

ANDRZEJ LEŚNIAK*, STANISŁAWA PORZYCKA**

Kompleksowa interpretacja pomiarów satelitarnych i naziemnych w ocenie zagrożeń na terenach górniczych i pogórnich

Wprowadzenie

Związek eksploatacji podziemnej ze szkodami górniczymi w wielu przypadkach stanowi przedmiot sporów pomiędzy kopalnią a osobami lub instytucjami, których własność jest zlokalizowana na terenie górniczym. Kwalifikacja, ocena i ewentualna wycena szkód dokonywana przez służby kopalniane oraz biegłych w wielu wypadkach opiera się na danych o położeniu eksploatowanych pokładów i pomiarach geodezyjnych prowadzonych w zagrożonych rejonach często nie uwzględniając szeregu innych informacji dostępnych na podstawie pomiarów naziemnych i satelitarnych. Te dodatkowe pomiary dostarczają najczęściej informacji z tych części obszarów górniczych, gdzie nie są prowadzone rutynowe i cykliczne pomiary geodezyjne. Informacje te w wielu wypadkach mogą stanowić cenne przesłanki do określania czy konkretne żądania są zasadne czy bezpodstawne i służyć pomocą w obiektywnej ocenie sytuacji.

Kompleksowa i wnikliwa analiza rezultatów wielu pomiarów w kontekście sytuacji geologicznej i prowadzonych robót górniczych, która jest tematem tego artykułu jest możliwa jedynie w wypadku, gdy ograniczymy rozważania do obszaru górniczego jednej kopalni. Omówione w artykule rezultaty pomiarów satelitarnych i powierzchniowych dotyczą kopalni „Kazimierz-Juliusz” w Sosnowcu. Jest to jedyna czynna kopalnia dawnego Zagłębia Dąbrowskiego. Celem przedstawionej analizy jest odpowiedź na pytanie czy dane pomiarów satelitarnych uzupełniają w sposób istotny dane pomiarów naziemnych w aspekcie określenia związków występowania szkód powierzchniowych z prowadzoną

* Dr hab. inż., prof. AGH, ** Mgr inż., Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków;
e-mail: lesniak@agh.edu.pl

eksploatacją węgla. Przedstawiona analiza została poprzedzona krótką charakterystyką pomiarów (zarówno powierzchniowych jak i satelitarnych) wykonywanych na obszarach górniczych i opisem metod ich analizy.

1. Satelitarne i naziemne metody pomiaru obniżeń terenu w rejonach eksploatacji górniczej

Obszary współczesnej lub prowadzonej w przeszłości podziemnej eksploatacji górniczej są zagrożone występowaniem różnego rodzaju deformacji terenu. Mogą to być nie tylko gwałtowne przemieszczenia o znacznej amplitudzie, będące głównie efektem zapadania się terenu wskutek migrujących ku górze pustek lub stref rozluźnień, ale również niewielkie, długookresowe osiadania występujące nawet wiele lat po zakończeniu wydobywania kopaliny. Zarówno w pierwszym jak i w drugim przypadku na charakter deformacji ma wpływ wiele czynników, w tym sposób eksploatacji, budowa geologiczna, a także warunki hydrogeologiczne. Dla zapewnienia większego bezpieczeństwa powszechnego na terenach górniczych konieczne jest jak najdokładniejsze rozpoznanie mechanizmu występujących tam deformacji i stały ich monitoring.

1.1. Pomiary naziemne

W rejonach prowadzonej eksploatacji, gdzie prawdopodobieństwo wystąpienia osiadań jest największe prowadzone są cykliczne pomiary geodezyjne w zastabilizowanych punktach obserwacyjnych. Pomiary te mogą odbywać się na specjalnie określonych liniach badawczych lub sieciach kontrolnych. Najczęściej wyznacza się obniżenia na podstawie precyzyjnej niwelacji geometrycznej. W bardziej precyzyjnych badaniach mogą być również wyznaczane odkształcenia poziome poprzez wykonanie pomiarów kątowno-liniowych. Wskaźniki wyznaczone w trakcie pomiarów geodezyjnych mogą być prognozowane w oparciu o różne teoretyczne modele deformacji górniczych. Porównanie wyników pomiarów z obliczeniami pozwala na określenie trafności i dokładności prognozy. Tak prowadzone pomiary kontrolne na wyznaczonych liniach badawczych obejmują obserwacjami jedynie liniowe wycinki badanego obszaru. Dąży się do rozszerzenia linii pomiarowych na sieci lub przynajmniej zbiory punktów rozproszonych. Pomimo wykorzystania w wielu przypadkach dokładnych pomiarów GPS cykliczne pomiary prowadzone w punktach wiążą się ze znacznymi kosztami. Wykorzystanie obserwacji satelitarnych do stałego monitoringu terenów górniczych może wiązać się ze znaczącym spadkiem nakładów finansowych oraz ze wzrostem wiarygodności obserwacji.

1.2. Pomiary satelitarne

Satelitarne obserwacje obniżeń terenu prowadzone są w zakresie radarowym z użyciem systemów SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*). Jest to radar z anteną syntetyzowaną.

Wysyła on promieniowanie mikrofalowe, a następnie rejestruje je po odbiciu od obiektów terenu. Zaletą systemu jest możliwość ciągłej obserwacji powierzchni Ziemi o każdej porze. Obecnie w radar SAR wyposażone są satelity m.in. Europejskiej Agencji Kosmicznej: ERS-2, ENVISAT, japoński ALOS, oraz kanadyjski RADARSAT-1. Dla potrzeb detekcji deformacji powierzchni terenu wykorzystane jest zjawisko interferencji fal radarowych.

Metoda InSAR wykorzystująca to zjawisko polega na przetwarzaniu dwóch obrazów radarowych wykonanych z różnych pozycji i/lub w różnym czasie. Obrazy nakładane są na siebie i dla każdego ich piksela obliczana jest różnica faz sygnału radarowego. W rezultacie powstaje obraz złożony z prążków interferencyjnych obrazujących wielkość deformacji. Dokładność pomiarów przemieszczenia pionowego wynosi od 5 do 10 mm/35 dni (czas repetycji) i jest uzależniona od warunków panujących na powierzchni i ponad powierzchnią Ziemi (opady atmosferyczne, pokrywa śnieżna, zmiany wilgotności i temperatury w atmosferze) (Porzycka, Leśniak 2007).

Rola badań InSAR w analizie osiadań terenu indukowanych eksploatacją górnictwem była wielokrotnie raportowana przez badaczy zagranicznych i polskich (np. Perski 1999). Potwierdzono tam tezę, że rozkład prążków ściśle odpowiada obszarom występowania dużych osiadań terenu powstałych w wyniku prowadzenia podziemnej eksploatacji węgla, tym samym identyfikuje obszary, na których mogą występować tzw. szkody górnicze. Metoda ta mimo swych ograniczeń spowodowanych niewystarczającą koherencją sygnałów na poszczególnych obrazach (spowodowaną czasową i geometryczną dekorelacją sygnału, a także z niejednorodnością atmosfery) może być z powodzeniem wykorzystana do monitoringu osiadań. Metodą, która poprzez przetwarzanie długich serii czasowych pozwala wyeliminować niektóre z wyżej wymienionych ograniczeń, jest metoda PSInSAR.

Metoda PSInSAR, w odróżnieniu od klasycznej metody InSAR, polega na przetwarzaniu dużej liczby obrazów radarowych (więcej niż 30) tego samego obszaru, wykonanych w różnym czasie. Bada ona powolne przemieszczenia pionowe jedynie tych punktów terenu, które na wszystkich zobrazowaniach radarowych cechuje stabilna amplituda i faza sygnału. Punkty te, nazwane stabilnymi rozpraszaczami PS (ang. *Permanent Scatterers or Persistent Scatterers*) odpowiadają takim obiektom terenu jak budynki, mosty, wiadukty, latarnie, wychodnie skał itp. Technika PSInSAR sprawdza się najlepiej na obszarach zabudowanych, ponieważ najwięcej stabilnych rozpraszaczy znajduje się właśnie na takich terenach. Główną zaletą interferometrii stabilnych rozpraszaczy jest eliminacja ograniczeń, które pojawiają się w przypadku metody InSAR, a także możliwość wykorzystania wszystkich zobrazowań radarowych tego samego obszaru (dla tej samej ścieżki i kadru) bez względu na ich odległość bazową (Perski 2006; Leśniak i in. 2007).

Warto zaznaczyć, że metody PSInSAR i InSAR w dużej mierze uzupełniają się nawzajem. Pierwsza z nich rozpoznaje długookresowe, powolne przemieszczenia pionowe o niewielkiej amplitudzie, zaś druga przemieszczenia przebiegające ze znacznie większą szybkością. Metoda pierwsza sprawdza się dla terenów o dużej liczbie stabilnych reflektorów (PS) dostarczając dane punktowe, zaś druga metoda daje informację powierzchniową niezależną od istnienia punktów PS na danym terenie.

Interferencyjna analiza danych radarowych dostarcza bezpośrednich informacji o występujących przemieszczeniach pionowych i pozwala na szacowanie wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu. Istnieją również metody pośrednie dostarczające informacji o zagrożeniu deformacjami powierzchniowymi. Są nimi na przykład analizy prowadzone na zdjęciach satelitarnych (zarówno radarowych jak i w zakresie światła widzialnego – Landsat) pod kątem wydzielenia tzw. lineamentów. Lineamenty są to cechy liniowe wyróżnione na podstawie różnic fototonalnych występujące na obrazach satelitarnych i odzwierciedlające różne obiekty geomorfologiczne i tektoniczne oraz mające związek z procesami przebiegającymi na lub pod powierzchnią Ziemi. Przyjmuje się tym samym, że lineamenty mają związek z lokalnymi i regionalnymi strefami nieciągłości. Wykazano ponadto (Pilecka 2006), że istnieje jakościowy związek pomiędzy lineamentami a wysokoenergetyczną sejsmicznością indukowaną pracami górniczymi. Związek ten ma geomechaniczną interpretację opartą na wzajemnych związkach sejsmiczności indukowanej z tektoniką i kierunku lineamentów z wektorami par wstrząsów (Pilecka 2006).

2. Pomiary obniżenia terenu dla obszaru górniczego kopalni Kazimierz-Juliusz

Dane zaprezentowane w pracy dotyczą terenu górniczego czynnej kopalni „Kazimierz-Juliusz”. Jest ona położona w północno-wschodniej części GZW i graniczy z kopalniami „Porąbka-Klimontów”, „Niwka-Modrzejów” oraz „Jan Kanty” (rys. 1), w których zakończono eksploatację węgla. Wykorzystane dane dotyczą przedziału czasu od 1994 do 2003 roku.



Rys. 1. Obszary górnicze wybranych kopalń w północno-wschodniej części GZW

Fig. 1. Mining areas in north-eastern part of Upper Silesian Coal Basin

2.1. Eksploatacja

Obecnie kopalnia „Kazimierz-Juliusz” jest kopalnią jednoruchową. Eksploatacja prowadzona jest w rejonie I – Kazimierz, obejmującym partię Feliks W i E. Złoże udostępnione jest za pomocą 5 szybów: Kazimierz I, Kazimierz II, Kazimierz V, Maczki, Karol (rys. 3B). Eksploatacja w KWK „Kazimierz-Juliusz” prowadzona jest w pokładzie 510 w partii Centralnej-1 na poz. V oraz w partii Feliks i Maczki na poz. IV. W latach 1991 do 2000 wydobyte kopaliny wynosiło od 923 do 1203 tys. t/rok.

2.2. Tektonika

W obrębie obszaru górniczego KWK „Kazimierz-Juliusz” występują dwa elementy strukturalne. W centralnej części rejonu Kazimierz występuje niecka bytomsko-kazimierzowska. Kierunek jej osi to NWW-SEE. Drugim elementem strukturalnym jest kopuła maczkowska, która stanowi przedłużenie siodła głównego w kierunku na E.

Budowa geologiczna rejonu badań charakteryzuje się występowaniem licznych uskóków. Uskoki o największych zrzutach (od 150 do 300 m) mają przebieg południkowy. Wymienić tu można uskók Klimontowski, Feliksowy, Jakubowski, Dorota, Będziński, czy uskoki Nożycowe (rys. 2B). Mniejsze wartości zrzutów, około 10–30 m, są typowe dla



Rys. 2. Obszar górniczy KWK „Kazimierz-Juliusz”

A – obniżenia terenu wyznaczone z wykorzystaniem techniki PSInSAR oraz InSAR; B – rozmieszczenie głównych uskóków wraz z lokalizacją wstrząsów górniczych o energii rzędu 10^3 – 10^4 J w latach 1995–1999

Fig. 2. Mining area of „Kazimierz-Juliusz” mine

A – subsidence detected using PSInSAR and InSAR techniques; B – location of the main faults with localization of the seismic tremors with energy 10^3 – 10^4 J over a period 1995–1999

bardzo licznych dyslokacji o przebiegu równoleżnikowym. Warto podkreślić, że taka budowa geologiczna znacznie utrudnia prowadzenie eksploatacji kopaliny.

2.3. Dane PSInSAR

Dane PSInSAR zaprezentowane w pracy przedstawiają wartości średnich szybkości obniżenia terenu obliczone na podstawie analizy danych radarowych z okresu od 1992 do 2002 roku. Metoda PSInSAR bardzo dobrze sprawdza się w detekcji powolnych deformacji terenu na obszarach zabudowanych, gdzie nie brakuje punktów PS. W obrębie obszaru górniczego kopalni „Kazimierz-Juliusz”, którego powierzchnia wynosi 23,08 km² zidentyfikowano niemal 1000 punktów PS (rys. 2A). Należy zaznaczyć, że w rejonie badań zabudowa mieszkaniowa zajmuje jedynie 26% powierzchni, a tereny leśne aż 22% powierzchni. Największe zagęszczenie punktów PS występuje na obszarach osiedli mieszkaniowych (dzielnice miasta Sosnowca: Kazimierz Górniczy, Ostrowy Górnicze (kolonia Feliks), Maczki, Stare Zawodzie, osiedle Juliusz). Część południowa i środkowa obszaru badań jest niemal pozbawiona danych PSInSAR. Są to tereny niezabudowane (przede wszystkim lasy i tereny zadrzewione) lub też rejon, dla których charakterystyczne są duże wartości przemieszczeń pionowych (położone w strefie wpływów eksploatacji). Punkty PS charakteryzujące się największymi wartościami średnich szybkości obniżenia (> 3 mm/rok) występują generalnie w obrębie kolonii Feliks oraz osiedla Juliusz, a także w rejonie Starego Zawozia. Północna część terenu górniczego jest stabilna.

2.4. Dane InSAR

Badania z wykorzystaniem metody InSAR zostały przeprowadzone dla całego obszaru GZW (Perski 1999). Stworzonych zostało 10 interferogramów obejmujących 35- i 70-dniowe przedziały czasowe z lat 1992, 1993 oraz 1995. Na rysunku 2A zaznaczone zostały tereny, dla których przyrost osiadań jest większy niż 1cm dla okresu 4.10–8.11.1992. Tereny te pokrywają się z obszarem prowadzonej wówczas eksploatacji górniczej. Należy zauważyć, że na terenach tych brakuje punktów PS.

2.5. Pomiary naziemne

Obniżenia terenu w wybranych rejonach kopalni Kazimierz-Juliusz mierzone są z wykorzystaniem geodezyjnych metod niwelacji. Punkty pomiarowe znajdują się m.in. w centralnej części obszaru górniczego, w dzielnicy Stare Zawodzie oraz wokół zbiornika wodnego Balaton (rys. 3A). W pierwszym przypadku pomiary dla ponad 20 reperów wykonywane były średnio co 3–4 miesiące. W przypadku 21 punktów pomiarowych znajdujących się w pobliżu zbiornika Balaton pomiary wykonywano w interwałach 6-miesięcznych. Średnie szybkości obniżenia terenu dla dzielnicy Stare Zawodzie w latach od 1995 do 2000 to około 124 mm/rok, natomiast dla zbiornika Balaton średnia szybkość osiadań wynosi

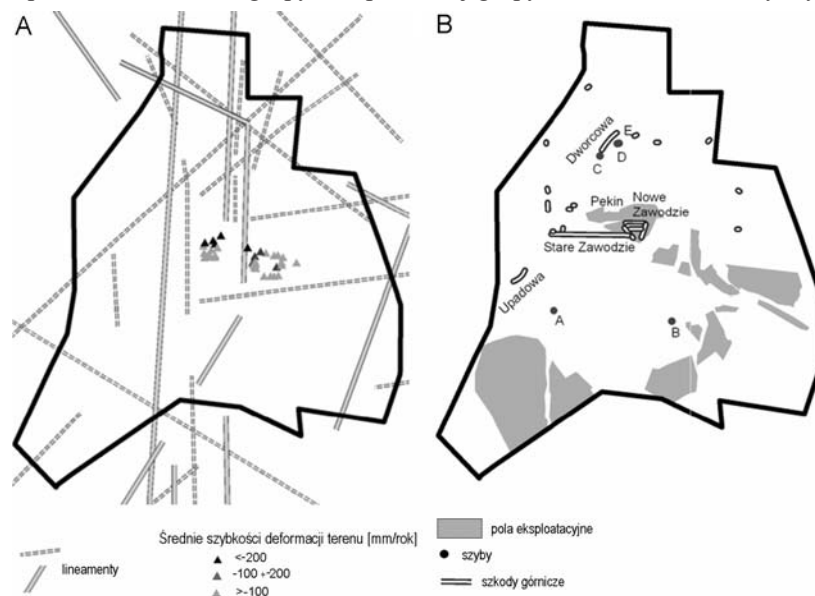
80 mm/rok (dla okresu 1994 do 2002). Dla punktów pomiarowych położonych bliżej pól eksploatacyjnych zanotowano większe wartości pionowych przemieszczeń.

2.6. Sejsmiczność indukowana

Sejsmiczność indukowana, oprócz deformacji terenu, jest jednym z istotniejszych, negatywnych skutków działalności górniczej. Zainicjowane działalnością górniczą zjawiska sejsmiczne stanowią zagrożenie m.in. dla infrastruktury i zabudowy na powierzchni. W celu zwiększenia bezpieczeństwa na obszarach górniczych konieczna jest systematyczna obserwacja sejsmiczna. Na obszarze górniczym kopalni „Kazimierz Juliusz” od maja 1994 do stycznia 2003 zarejestrowano 6500 wstrząsów, z czego 59% to wstrząsy o energii rzędu 10^2 [J], 36% to wstrząsy o energii rzędu 10^3 [J], natomiast 5% to wstrząsy o energii 10^4 [J]. Dane dotyczą partii M-3. Na rysunku (rys. 2B) przedstawione zostały obszary, dla których odnotowano wstrząsy o energii większej niż 10^3 [J], w latach 1995–1999.

2.7. Lineamenty

Lineamenty obecne na obrazach satelitarnych terenu górniczego KWK „Kazimierz-Juliusz” podzielono na dwie grupy. Do pierwszej grupy zaliczono lineamenty wydzielone



Rys. 3. Obszar górniczy kopalni „Kazimierz-Juliusz”

A – rozmieszczenie lineamentów oraz naziemnych punktów pomiarowych; B – rozmieszczenie pól eksploatacyjnych, szybów oraz lokalizacja terenów, dla których udokumentowano szkody górnicze

Fig. 3. Mining area of „Kazimierz-Juliusz” mine

A – lineaments and points of surface measurements location; B – exploitation fields and shafts location with places where mining damages were revealed

na podstawie zdjęć satelitarnych Landsat MMS (Doktór i in. 1995), TM i ETM+ (Buła i in. 2003) (na rys. 3A są one zaznaczone liniami ciągłymi). Mają one głównie przebieg południkowy lub prawie południkowy z wyjątkiem równoleżnikowego lineamentu w północnej części obszaru górniczego. Lineamenty mogą odpowiadać elementom liniowym występującym na mapach geologicznych tj. głównie zmianom litologicznym, strefom tektonicznym oraz obszarom o silnych spękaniach ciosowych (np. w rejonach osiowych wygięć synklin lub antyklin). Do drugiej grupy włączono lineamenty zidentyfikowane na podstawie zdjęć radarowych wykonanych satelitą ERS-2 w roku 2003 podczas przelotów satelity nad badanym obszarem w styczniu, marcu i maju (Pilecka 2006). Wszystkie lineamenty wydzielone na tych zdjęciach zaznaczono na rysunku 3A liniami przerywanymi. Warto podkreślić, że lineamenty wydzielone na podstawie zdjęć radarowych cechują się znaczną zmiennością w czasie. Lineamenty radarowe wydzielone na podstawie zdjęcia styczniowego mają głównie południkową orientację. Z kolei lineamenty wydzielone na podstawie zdjęć z marca i maja mają bardziej charakter zbliżony do równoleżnikowego. W przeciwieństwie do lineamentów wydzielonych na podstawie zdjęć z Landsata, na obszarze górniczym KWK „Kazimierz-Juliusz” trudno dopatrzyć się związków lineamentów radarowych z występującymi tu jednostkami strukturalno-tektonicznymi.

2.8. Udokumentowane szkody górnicze

W analizowanym okresie 1993–2003 osoby prywatne i instytucje wystąpiły z blisko sześciuset wnioskami o odszkodowania do kopalni. Dotyczyły one zniszczeń, co do których domniemywano, iż w sposób bezpośredni lub pośredni spowodowane były prowadzonymi robotami górniczymi. W około dwustu pięćdziesięciu przypadkach kopalnia uznała roszczenia za zasadne (następowała ugoda pomiędzy stronami) lub (w nielicznych przypadkach) roszczenia były kierowane na drogę sądową. Można stąd wnioskować, że znaczny odsetek spraw roszczeniowych skierowanych pod adresem kopalni został przez nią uznany za zasadny.

Większość zgłoszeń pochodzących od osób prywatnych dotyczyła szkód zaistniałych w budynkach mieszkalnych i gospodarczych. Wymienić tu można zarysowania i spękania ścian, fundamentów, przechyły lub zapadnięcia się części budynku, uszkodzenia sieci wodociągowej, uszkodzenia ogrodzenia, a w sporadycznych przypadkach występowanie zapadlisk na prywatnych parcelach. Zgłaszano również przypadki podtopień piwnic i fundamentów na skutek osiadania wybranych rejonów obszaru górniczego (Nowe Zawodzie).

Liczne szkody były zgłaszane przez dostawcę energii elektrycznej (Polskie Sieci Energetyczne Południe Sp. z o.o.), Górnośląskie Przedsiębiorstwo Wodociągów oraz PKP. Dotyczyły one deformacji linii przesyłowych, uszkodzenia wodociągów oraz deformację lub zakleszczenia torowisk.

Rozpatrywano wyłącznie wnioski pochodzące z tych części terenu górniczego kopalni, który był związany z prowadzoną w danym momencie lub w niedalekiej przeszłości eksplo-

tacją (nie był „uspokojony górniczo”). Największa ilość zasadnych wniosków o odszkodowania napływała od osób zamieszkujących osiedla Nowe Zawodzie (rejon ulic Kosmonautów, Skowronków, Cisowej i Świerkowej) oraz Stare Zawodzie (ulice Jałowcowa, Sławkowska, Pekińska). Ponadto były zgłaszane liczne wnioski z rejonu ulic Upadowej i Dworcowej, Wiejskiej. Wszystkie wymienione powyżej ulice znajdują się w centralnej części rejonu górniczego KWK „Kazimierz-Juliusz”. Pozostałe zgłoszenia pochodziły z części północnej i wschodniej obszaru górniczego. Obszary udokumentowanych szkód górniczych zostały przedstawione na rysunku 3B na tle obszaru górniczego kopalni.

Część wniosków o odszkodowanie została oddalona z uwagi na argument kopalni, iż szkoda zaistniała w miejscu „uspokojonym górniczo”. W części tych przypadków może być spowodowane regionalnymi osiadaniami rejestrowanymi i dokumentowanymi metodami PSInSAR i InSAR.

3. Interpretacja danych

Dane, które zostały poddane kompleksowej interpretacji mają charakter punktowy (wartość przemieszczeń w punktach PS metody PSInSAR, lokalizacja i energia indukowanych wstrząsów górniczych, wartości przemieszczeń w punktach cyklicznych pomiarów geodezyjnych, występowanie szkód górniczych), liniowy (przebiegi uskoków, położenie i orientacja lineamentów) oraz powierzchniowy (obszary osiadań wyznaczone metodą InSAR oraz położenie wyeksploatowanych i eksploatowanych pokładów węgla).

Od strony metodycznej najłatwiej przeprowadzić kompleksową interpretację danych tego samego typu np. danych o charakterze liniowym lub powierzchniowym. Trudna może być łączna interpretacja danych różnego typu np. danych punktowych i liniowych. W przedstawionej poniżej analizie korzystać będziemy z prostej metody korelacyjnej, prowadzonej głównie pod kątem oceny jakościowej, a nie ilościowej.

Analiza korelacyjna przeprowadzona osobno dla każdego typu danych dała następujące wyniki:

- Dane punktowe: Na obszarach gdzie były wykonywane pomiary geodezyjne odnotowywane były liczne zgłoszenia szkód górniczych. Na tych terenach również były zlokalizowane epicentra najsilniejszych wstrząsów indukowanych działalnością górniczą. Szczególnie dobra korelacja występuje na terenie osiedli Stare i Nowe Zawodzie, gdzie wzrost wielkości osiadań określonych na podstawie pomiarów geodezyjnych następuje w kierunku największego zgrupowania epicentrow wstrząsów. Z tych dwóch osiedli pochodzi również największa liczba zgłoszeń szkód górniczych. Na obszarach tych występuje mała liczba zidentyfikowanych punktów PS za wyjątkiem zachodniej części ulicy Sławkowskiej na osiedlu Stare Zawodzie, gdzie odnotowano osiadaniami rzędu 2–3 mm/rok oraz rejonu ulicy Upadowej, gdzie osiadaniami określone na podstawie pomiarów PSInSAR wynosiły około 4 mm/rok. Na tym terenie odnotowano również szereg zgłoszeń szkód.

- Dane liniowe: Lokalizacja i orientacja lineamentów określonych na podstawie zdjęć Landsat koreluje się z siecią głównych uskoku tektonicznych o przebiegu południkowym. Nie stwierdzono znaczącej korelacji sieci uskoku z lineamentami określonymi na podstawie pomiarów radarowych.
- Dane powierzchniowe: Korelacja danych powierzchniowych wskazuje na pokrywanie się obszarów eksploatacji z silnymi osiadaniami udokumentowanymi metodą interferometrii satelitarnej InSAR. Jest to szczególnie dobrze widoczne dla niecki osiadań w rejonie osiedla Pekin oraz w południowo-zachodniej części obszaru górniczego (w dolinie rzeki Przemsza Biała).

Analizę korelacyjną dla danych różnego typu można podsumować następująco:

- Występuje bardzo silna korelacja pomiędzy sejsmicznością indukowaną a rejonami wydobywania i uszkodzeniami górnictwa. Szczególnie dobrze jest ona widoczna w części centralnej terenu górniczego. Równie silna korelacja występuje pomiędzy lokalizacją sejsmiczności a gwałtownymi osiadaniami (zlokalizowanymi metodą InSAR) na terenach, gdzie prowadzone jest wydobywanie.
- Osiadania pomierzone geodezyjnie w rejonie ośrodka Balaton i osiedli Stare i Nowe Zawodzie wzrastają w miarę zbliżania się do nieck osiadań mierzonych metodą InSAR – otrzymane oboma metodami wielkości osiadań są w dużym stopniu skorelowane.
- Strefy wokół uskoku, dla których udało się wykryć stabilne punkty odbijające (PS) z reguły wykazują średnie i wysokie tempo osiadania, co może świadczyć o występowaniu regionalnych przemieszczeń pionowych poszczególnych jednostek tektonicznych lub ich części. Jest to potwierdzenie tezy postawionej już wcześniej przez Wyrzykowskiego (w: Niwelacja... 1993)
- Obszary, na których występują punkty PS, zgodnie z oczekiwaniami, nie pokrywają się z miejscami gdzie wykryto gwałtowne osiadania metodą InSAR. Korelacja rezultatów pomiarów jest w tym wypadku niemożliwa.

Wnioski

Pomiary osiadania powierzchni terenu wykonywane dla potrzeb dokumentowania szkód górniczych mogą być realizowane metodą geodezyjną lub (jak wykazano) metodą interferometrii radarowej. Osiadania tego typu należy wiązać z działalnością górnictwa. Z kolei osiadania pomierzone metodą PSInSAR, których wielkości są znacznie mniejsze należy przypisywać ruchom poszczególnych bloków lub jednostek tektonicznych. Ponieważ możliwe jest wykrycie metodą PSInSAR osiadań na terenach, gdzie nie była prowadzona eksploatacja górnictwa doniesienia o uszkodzeniach z tych rejonów mogą mieć naturalną przyczynę niezależną od działalności człowieka.

Pomiary satelitarne (w obu wariantach InSAR i PSInSAR) stanowią istotne uzupełnienie pomiarów naziemnych (szczególnie pomiarów geodezyjnych) dla potrzeb dokumentacji

i weryfikacji szkód górniczych z uwagi na możliwość wykonywania ciągłego monitoringu wybranego terenu oraz niższy koszt badań w stosunku do metod tradycyjnych.

Autorzy wyrażają wdzięczność Dyrekcji i pracownikom Kopalni „Kazimierz-Juliusz” za udostępnienie danych oraz życzliwą pomoc.

Praca została sfinansowana w ramach prac własnych Katedry Geoinformatyki Informatyki Stosowanej, Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH.

LITERATURA

- Buła Z., Piątkowska A., Habryn R., Kowalski Z., Doktor S., 2003 – Model budowy strukturalnej Górnego Śląska i zachodniej Małopolski w świetle kompleksowej analizy danych teledetekcyjnych i geologiczno-geofizycznych. Dok. Arch. PIG CAG nr 1010/2004, Warszawa.
- Doktor S., Graniczny M., Kucharski R., 1995 – Mapa liniowych elementów strukturalnych na podstawie analizy teledetekcyjno-geofizycznej. Arch. Ośr. Prz. Inf. PIG, Warszawa (praca niepublikowana).
- Niwelacja precyzyjna (niwelacja geometryczna, trygonometryczna, satelitarna i hydroniwelacja). Praca zbiorowa. PPWK. Warszawa 1993.
- Leśniak A., Porzycka S., Graniczny M., 2007 – Subsidence analysis in mining area of Dabrowskie Coal Basin using PSInSAR technique. 13th European meeting of environmental and engineering geophysics: 3–5 September 2007, Istanbul, Turkey, s. 1–5.
- Perski Z., 1999 – Osiedlenia terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). Przegląd Geologiczny, 2, s. 171–174.
- Perski Z., Ketelaar G., Mróz M., 2006 – Interpretacja danych ENVISAT/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście stabilnych rozpraszaczy (persistent scatterers). Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 16, s. 467–482.
- Pilecka E., red. 2006 – Związek lineamentów z sejsmicznością indukowaną na terenach górniczych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Porzycka S., Leśniak A., 2007 – Przetwarzanie obrazów radarowych techniką PSInSAR – opis metody. „Geoinformatyka – badania, zastosowania i kształcenie”: IV ogólnopolskie sympozjum geoinformacyjne: Dobrezyce k. Krakowa, 11–13 października 2007 r., s. 121–122.

KOMPLEKSOWA INTERPRETACJA POMIARÓW SATELITARNYCH I NAZIEMNYCH W OCENIE ZAGROZEŃ NA TERENACH GÓRNICZYCH I POGÓRNICZYCH

Słowa kluczowe

Interferometria radarowa, InSAR, PSInSAR, sejsmiczność indukowana, obniżenia terenu, ocena zagrożeń

Streszczenie

Kopalnia „Kazimierz-Juliusz” położona jest w północno-wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Dąbrowskiego (południowa Polska). Powierzchnia kopalni wynosi około 24 km². Wydobycie węgla kamiennego prowadzone jest w jej obrębie już od początku XIX wieku. Długa i intensywna eksploatacja ma znaczący wpływ na stabilność powierzchni terenu i środowisko naturalne. Pod koniec lat dziewięćdziesiątych XX wieku do badania osiadań w rejonie GZW zastosowano satelitarną interferometrię radarową (InSAR). Pozwala ona monitorować pionowe przemieszczenia terenu spowodowane aktywnością górniczą.

W przeciągu ostatnich kilkudziesięciu lat wiele kopalń GZW zostało zlikwidowanych. Pomimo zaprzestania eksploatacji terenom górniczym tego rejonu towarzyszy po dzień dzisiejszy zjawisko subsydencji o różnym tempie i nasileniu. Najbardziej szkodliwe dla infrastruktury powierzchniowe są silne i nagłe obniżenia terenu. Mogą one być pomierzone z wykorzystaniem metody InSAR. Regionalne, powolne, pionowe przemieszczenia terenu, w rejonie GZW, zostały udokumentowane z wykorzystaniem techniki PSInSAR.

Analiza danych PSInSAR w celu rozpoznania genezy deformacji terenu stanowi cel tej pracy. Omawiany temat jest bardzo ważny w ochronie powierzchni i zwiększeniu bezpieczeństwa na terenie górniczym kopalni „Kazimierz-Juliusz”.

W pracy wykorzystanych zostało kilka zbiorów danych. Pierwszą grupę stanowią dane teledetekcyjne: dane interferometrii radarowej (InSAR) oraz dane PSInSAR. Technika InSAR wykorzystuje dwa obrazy radarowe w celu wyznaczenia deformacji terenu z milimetrową dokładnością. Metoda PSInSAR została opracowana w celu zwiększenia możliwości detekcji powolnych przemieszczeń pojedynczych obiektów terenu (punktów PS). Metoda ta wykorzystuje wszystkie dostępne zobrazowania typu SAR.

Scena PSInSAR złożona jest z szeregu punktów, z których każdy obrazuje stabilny w czasie reflektor dla fal radarowych (punkty PS). Wykorzystując metodę PSInSAR możemy zarejestrować deformacje terenu o przyrostach rzędu nawet 0.5 mm/rok. Technika ta daje możliwość rejestracji osiadania pojedynczych obiektów, będących dobrymi reflektorami, takich jak dachy budynków, rurociągi, czy mosty. Przemieszczenia tego typu nie były możliwe do wykrycia z wykorzystaniem klasycznej metody InSAR.

Inne dane teledetekcyjne to pozyskane przez satelitę Landsat, wielospektralne obrazy Ziemi. Mogą one być wykorzystane do tworzenia map lineamentów, czyli map przedstawiających charakterystyczne linie odzwierciedlające obiekty takie jak np. uskoki.

Drugą grupę stanowią dane naziemne. Najważniejsze z nich to dane o epicentrach silnych wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą. Inne to wyniki pomiarów geodezyjnych wykonanych, co około trzy miesiące, dla ponad dwudziestu zastabilizowanych punktów. W prezentowanej analizie wykorzystane zostały dane archiwalne dotyczące zgłoszonych szkód górniczych oraz mapy górnicze i geologiczne.

Stwierdzona została wyraźna zależność między położeniem pól eksploatacyjnych a lokalizacją wstrząsów sejsmicznych. Osiadania terenu (większe niż 1cm na rok) udokumentowane dzięki metodzie InSAR są ściśle skorelowane z miejscami prowadzonej eksploatacji górniczej. Zależność między powolnymi deformacjami terenu, wyznaczonymi z wykorzystaniem techniki PSInSAR, a aktywnością górniczą nie zaznacza się w obrębie kopalni „Kazimierz-Juliusz”. Na analizowanym terenie występują miejsca o większej i mniejszej szybkości przemieszczeń punktów PS, a także miejsca niemal stabilne. Powolne, pionowe przemieszczenia terenu, które występują na badanym terenie, przynajmniej od 9 lat wydają się być niezależne od prowadzonej eksploatacji węgla.

Szczegółowa analiza nie wykazała zależności pomiędzy lineamentami a wartościami osiadań, sejsmicznością indukowaną, lokalizacją uskoków czy polami eksploatacyjnymi.

COMPREHENSIVE INTERPRETATION OF SATELLITE AND SURFACE MEASUREMENTS FOR HAZARD ASSESSMENT ON MINING AND POST MINING AREAS

Key words

Radar interferometry, PSInSAR, InSAR, induced seismicity, ground subsidence, hazard assessment

Abstract

The “Kazimierz-Juliusz” coal mine is located in north-eastern part of the Upper Silesia Coal Basin, South Poland. It covers an area of about 24 km². The coal exploration has been carried there since the beginning of XIX century. Long and intensive underground exploitation had great impact on surface stability and environment. Regular land surveying performed on that area was complemented in early 1990s by satellite radar interferometry. This method allows continuous monitoring of the strong surface vertical movements induced by mine activity in that area to be made.

As a result of intensive coal exploration, a lot of mining panels of the mine were closed down during a few last decades of XX-th century. In spite of terminating the excavations, the mining area still suffers from subsidence of different strength and intensity. The most harmful for local infrastructure is strong and abrupt subsidence that is measured by surface surveying on small areas or by radar interferometry (InSAR). The regional, sustained vertical displacements of small amplitude has been also documented by Permanent Scatterer InSAR technique (PSInSAR) in this area.

The detailed recognition and analysis of origins of those displacements is a subject of the presented paper. The discussed problem is important for future disaster prevention and surface protection in mining areas of the "Kazimerz-Juliusz" coal mine.

Several sets of data has been used in the analysis. First group includes remote sensing data, such as classical InSAR technique and its new modification: PSInSAR method. The first method uses two radar images to produce a spatially complete map of ground deformation with centimeter-scale accuracy. The second technique has been developed to improve the ability to determine small-scale displacements of individual features (scatterers) on the ground using all data collected over the target area by a SAR satellite. PSInSAR pattern consists of a significant number of independent radar-bright and radar-phase stable points (i.e., permanent scatterers PS, persistent over many satellite revolutions), which exist within a radar scene. Using the PSInSAR method, we can resolve surface motions at a level of 0.5 mm/year and as well as small-scale features, including motions of individual targets such as roofs, pipelines and bridges, not previously recognized in traditional InSAR interferometry. Other data gathered by satellite are multispectral Landsat images of that area. Using those images the lineaments that reflect linear topographic features, such as a fault lines has been evaluated.

The second group is surface data. The most important are epicenters of strong tremors induced by mining activity. Other are the results of surveying in more than twenty stabilized points where measurements were repeated every three months. In the presented analysis we also used the archive data on mining damages in private properties and detailed mining maps and geological maps.

We found a strong correlation between the location of mining exploitation and seismic activity as well as between strong subsidence areas (more than 1cm per month) detected by InSAR technique and the location of mining panels where intensive exploitation was conducted. The relation between slow vertical displacements detected by PSInSAR method and mining activity was not revealed in the study area. There are places of intensive subsidence while other are almost stable. The slow persistent vertical movements that lasted for more than 10 years seem to be independent of the current coal exploitation.

To detailed analysis shows lack of coincidence of lineaments with the subsidence, mining seismicity faults locations and past/present mining activity.