej dla celów EPOS, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w latach 2013–2015 oraz w ramach projektu EPOS Implementation Phase sfinansowanej w ramach programu Horyzont2020 – Research and Innovation Framework Programme w konkursie H2020 – INFRADEV-1-2015-1 w latach 2015–2019.

Literatura

- Brune, J.N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75, s. 4997–5009.
- Davies i in. 2013 – Davies, R., Foulger, G., Bindley, A. i Styles, P. 2013. Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons. *Marine and Petroleum Geology*, 45, s. 171–185.
- Debski, W. 2015. Using meta-information of a posteriori Bayesian solutions of the hypocenter location task for improving accuracy of location error estimation. *Geophysical Journal International*, 201, 3, s. 1399–1408.

- Debski, W. i Klejment, P. 2016. *The new algorithm for fast probabilistic hypocenter locations*. (Submitted and accepted for publication in Acta Geophysica).
- Hand, E. 2014. Injection wells blamed in Oklahoma earthquakes. *Science*, 345, s. 13–14.
- Hardebeck, J.L. i Michael, A.J. 2006. Damped regional-scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 111, B11310, DOI:10.1029/2005JB004144.
- Izadi, G. i Elsworth, D. 2014. Reservoir stimulation and induced seismicity: Roles of fluid pressure and thermal transients on reactivated fractured networks. *Geothermics*, 51, s. 368–379.
- Izadi, G. i Elsworth, D. 2015. The influence of thermal-hydraulic-mechanical- and chemical effects on the evolution of permeability, seismicity and heat production in geothermal reservoirs. *Geothermics*, 53, s. 385–395.
- Keranen, K.M., Weingarten, M., Abers, G.A., Bekins, B.A. i Ge, S. 2014 – Sharp increase in central Oklahoma seismicity since 2008 induced by massive wastewater injection. *Science*, 345, s. 448–451.
- Kijko, A. i Sellevoll, M.A. 1989. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79, s. 645–654.
- Knopoff, L. i Randall, M.J. 1970. The compensated linear-vector dipole. A possible mechanism for deep earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 75, s. 1957–1963.
- Kocot, J. i in. 2014 – Kocot, J., Szepieniec, T., Wójcik, P., Trzeciak, M., Golik, M., Grabarczyk, T., Siejkowski, H. i Sterzel, M. 2014. A framework for domain-specific science gateways. *E-science on Distributed Computing Infrastructure*, s. 130–146.
- Kozłowska, M. i in. 2015 – Kozłowska, M., Orlecka-Sikora, B., Kwiatek, G., Boettcher, M. i Dresen, G. 2015. Nano-seismicity and picoseismicity rate changes from static stress triggering caused by a MW 2.2 earthquake in Mponeng gold mine, South Africa. *Journal of Geophysical Research*, 120, doi:10.1002/2014JB011410.
- Kwiatek, G. i in. 2016 – Kwiatek, G., Martínez-Garzón, P. i Bohnhoff, M. 2016: HybridMT: A MATLAB/shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement. *Seismological Research Letters* 87(4), s. 1–13.
- Leptokaropoulos, K.M., Karakostas, V.G., Papadimitriou, E.E., Adamaki, A.K., Tan, O. i Inan, S. 2013. A homogeneous earthquake catalogue compilation for western turkey and magnitude of completeness determination. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103, 5, s. 2739–2751.
- Lizurek, G. i Lasocki, S. 2014. Clustering of mining-induced seismic events in equivalent dimension spaces. *Journal of Seismology*, 18, s. 543–563.
- Marcak, H. i Mutke, G. 2013. Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal of Seismology* vol. 17(4), s. 1139–1148.
- Martínez-Garzón, P. i in. 2014a – Martínez-Garzón, P., Kwiatek, G., Ickrath, M. i Bohnhoff, M. 2014a. MSATSI: A MATLAB package for stress inversion combining solid classic methodology, a new simplified user-handling and a visualization tool. *Seismological Research Letters*, 85(4), s. 1–9.
- Martínez-Garzón, P. i in. 2014b – Martínez-Garzón, P., Kwiatek, G., Sone, H., Bohnhoff, M., Dresen, G. i Hartline, C. 2014b. Spatiotemporal changes, faulting regimes, and source parameters of induced seismicity: A case study from The Geysers geothermal field. *Journal of Geophysical Research*, 119, DOI: 10.1002/2014JB011385.
- McGarr, A. i Simpson, D. 1997. Keynote lecture: a broad look at induced and triggered seismicity, “Rockbursts and seismicity in mines”. [W:] Gibowicz SJ, Lasocki S (eds). *Proceeding of 4th international symposium on rockbursts and seismicity in mines*, Poland, A.A. Balkema, Rotterdam, s. 385–396.
- Orlecka-Sikora, B. i in. 2014 – Orlecka-Sikora, B., Cesca, S., Lasocki, S., Lizurek, G., Wiejacz, P. i Rudziński, L. 2014. Seismogenesis of exceptional ground motion due to a sequence of mining induced tremors from Legnica-Głogów Copper District in Poland. *Geophysical Journal International* doi: 10.1093/gji/ggu109.
- Rutqvist, J. i in. 2014 – Rutqvist, J., Cappa, F., Rinaldi, A.P. i Godano, M. 2014. Modeling of induced seismicity and ground vibrations associated with geologic CO₂ storage, and assessing their effects on surface structures and human perception. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 24, s. 64–77.
- Skoumal, R.J., Brudzinski, M.R. i Currie, B.S. 2015. Earthquakes induced by hydraulic fracturing in Poland Township, Ohio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, s. 189–197.
- Snoke, J.A. 1987. Stable determination of (Brune) stress drops. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77, s. 530–538.
- Stec, K. 2007. Characteristics of seismic activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. *Geophysical Journal International* 168, s. 757–768.
- Suckale, J. 2009. Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Advances in Geophysics*, 51, s. 55–106.

- Vavryčuk i in. 2008 – Vavryčuk, V., Bohnhoff, M., Jechumtálová, Z., Kolář, P. i Šílený, J. 2008. Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced during the 2000 injection experiment at the KTB site, Germany: A result of tensile faulting or anisotropy of a rock? *Tectonophysics*, 456, s. 74–93.
- Wang i in. 2016 – Wang, R., Gu, Y.J., Schultz, R., Kim, A. i Atkinson, G. 2016: Source analysis of a potential hydraulic-fracturing-induced earthquake near Fox Creek, Alberta. *Geophysical Research Letters*, 43, s. 564–573.
- Wiemer, S. i Wyss, M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, s. 859–869.
- Wiszniewski i in. 2015 – Wiszniewski, J., Giang, N.V., Plesiewicz, B., Lizurek, G., Van, D.Q., Khoi, L.Q. i Lasocki, S. 2015. Preliminary results of anthropogenic seismicity monitoring in the region of Song Tranh 2 Reservoir, Central Vietnam. *Acta Geophysica*, 63, 3, s. 843–862.
- Yadav i in. 2015 – Yadav, A., Gahalaut, K., Mallika, K. i Rao, P. 2015. Annual Periodicity in the seismicity and water levels of the Koyna and Warna reservoirs, Western India: a singular spectrum analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105, s. 464–472.