

Zastosowanie Satelitarnej Interferometrii Radarowej InSAR w modelowaniu przemieszczeń powierzchni terenu indukowanych drenażem warstw skalnych

Application of Satellite Radar Interferometry InSAR in the Modeling of Land Surface Movement Induced by Rock Mass Drainage



Mgr inż. Artur Guzy^{)}*



Dr hab. inż. Agnieszka A. Malinowska^{)}*



Mgr inż. Wojciech T. Witkowski^{)}*



Prof. dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski^{)}*

Treść: Obniżenia powierzchni terenu są jednym z najbardziej istotnych efektów środowiskowych pompowania wody ze zbiorników podziemnych. Powstają one na skutek kompaktacji ściśliwych warstw wodonośnych. W skali globalnej główną przyczyną tego zjawiska jest rosnące zapotrzebowanie na czystą wodę. Przemieszczenia powierzchni terenu powstałe na skutek odwodnienia górotworu mogą przyjmować sumaryczne wartości nawet do kilkunastu metrów. Zasięg tego zjawiska jest zazwyczaj rozległy i trudny do jednoznacznego zdefiniowania. Kompaktacja warstw wodonośnych spowodowana odwodnieniem górotworu przyczynia się do powstania szeregu niekorzystnych zjawisk o wymiarze społeczno-ekonomicznym i znacznych kosztach naprawczych. Obecnie wyróżnić można wiele metod, które wykorzystywane są w celu analizy i symulacji kompaktacji warstw wodonośnych. Rozwiązania te pozwalają na uzyskanie zadowalających wyników modelowania. Są jednak one często mało efektywne i czasochłonne. Z tego względu wskazuje się na konieczność prowadzenia dalszych badań, które umożliwią bardziej skuteczne modelowanie kompaktacji warstw wodonośnych. W ostatnich kilkunastu latach obserwowany jest gwałtowny rozwój InSAR. Przyczynił się on do znaczącego postępu w zakresie monitoringu i określania rozkładu czasowo-przestrzennego odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu w wielu regionach świata. Stąd, implementacja wyników pomiarów opartych o tę technologię może stanowić znaczny potencjał dla budowy bardziej efektywnych modeli kompaktacji warstw wodonośnych. Celem niniejszego artykułu jest podsumowanie implementacji InSAR w ciągu ostatnich kilku lat dla wsparcia procesu modelowania kompaktacji warstw wodonośnych na skutek drenażu górniczego.

Abstract: Land subsidence is one of groundwater pumping probably the most evident environmental effects. This phenomenon is induced by the dewatering of susceptible aquifer systems. Globally, freshwater demand is the leading cause of this phenomenon. Land subsidence induced by aquifer system drainage can reach total values up several meters. The spatial extension of the phenomenon is usually extensive and often difficult to define clearly. Aquifer compaction contributes to many socio-econo-

^{*)} Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

-mic effects and high infrastructure-related damage costs. Currently, many methods are used to analyze aquifer compaction. Such solutions enable satisfactory modelling results. However, further research is needed to allow more efficient modelling of aquifer compaction. Recently, InSAR has contributed to significant progress in monitoring and determining the spatio-temporal land subsidence distributions worldwide. Therefore, implementation of this approach can pave the way to develop more efficient aquifer compaction models. This paper presents a summary of InSAR implementation over recent years to support the aquifer compaction modelling process.

Słowa kluczowe:

przemieszczenia powierzchni terenu, pompowanie wody ze zbiorników podziemnych, kompaktacja warstw wodonośnych, InSAR

Keywords:

land surface movement, groundwater pumping, aquifer compaction, InSAR

1. Wprowadzenie

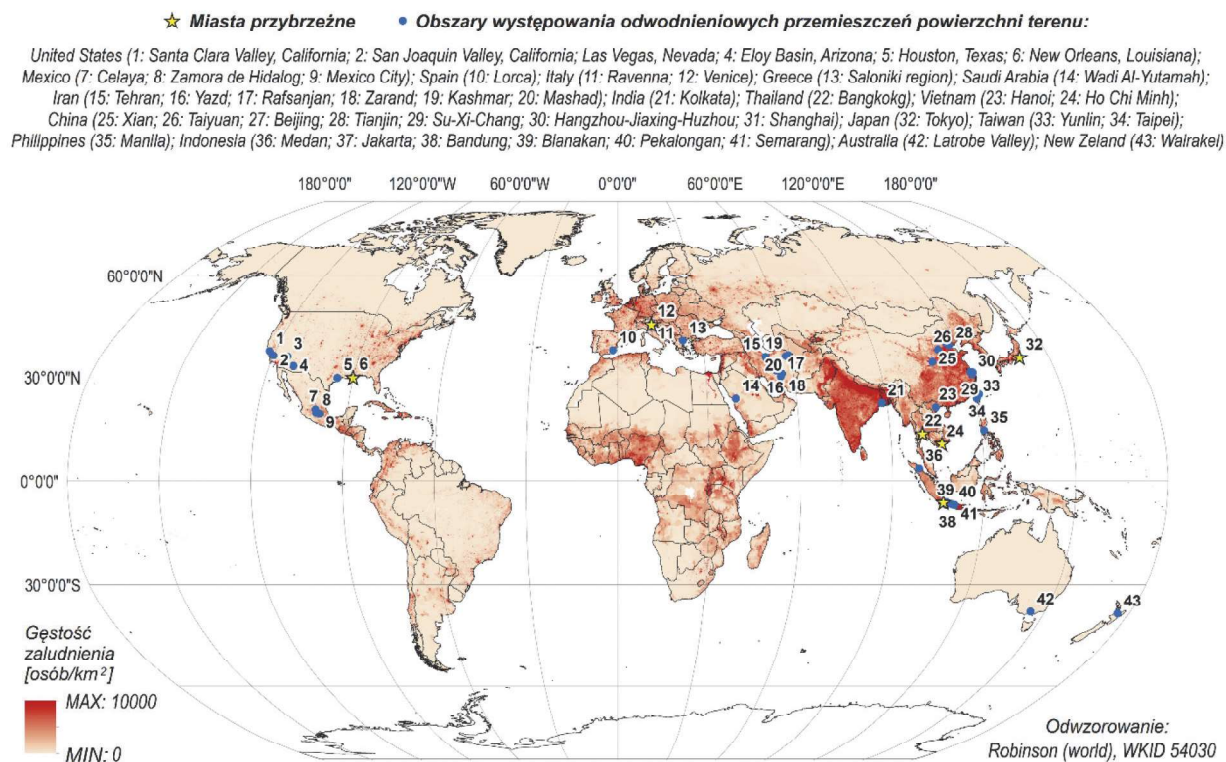
Obniżenia powierzchni terenu są jednym z najbardziej istotnych efektów środowiskowych pompowania wody ze zbiorników podziemnych (Gambolati i in. 1991, Ortega-Guerrero i in. 1999 Teatini i in. 2006, Ehlen i in. 2007, Shi i in. 2007; Allis i in. 2009; Mahmoudpour i in. 2013). Problematyka prawidłowej oceny powstania, mechanizmu przebiegu oraz skutków tego procesu ma charakter powszechny. W skali globalnej główną przyczyną tego zjawiska jest stale rosnące zapotrzebowanie na czystą wodę. Wynika ono z gwałtownego wzrostu liczby ludności, który obserwowany jest od lat 50. XX w. (Famiglietti i in. 2011, Erkens i in. 2015). Pozyскиwanie czystej wody dla celów przemysłowych odbywa się najczęściej poprzez bezpośrednie wydobycie tego surowca ze struktur górotworu, które nie uległy skażeniu czynnikami zewnętrznymi. Prowadzi ono do kompaktacji ściśliwych warstw wodonośnych, zazwyczaj nieskonsolidowanych bądź luźnych osadów przypowierzchniowych. Kompaktacji mogą jednak ulegać także głębsze warstwy górotworu (Whittaker, Reddish 1989, Gambolati, Teatini 2015).

Niekontrolowana kompaktacja systemu wodonośnego spowodowana jego odwodnieniem obserwowana jest w wielu ośrodkach miejskich położonych na całym świecie (rys. 1). W szczególności, problem ten jest jednak istotny w wielkich miastach przybrzeżnych, które położone są głównie w Azji południowo-wschodniej. Miasta przybrzeżne zlokalizowane są najczęściej na luźnych aluwkach rzecznych. Stopień kompaktacji tego typu materiału skalnego jest znaczny. Mając na uwadze stale wzrastający średni poziom oceanu światowego, obszary przybrzeżne, na których dodatkowo występuje zjawisko kompaktacji odwodnieniowej systemu wodonośnego, są w szczególności narażone na wzrost zagrożenia powodziowego (Weissenberger, Chouinard 2015, Allison i in. 2016). Problem niekontrolowanej kompaktacji systemu wodonośnego jest jednak także aktualny w tak dużych ośrodkach jak Los Angeles (Hu i in. 2019), Meksyk (Castellazzi i in. 2016), Nowy Orlean (Jones i in. 2016), Ho Hi Minh (Thoang, Giao 2015), Teheran (Pirouzi, Eslami 2017), Bangkok (Aobpaet i in. 2013) i Pekin (Guo i in. 2019). Zwiększone zapotrzebowanie na zasoby czystej wody podziemnej z uwagi na wzrost zaludnienia oraz gęstości pól uprawnych jest szczególnym wyzwaniem również w rejonach pustynnych i półpustynnych (Jafari i in. 2016). W warunkach polskich odwodnienie warstw skalnych jest najczęściej pośrednim skutkiem prowadzenia eksploatacji górniczej – zarówno głębinowej, jak i odkrywkowej (Hejmanowski i in. 2013, Hejmanowski, Witkowski 2015, Kopeć, Kwinta 2019, Szczepiński 2019, Kowalski 2020).

Wartości odwodnieniowych obniżen powierzchni terenu mogą osiągać nawet do kilkunastu metrów (Gambolati,

Teatini 2015). Kompaktacja warstw wodonośnych przyczynia się do powstania szeregu niekorzystnych zjawisk o wymiarze społeczno-ekonomicznym (Tomas i in. 2011). Do najpoważniejszych z nich zaliczyć należy: zniszczenia infrastruktury powierzchniowej i podziemnej, a w miastach przybrzeżnych także intruzję słonych wód w głąb lądu i wzrost zagrożenia powodziowego (Herrera i in. 2010, Yang i in. 2015, Béjar-Pizarro i in. 2017).

Wyróżnić można wiele metod, które wykorzystywane są w celu analizy i symulacji kompaktacji warstw wodonośnych. Obejmują one przede wszystkim podstawowe relacje pomiędzy wysokością hydrauliczną i kierunkiem przepływu wód podziemnych oraz ciśnieniem i kompresyjnością warstw skalnych. Postęp w dziedzinie modelowania kompaktacji związany był przede wszystkim z rozwojem technologii komputerowych oraz intensywnymi pracami nad algorytmami numerycznymi. Były one prowadzone od lat 70. XX w. Rezultaty tych prac umożliwiły rozwiązywanie skomplikowanych zależności matematycznych, które opisują proces odwodnieniowej kompaktacji warstw skalnych (Gambolati, Teatini 2015). Z tego względu, opracowane dotychczas i stosowane na szeroką skalę rozwiązania numeryczne pozwalają na uzyskanie zadowalających jakościowo i ilościowo wyników modelowania. Niemniej jednak, z uwagi na znaczną parametryzację stosowanych dzisiaj powszechnie modeli teoretycznych, prace te są nadal często czasochłonne i skomplikowane. Dlatego też wskazuje się na konieczność prowadzenia dalszych badań, które umożliwią bardziej efektywne modelowanie odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu (Galloway, Burbey 2011). Jednym z kluczowych obszarów w tym zakresie jest implementacja satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). Gwałtowny rozwój tej technologii pomiarowej w ciągu ostatnich kilkunastu lat przyczynił się do znaczącego postępu w zakresie monitoringu odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu w skali światowej (Amitrano i in. 2014; Gambolati, Teatini 2015). Wykorzystanie numerycznych modeli przepływu wód podziemnych sprzężonych z danymi InSAR umożliwia znacznie szersze podejście do oceny zagrożeń wodnych (Ezquerro i in. 2014, 2017, Bozzano i in. 2015). Obie techniki są dzisiaj powszechnie wykorzystywane w celu pełniejszego zrozumienia zjawiska kompaktacji systemu wodonośnego związanej z eksploatacją zasobów wód podziemnych. Implementacja InSAR w trakcie tworzenia modeli predykcji umożliwia bardziej efektywne określenie m.in. (1) granic strukturalnych systemów wodonośnych; (2) rozkładu czasowo-przestrzennego przemieszczeń powierzchni terenu i niejednorodności hydrogeologicznej systemu wodonośnego oraz (3) wartości współczynników pojemności wodnej i przewodności hydraulicznej warstw skalnych. W szczególności, badania te sprowadzają się do wykorzystania



Rys. 1. Główne obszary na świecie, gdzie występują antropogeniczne, odwodnieniowe przemieszczenia powierzchni terenu: niebieskie kropki (Gambolati, Teatini, 2015; Maps ... 2020), żółte gwiazdki wskazują obszary przybrzeżne, które są szczególnie podatne na zwiększone zagrożenie powodziowe. Warto zauważyć, że są one zlokalizowane przede wszystkim w gęsto zaludnionych obszarach Azji południowo-wschodniej (Erkens, in. 2015; University ... 2018).

Fig. 1. Main areas of the world where anthropogenic subsidence was induced by over-exploitation of groundwater: blue dots; (Gambolati i Teatini, 2015; Maps ... 2020), yellow stars indicate coastal areas that are prone to the increased risk of flooding. Note, these are mainly located in densely populated areas of South-East Asia (Erkens i in. 2015; University ... 2018).

technik zaawansowanej satelitarnej różnicowej interferometrii radarowej (A-DInSAR). Techniki A-DInSAR oparte są na procesowaniu wielu interferogramów otrzymanych ze znacznego zbioru danych (Boni i in. 2016a, 2017). Metody te umożliwiają otrzymanie szeregów czasowych przemieszczeń powierzchni terenu nad znacznymi obszarami z milimetrową dokładnością (Hooper, 2008, Ferretti i in. 2011, Hooper i in. 2012, Crosetto i in. 2016). Znaczne udoskonalenie technik A-DInSAR obserwowane w ciągu ostatnich kilku lat związane jest głównie z rozwojem zaawansowanych algorytmów obliczeniowych (Morishita i in. 2020). Wynika ono jednak także ze zwiększonych możliwości pozyskiwania zdjęć SAR przez nowe misje satelitarne. Na szczególną uwagę zasługuje misja Sentinel oraz polityka OpenSource udostępniania danych przez Europejską Agencję Kosmiczną (European ... 2020a,b).

Duży potencjał metod przetwarzania danych opartych o techniki A-DInSAR wynika z możliwości detekcji przemieszczeń powierzchni o skomplikowanych charakterystykach geomechanicznych. Zaliczyć do nich należy deformacje o przebiegu liniowym i/lub nieliniowym. Należą do nich m.in. deformacje fluktuujące czasowo, np. na skutek sezonowości pór roku bądź zmiennych w czasie objętości pompowanej wody. Dodatkowo, szeregi czasowe przemieszczeń powierzchni terenu pozyskane przy wykorzystaniu technik A-DInSAR pozwalają na określenie historycznych wartości przemieszczeń i ich czasowej ewolucji. Doświadczenia światowe potwierdziły, iż analiza znacznego zbioru danych SAR określających przebieg przemieszczeń powierzchni terenu

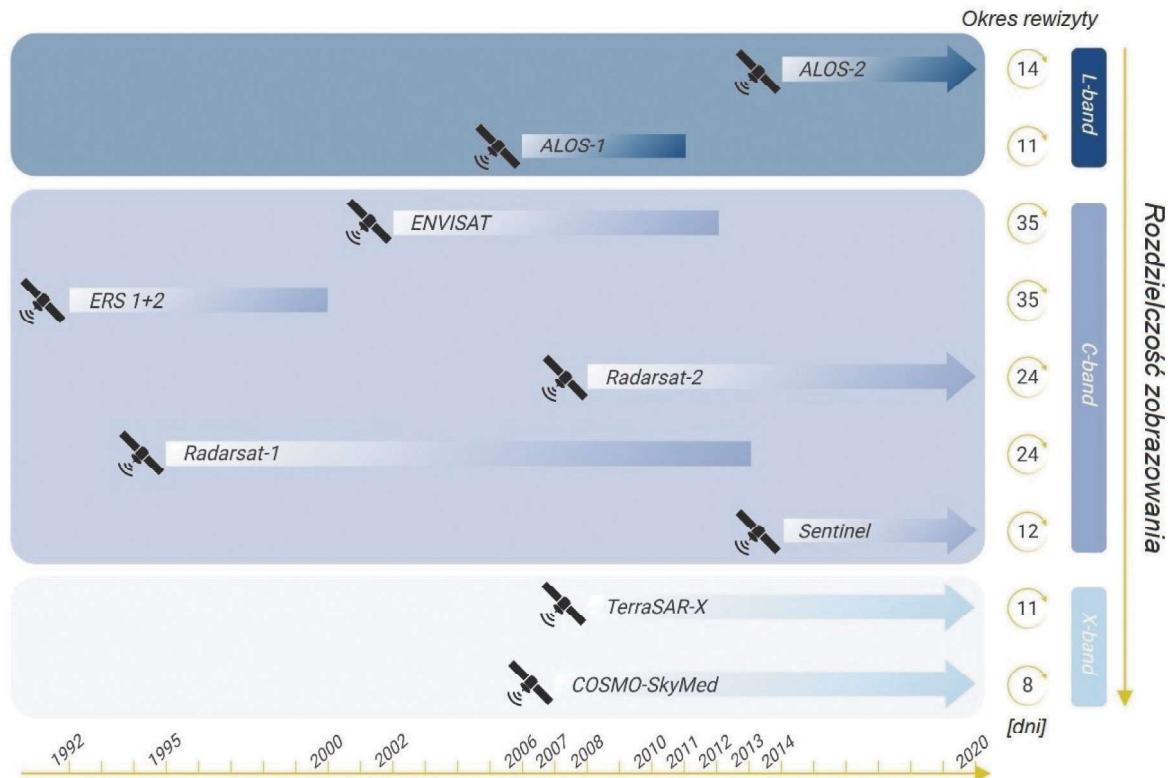
w czasie stanowi istotne wsparcie dla określania przebiegu deformacji warstw skalnych w przedziałach kompacji elastycznej i nieelastycznej. Takie informacje stanowią ważne źródło danych, które mogą zostać zaimplementowane w tradycyjnych modelach predykcji odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu w celu zwiększenia wiarygodności uzyskiwanych wyników modelowania. Badania tego typu nie były możliwe do przeprowadzenia przy wykorzystaniu tradycyjnych metod pomiarowych (Boni i in. 2015, 2016a, 2017).

Mając na uwadze powyższe, celem niniejszego artykułu jest podsumowanie implementacji danych InSAR w ciągu ostatnich kilku lat dla wsparcia procesu modelowania odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu.

2. InSAR jako narzędzie wspierające proces modelowania odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu

InSAR należy do jednych z najpowszechniej wykorzystywanych technologii pomiarowych przemieszczeń powierzchni terenu. Dane tego typu pozyskiwane były przez szereg satelitów począwszy od końca 1991 r. (rys. 2).

Aparatura InSAR umieszczona została na satelitach, które operowały kolejno m.in. w ramach misji: ERS (European ... 2014b), Radarsat (Canadian ... 2020), ENVISAT (European ... 2014a), COSMO-SkyMed (European ... 2015) i TerraSAR-X (European ... 2020b). Zobrazowania satelitarne,



Rys. 2. Misje InSAR na przestrzeni lat
Fig. 2. InSAR missions over years

które zostały pozyskane w ramach tych misji charakteryzowały się zmienną rozdzielnością czasową i przestrzenną. Wartości te wynosiły maksymalnie: 35 dni dla misji ERS i ENVISAT oraz do 30 m dla misji ENVISAT (European ... 2014a, 2014b). Niemniej, pomimo zadowalających wartości parametrów charakteryzujących rozdzielność czasową i przestrzenną, głównym nieudogodnieniem w aspekcie stosowania satelitarnych zobrazowań radarowych pochodzących z tych misji był znaczny koszt ich pozyskania. Polityka Open Source udostępniania danych z prowadzonej od 2014 r. przez Europejską Agencję Kosmiczną misji Sentinel-1 umożliwiła rozwiązanie tego problemu. Operujące wspólnie satelity Sentinel 1-A i 1-B wykonują zobrazowania radarowe w cyklu 6-dniowym, w rozdzielności przestrzennej 5x20 m (European ... 2020a). Dodatkowo, archiwalne dane InSAR z historycznych oraz obecnych misji satelitarnych są coraz częściej dostępne bezpłatnie (w szczególności dla podmiotów naukowych). Dane z misji ERS-1, ERS-2 oraz ENVISAR są ogólnodostępne poprzez złożenie wniosku o dostęp do danych do Europejskiej Agencji Kosmicznej. Dane te obejmują okres odpowiednio 1991-2000, 1995-2011 oraz 2002-2011. Dane z misji ALOS-1 obejmują natomiast okres od 2006 do 2011 r. i są dostępne poprzez złożenie wniosku o dostęp do Japońskiej Agencji Kosmicznej.

Przetwarzanie znacznych zbiorów danych InSAR jest obecnie coraz prostsze z uwagi na szybki rozwój zaawansowanych algorytmów obliczeniowych, a nawet częściową automatyzację pracy na serwerach zewnętrznych (Morishita i in. 2020). Takie działania umożliwiają użytkownikom oszczędność czasu oraz przestrzeni dyskowej, które potrzebne są do przeprowadzenia skomplikowanych obliczeń. Dla większości obszarów świata istnieje obecnie duże archiwum zobrazowań InSAR, które obejmuje okres prawie 30 lat. Mając na uwadze tak długi horyzont czasowy oraz znaczne możliwości przetwarzania danych InSAR, metoda ta przy-

czynia się do dużego postępu w zakresie określania rozkładu czasowo-przestrzennego przemieszczeń powierzchni terenu w skali światowej. Aplikacja InSAR obejmuje zarówno okres historyczny, jak i prowadzenie quasi-ciągłego monitoringu współcześnie (Morishita i in. 2020).

Postęp w dziedzinie InSAR, jak widać m.in. na przykładzie misji Sentinel, zapewnia:

- stale poprawiający się stosunek sygnału fazy fali radarowej do szumu, który umożliwia bardziej efektywne rozwijanie fazy fali radarowej w pełnej rozdzielności zobrazowania, a tym samym uzyskiwanie informacji o niewielkich wartościach przemieszczeń powierzchni terenu;
- wyższą częstotliwość wykonywania zobrazowań radarowych, która pozwala na detekcję z wysoką dokładnością przestrzenną i czasową sezonowych przemieszczeń powierzchni terenu;
- zwiększone pokrycie przestrzenne obserwacjami, które umożliwia wykorzystanie InSAR w wielkoskalowym, quasi-ciągłym monitoringu deformacji powierzchni terenu.

2.1. Podstawy teoretyczne InSAR

InSAR należy do aktywnych metod teledetekcyjnych. Zasada jego działania opiera się na wysyłaniu w kierunku poprzecznym do trajektorii lotu satelity wiązki fali elektromagnetycznej. Ma ona postać ciągu impulsów o jednakowym czasie trwania i częstotliwości powtarzania. Kolejno wysyłane impulsy odbijają się od badanej powierzchni i tworzą obraz równoległy do kierunku lotu satelity. Obraz ten przybiera kształt pasa o szerokości od kilkunastu do kilkudziesięciu km. Mierzona jest zmiana odległości pomiędzy celem na powierzchni terenu a anteną czujnika. Pomiar ten wykonywany jest jako echo odbierane z każdego emitowanego sygnału wiązki fali elektromagnetycznej (Zhou i in. 2009). Echa zwrotne odbierane przez czujnik zawierają dwie wielkości: fazę

i amplitudę. Obraz fazy jest fundamentalny dla oszacowania wartości przemieszczeń powierzchni terenu. Rejestruje on drogę sygnału od jego emisji do jego powrotu i jest mierzony jako funkcja 2π (Zhou i in. 2009). Amplituda reprezentuje zdolność rozpraszania wstecznego powierzchni terenu. Jest to informacja o tym, ile emitowanego sygnału może powrócić do anteny wykrywającej. Im wyższa wartość rozpraszania wstecznego, tym większa wartość amplitudy na obrazie SAR.

Pomiary oparte o InSAR mają charakter 1-D. Są one związane z projekcją wektora 3-D obserwowanego przemieszczenia powierzchni teren wzdłuż linii widzenia satelity (LOS). Obserwacje InSAR są najbardziej czułe na detekcję ruchu pionowego powierzchni terenu. Ta cecha wynika bezpośrednio z kąta wykonywania pomiaru, który jest mniejszy od 45° w stosunku do lokalnej linii pionu. Poprzez sprzężenie ruchu obrotowego Ziemi oraz ruchu satelity po orbicie ziemskiej możliwe jest jednak wykonywanie zobrazenia radarowego dowolnego obszaru na kuli ziemskiej wzdłuż dwóch różnych geometrii. Pierwsza z nich związana jest z satelitą lecącą z południa na północ (tryb wstępujący), a druga z satelitą operującą z północy na południe (tryb zstępujący). Z tego względu istnieje możliwość oszacowania składowych 3-D pola przemieszczeń powierzchni terenu. W tym celu wykorzystane mogą zostać m.in. podstawowe zależności geometryczne wynikające z fizyki obserwowanego pola przemieszczeń powierzchni terenu (Samieie-Esfahany i in. 2010), a także sprzężenie dwóch zestawów danych InSAR, które pozyskane zostały z odmiennych geometrii (Mehrabi i in. 2019).

Pierwsze zastosowanie InSAR datuje się na koniec lat 80. XX w. (Gabriel i in. 1989). Wykorzystana została wówczas różnicowa satelitarna interferometria radarowa (DInSAR). To podejście szybko się rozwinęło i stało się dobrze ugruntowaną techniką obserwacji przemieszczeń powierzchni Ziemi (Zhou i in. 2009). W aspekcie historycznym była ona wykorzystywana do detekcji i badań wyrażonych deformacji powierzchni terenu (Gabriel i in. 1989, Hongdong i in. 2011). Metoda DInSAR wykorzystuje różnicę faz między dwoma zarejestrowanymi radarogramami pozyskanymi nad tym samym obszarem w różnym czasie (Massonnet, Feigl 1998). Różnica faz obliczana jest w postaci interferogramu. W warunkach idealnych każdy interferogram powinien zawierać jedynie różnicę fazy, która związana jest z przemieszczeniem powierzchni terenu. W rzeczywistości różnice faz mogą być także generowane przez czynniki zewnętrzne, które nie są związane z przemieszczeniem powierzchni terenu. Faza sygnału $\Delta\varphi_{int}$ ma zatem złożony charakter i zwykle wyrażana jest jako suma pięciu głównych składników (1) (Hanssen 2001):

$$\Delta\varphi_{int} = \varphi_{displ} + \varphi_{topo} + \varphi_{atm} + \varphi_{orb} + \varphi_{noise} \quad (1)$$

gdzie:

- φ_{displ} – składnik przemieszczenia powierzchni terenu;
- φ_{topo} – składnik określający topografię powierzchni terenu;
- φ_{atm} – składnik odpowiadający za wpływ zaburzeń atmosferycznych na propagację sygnału fali radarowej;
- φ_{orb} – składnik determinujący błędy orbity satelity, na którym umieszczona jest antena SAR;
- φ_{noise} – składnik grupujący pozostałe elementy, które wpływają na tzw. szum fazy fali radarowej

Ostatecznym celem przetwarzania danych InSAR jest prawidłowe oszacowanie fazy przemieszczenia powierzchni terenu. Zadanie to wykonywane jest poprzez całkowite usunięcie lub ograniczenie w jak największym stopniu pozostałych składników fazy sygnału. Ponadto, mając na uwadze zwinięty charakter sygnału fazowego (funkcja 2π), konieczne jest zastosowanie algorytmów rekonstrukcji pełnego obrazu fazy fali radarowej (Hanssen 2001). Mając na uwadze powyższe, głównymi ograniczeniami dla DInSAR są: dekorelacja czasowa i geometryczna, która wzmacnia komponent szumu

(Hanssen 2001), błędy rozwijania fazy fali radarowej (Ghiglia, Pritt 1998), a także nieprawidłowe oszacowanie komponentu atmosferycznego (Zebker i in. 1997).

W celu redukcji tych ograniczeń opracowane zostały techniki przetwarzania interferogramów oparte o szeregi czasowe (A-DInSAR). Metody te wykorzystują stos interferogramów różnicowych, które powiązane są ze sobą za pomocą wspólnego obrazu wzorcowego (Zhou i in. 2009). Takie podejście pozwala na prawidłowe oszacowanie wszystkich składników szumu fazy sygnału. Z tego względu możliwe jest wyliczenie składowej rzeczywistego przesunięcia powierzchni terenu z wyższą dokładnością. Analiza A-DInSAR stosu danych SAR dostarcza pewnej ilości punktów pomiarowych, które charakteryzują się oszacowanymi wartościami prędkości deformacji w danym okresie. Informacje tego typu są szczególnie przydatne w celu detekcji przyspieszenia bądź spadku prędkości przemieszczeń powierzchni terenu. Produkty A-DInSAR gwarantują zarówno pokrycie dużego obszaru powierzchni terenu, a także znaczną gęstość punktów pomiarowych. W zależności od wybranej metody przetwarzania danych, techniki te pozwalają na wykrywanie i pomiar przemieszczeń powierzchni terenu o skali subcentymetrowej (Ferretti, Tamburini i in. 2011, Crosetto i in. 2016).

W ciągu ostatnich dwóch dekad opracowano wiele różnych algorytmów przetwarzania danych SAR opartych o szeregi czasowe. Pierwszy z nich zaproponowany został na początku XXI w. jako *Persistent Scatterer Interferometry* (PSInSAR), (Ferretti i in. 2001). W kolejnych latach przedstawiono kilka kolejnych technik MTInSAR. Należą do nich: *Small Baseline Subset* (SBAS), (Berardino i in. 2002), *Coherent Pixel Technique* (CPT), (Mora i in. 2003), *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA), (Werner i in. 2003) oraz *SqueeSAR* (Ferretti i in. 2011). W świetle tych przykładów wiele innych grup badawczych skoncentrowało swoje wysiłki na realizacji nowych technik MTInSAR. W celu szerszego przeglądu tych algorytmów odsyłamy do (Crosetto i in. 2016).

2.2. Zastosowanie InSAR w modelowaniu odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu

InSAR jest coraz częściej stosowany w hydrogeologii ze względu na swoją precyzję w określaniu wartości przemieszczeń powierzchni terenu sięgającą kilku mm/rok, zasięg przestrzenny wynoszący zwykle od 100 do 5000 km² oraz opłacalność. Zastosowanie InSAR w badaniach hydrogeologicznych umożliwia znacznie szersze podejście do oceny zagrożeń wodnych. Gwałtowny rozwój tej technologii pomiarowej w ciągu ostatnich kilkunastu lat poprawił możliwości mapowania, monitorowania, analizy i symulacji przepływu wód podziemnych w systemie wodonośnym ulegającym kompaktacji (Gambolati, Teatini 2015). Obserwacje ilościowe przemieszczeń powierzchni terenu oraz wartości szacunkowe parametrów hydrogeologicznych uzyskiwanych z danych InSAR są bardzo przydatne w konstruowaniu regionalnych modeli hydrogeologicznych przepływu wód podziemnych i przemieszczeń powierzchni terenu (Galloway, Hoffmann 2007, Gambolati, Teatini 2015). Szereg badań przeprowadzonych w ciągu ostatnich trzech dekad wskazuje, iż przemieszczenia powierzchni terenu związane z deformacją systemu wodonośnego są nie tylko powszechne, ale można je także w sposób wiarygodny zmierzyć i opisać w zakresie przestrzennym i czasowym (Galloway i in. 1998, Hoffmann i in. 2001, Schmidt, Bürgmann 2003, Canuti i in. 2005, Teatini i in. 2006, Galloway, Hoffmann 2007, Galloway, Burbey 2011, Gambolati, Teatini 2015).

Z uwagi na znaczną ilość prowadzonych badań nad wykorzystaniem InSAR w zagadnieniach hydrogeologicznych,

w dalszej części artykułu przedstawione zostaną wyłącznie wybrane, konstytutywne przykłady, które dotyczą określenia (Galloway, Hoffmann 2007):

- granic strukturalnych systemów wodonośnych (np. uskoki tektoniczne);
- rozkładu czasowo-przestrzennego przemieszczeń powierzchni terenu i niejednorodności hydrogeologicznej systemu wodonośnego;
- wartości współczynników pojemności wodnej i przewodności hydraulicznej warstw skalnych.

2.2.1. Granice strukturalne systemów wodonośnych (np. uskoki tektoniczne)

Granice systemów wodonośnych w modelach hydrogeologicznych przepływu wód podziemnych często określane są w oparciu o uskoki. Dyslokacje tektoniczne tego typu mogą stanowić istotne elementy hydrauliczne w przypadku regionalnych systemów przepływu wód podziemnych. Odgrywają one zazwyczaj rolę wielkopowierzchniowych barier hydraulicznych, zaburzając przepływ wody w warstwach skalnych. Uskoki mogą stanowić granicę pomiędzy jednostkami hydrogeologicznymi o kontrastowym, poziomym przewodnictwie hydraulicznym. Ponadto, stanowią one bariery hydrogeologiczne o niskiej przepuszczalności wodnej, które mogą powodować wystąpienie stromych gradientów hydraulicznych. Z tego względu detekcja uskoków odbywa się zazwyczaj na podstawie analizy regionalnych map powierzchni potencjometrycznych. Przeprowadzenie wiarygodnej analizy zwierciadła wód podziemnych wymaga jednak znacznego stopnia rozpoznania hydrogeologicznego systemu wodonośnego. W wielu obszarach pomiary tego rodzaju prowadzone są w sposób niejednorodny. Z tego względu dostarczają one wyłącznie fragmentarycznej wiedzy o charakterystyce hydrogeologicznej badanego ośrodka (Dutcher, Garrett 1963).

Pomiary prowadzone w oparciu o InSAR umożliwiają otrzymanie szczegółowego przestrzennie i czasowo pola przemieszczeń powierzchni terenu. Identyfikacja rozpoznanych i nierozpoznanych uskoków związana jest natomiast z możliwością detekcji dyskretnych, różnicowych przemieszczeń powierzchni terenu. Skuteczność InSAR w rozpoznaniu potencjalnych lokalizacji uskoków zależy zatem od ściśłości szkieletu skalnego i czasowych zmian poziomu wody w sąsiadujących jednostkach hydrogeologicznych, które mogą być oddzielone przez uskoki. Potencjalna obecność uskoku definiowana może być przez strome gradienty przemieszczenia powierzchni terenu, które przyjmują typowe, liniowe ustawienia. Znacznym wartościami gradientu przemieszczeń powierzchni terenu sprzyjają ponadto zmiany poziomu zwierciadła wód w jednostce hydrogeologicznej po jednej stronie uskoku.

Jednym z przykładów, który wskazuje, w jaki sposób szczegółowe mapy przemieszczeń powierzchni terenu pozyskane przy zastosowaniu InSAR przyczyniają się do określenia nowych informacji na temat roli uskoków w systemach wodonośnych są badania prowadzone na poligonie w Santa Clara Valley, Kalifornia, USA (Chaussard i in. 2017). Pierwotnie, ze względu na brak wyraźnych, powierzchniowych zmian w strukturze powierzchni terenu, które mogły wskazywać na występowanie uskoku w analizowanym rejonie, jego lokalizacja została ustalona w oparciu o obrazowanie sejsmiczne oraz InSAR (Schmidt, Bürgmann 2003, Chaussard i in. 2014). Chaussard i in. (2017) przeprowadzili analizę szeregów czasowych danych InSAR pochodzących z satelitów ERS, ENVISAT i ALOS SAR. W ten sposób określone zostały wartości przemieszczeń powierzchni terenu w latach 1992–2011. Poprzez analizę głównych składowych (PCA) otrzymanych wartości przemieszczeń powierzchni

terenu, autorzy z powodzeniem wyizolowali zmienne sezonowo wzorce tych przemieszczeń, które osadzone były w całym badanym szeregu czasowym. W ten sposób określony został długoterminowy oraz sezonowy trend przemieszczeń powierzchni terenu na obszarze badań. Na podstawie długoterminowego trendu przemieszczeń powierzchni terenu możliwe było zgrubne określenie przebiegu uskoku. Ostatecznie, szczegółowe położenie uskoku zostało jednak ustalone poprzez przeprowadzenie analizy rozkładu sezonowego przemieszczeń powierzchni terenu określonych na podstawie InSAR sprzężonych ze zmianami wysokości zwierciadła wód podziemnych po obu stronach uskoku (rys. 3). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono także, iż uskoki przyczyniają się do zaburzeń przepływu wody w skali regionalnej, stanowiąc obszar o zmniejszonej wartości współczynnika pojemności wodnej i kompresyjności warstw skalnych.

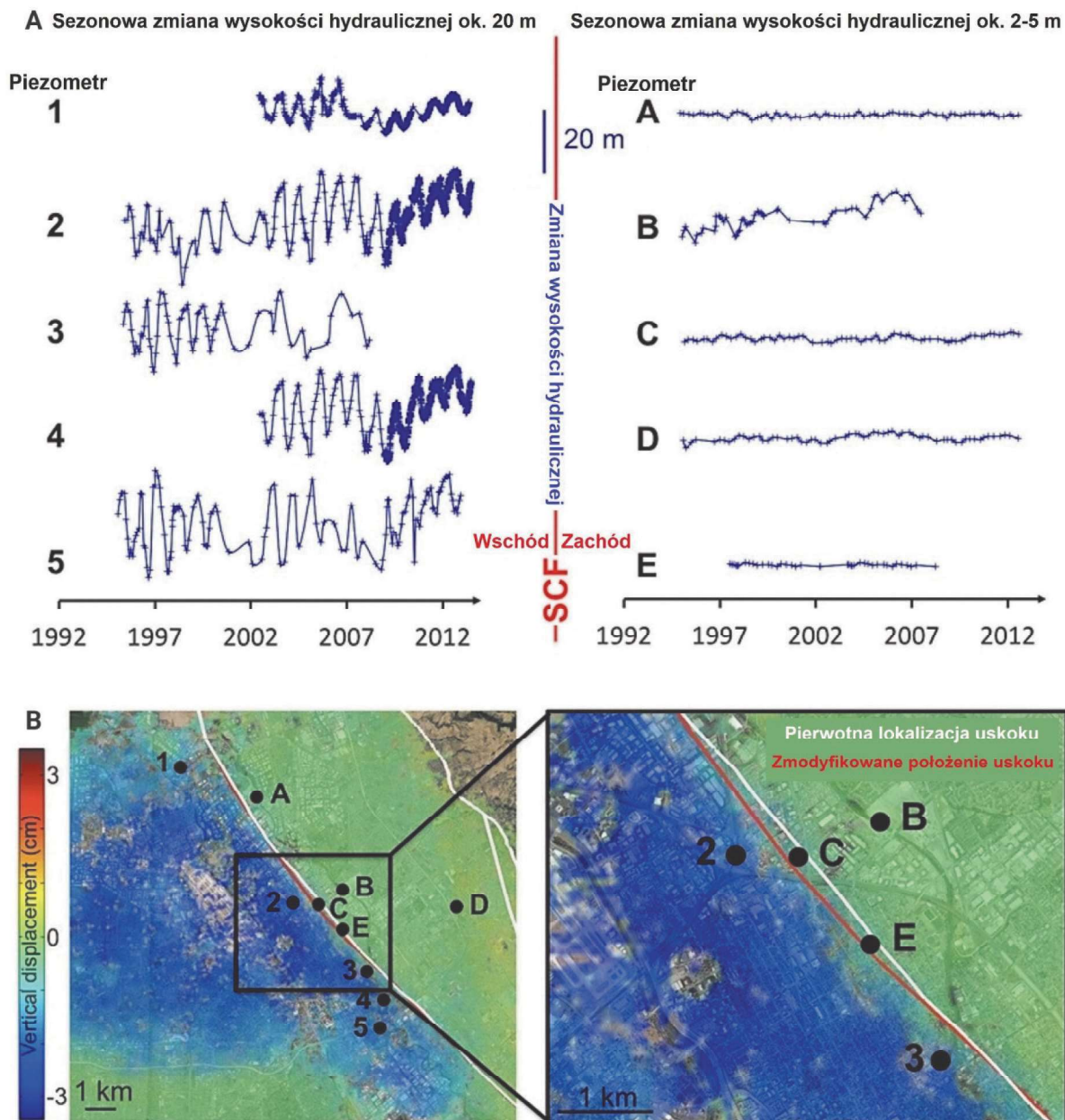
2.2.2. Rozkład czasowo-przestrzenny przemieszczeń powierzchni terenu i niejednorodność hydrogeologiczna systemu wodonośnego

Obszary, na których występują przemieszczenia powierzchni terenu wymagają skutecznych metod ich identyfikacji. Monitorowanie tego zjawiska pozwala określić czasowo-przestrzenny rozkład deformacji systemu wodonośnego, a tym samym zidentyfikować mechanizm badanego procesu. W przeszłości wykorzystywanie InSAR w monitorowaniu zjawisk tego typu dotyczyło głównie ilościowej analizy rozkładu przemieszczeń powierzchni terenu w skali regionalnej. Z tego względu analizy te pozwalały wyłącznie na ograniczone badanie przestrzennej niejednorodności systemów wodonośnych. Jednakże, znaczne możliwości w tym aspekcie zapewniają techniki A-DInSAR (Boni i in. 2017, Zhou i in. 2018, Guo i in. 2019).

PSInSAR został wykorzystany do wykrywania i analizowania długoterminowej dynamiki obniżenia powierzchni terenu w latach 2003–2015 w Pekinie, w Chinach (Zhou i in. 2018). W badaniach wykorzystano obrazy radarowe ENVISAT, Radarsat-2 i TerraSAR-X, a niezależne pomiary niwelacyjne potwierdziły wysoką dokładność wyników InSAR. Na podstawie analizy szeregów czasowych punktów PS utworzona została mapa średniej prędkości obniżenia powierzchni terenu (rys. 4). Obszary o zróżnicowanej prędkości obniżenia powierzchni terenu znajdowały się głównie w granicach siedmiu nieekwilibriowanych (rys. 4). Prędkości przemieszczeń powierzchni terenu wahały się w granicach od -136,9 do +15,2 mm/rok w latach 2003–2010 oraz od -149,4 do +8,9 mm/rok w latach 2011–2015 (rys. 5). Autorzy tych badań wskazują, że obszar powierzchni terenu o największej dynamice przemieszczeń jest zgodny ze wzorcami spadku wysokości hydraulicznej w głównym systemie wodonośnym Niziny Pekińskiej (Zhou i in. 2018).

Znaczne możliwości efektywnego przetwarzania danych SAR, które oparte są o techniki A-DInSAR pozwalają na identyfikację przemieszczeń powierzchni terenu ze szczegółowymi charakterystykami geomechanicznymi. Obejmują one odkształcenia liniowe i nieliniowe, a także fluktuacje sezonowe, np. związane z porami roku czy zmianami w czasie objętości pompowanej wody ze zbiorników podziemnych (Chaussard i in. 2014, 2017). Ponadto, szeregi czasowe przemieszczeń powierzchni terenu pozyskane przy wykorzystaniu technik A-DInSAR pozwalają na analizę wsteczną przemieszczeń powierzchni terenu, a tym samym na określenie ich przestrzennej dynamiki w czasie (Ezquerro i in. 2014, Rezaei, Mousavi 2019).

Po kilkuletnim okresie kalibracji danych, w trakcie którego wykorzystuje się sprzężone obserwacje zmian wysokości hydraulicznej i przemieszczeń powierzchni terenu, możliwe

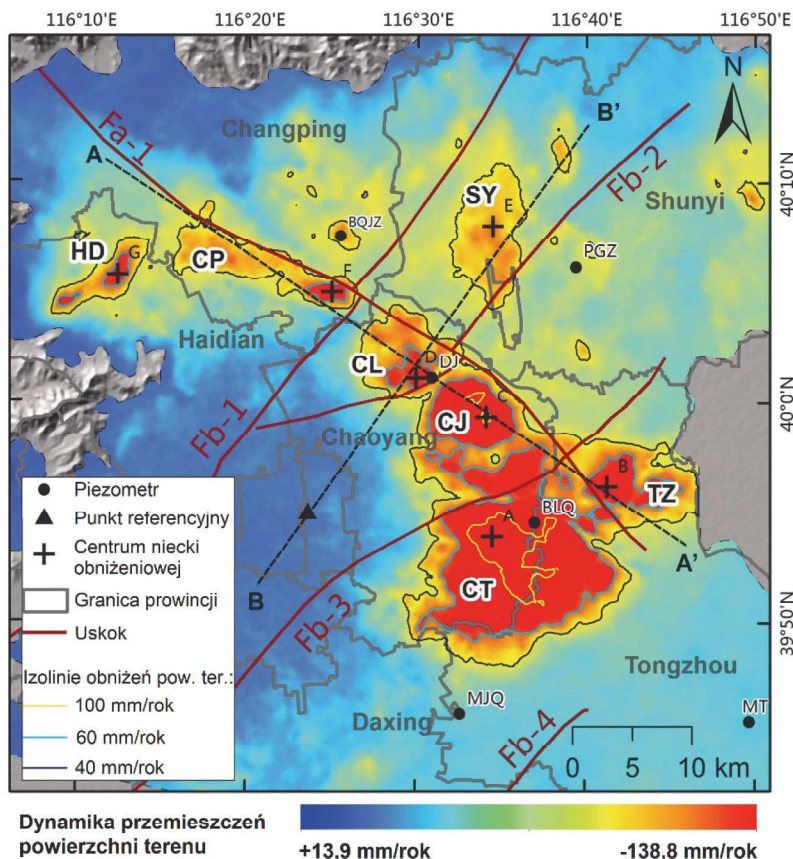


Rys. 3. (A) Przykłady sezonowych zmian wysokości hydraulicznej w piezometrach, które zlokalizowane są po obu stronach uskoku Santa Clara (SCF); (B) rozmieszczenie przestrzenne piezometrów. Piezometry, w których zaobserwowano sezonową zmianę wysokości hydraulicznej rzędu ok. 20 m zostały zaznaczone numerami 1-5, podczas gdy piezometry o fluktuacji wysokości hydraulicznej o wartościach rzędu ok. 2-5 m zostały oznaczone literami A-E. (B) Biała linia oznacza lokalizację uskoku Santa Clara określoną wyłącznie na podstawie pomiarów InSAR, podczas gdy czerwona linia wskazuje na lokalizację tego uskoku określoną w oparciu o sprzężone pomiary InSAR oraz wysokości hydraulicznej w poszczególnych piezometrach; zmodyfikowano na podstawie (Chaussard i in. 2014)

Fig. 3. (A) Examples of seasonal hydraulic head changes at wells on each side of the Santa Clara Fault (SCF); (B) the locations of the well. Wells with seasonal groundwater head changes of approximately 20 m are labelled with numbers 1-5, whereas wells with seasonal groundwater head changes of approximately 2–5 m are labelled with letters A-E. (B) SCF location based on InSAR deformation only (white line, initial location) and based on InSAR measurements coupled with groundwater head changes (red line, refined location); modified after (Chaussard i in. 2014)

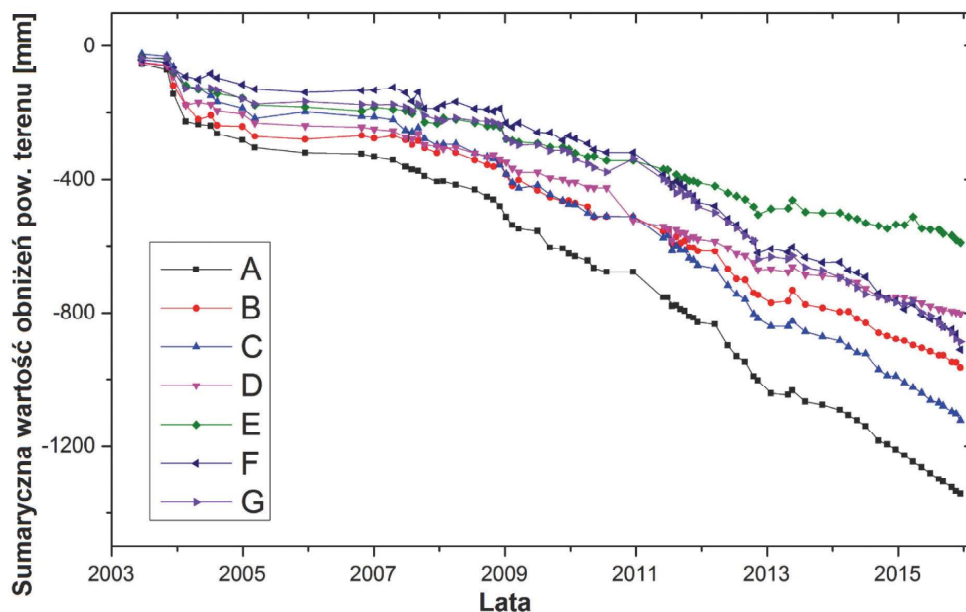
jest wnioskowanie o sezonowych wariacjach wysokości hydraulicznej w warstwach wodonośnych poprzez monitorowanie przemieszczeń powierzchni terenu o charakterze elastycznym. Takie podejście pokazuje potencjał do szacowania zmian wysokości wód podziemnych w zakresie odkształceń sprężystych na obszarach pozbawionych sieci

studni bądź piezometrów monitorujących. Informacje tego rodzaju są istotnym źródłem danych, które można wykorzystać w tradycyjnych modelach hydrogeologicznych w celu zwiększenia wiarygodności wyników modelowania (Boni i in. 2015, 2016b, 2017). Prowadzenie monitoringu tego typu nie jest możliwe przy wykorzystaniu tradycyjnych metod po-



Rys. 4. Mapa średniej prędkości pionowych przemieszczeń powierzchni terenu na Nizinie Pekijskiej, Chiny w latach 2003-2015 opracowana na podstawie analizy szeregów czasowych PSInSAR; skróty oznaczają następujące miasta: CT: Chaoyang–Tongzhou; TZ: Tongzhou; CJ: Chaoyang–Jinzhan; CL: Chaoyang–Laiguangying; SY: Shunyi; CP: Changping; i HD: Haidian; zmodyfikowano na podstawie (Zhou i in. 2018)

Fig. 4. The mean vertical ground surface movement velocity in the Beijing Plain, China in the period 2003-2015 based on the analysis of PSInSAR; various acronyms are given as follows: CT: Chaoyang–Tongzhou; TZ: Tongzhou; CJ: Chaoyang–Jinzhan; CL: Chaoyang–Laiguangying; SY: Shunyi; CP: Changping; and HD: Haidian; modified after (Zhou i in. 2018)



Rys. 5. Szeregi czasowe skumulowanych wartości obniżenia powierzchni terenu w wybranych punktach pomiarowych A-G w okresie od czerwca 2003 do grudnia 2015 (rozmięszczenie przestrzenne punktów zostało przedstawione na rys. 4); zmodyfikowano na podstawie (Zhou i in. 2018)

Fig. 5. Time-series cumulative subsidence of the points A-G (see Fig. 4 for location) from June 2003 to December 2015; modified after (Zhou i in. 2018)

miarowych. Należy także zauważyć, że w kontekście badań geomechanicznych procesu kompaktacji warstw wodonośnych możliwość taka otwiera nową perspektywę w monitorowaniu poziomych przemieszczeń powierzchni terenu, szczególnie na terenach o bardzo małych wartościach deformacji.

2.2.3. Estymacje współczynników pojemności wodnej i przewodności hydraulicznej warstw skalnych

Podczas ostatnich dwóch dekad przeprowadzono wiele badań, których celem była integracja danych InSAR oraz informacji o zmianach poziomów wodonośnych w celu estymacji pojemności wodnej systemu wodonośnego (Tomas i in. 2011, Chaussard i in. 2014, Ezquerro i in. 2014, Chen i in. 2016, Jiang i in. 2018, Rezaei, Mousavi 2019). W tym celu wykorzystywany jest głównie jednowymiarowy model zaproponowany przez (Hoffmann i in. 2001), który można sformułować poprzez równanie (2):

$$S \approx bS_{sk} \approx \frac{\Delta z}{\Delta h}, \quad (2)$$

gdzie:

- S – pojemność wodna warstwy wodonośnej;
- b – miąższość warstwy wodonośnej;
- S_{sk} – współczynnik pojemności wodnej szkieletu warstwy wodonośnej;
- Δz – zmiana wysokości powierzchni terenu;
- Δh – zmiana wysokości hydraulicznej

Model ten jest również używany w celu scharakteryzowania relacji pomiędzy wysokością hydrauliczną a dynamiką przemieszczeń powierzchni terenu, która określona jest na podstawie szeregów czasowych pozyskanych np. przy wykorzystaniu danych InSAR. Model zaproponowany przez Hoffmanna zakłada, że ciśnienie wody porowej w warstwie wodonośnej równoważy się natychmiastowo ze zmianami poziomem wysokości wód podziemnych i nie uwzględnia żadnego opóźnienia pomiędzy zmianą wysokości hydraulicznej a kompaktacją warstw wodonośnych. Niemniej, estymacja pojemności wodnej na podstawie danych InSAR oraz modelu Hoffmanna otwiera drogę do dalszych badań nad właściwościami geomechanicznymi warstw wodonośnych. Na podstawie inwersji równania (3) możliwe jest uzyskanie wartości elastycznego współczynnika pojemności wodnej warstwy wodonośnej nasyconej:

$$S = bS_s = b(S_{sk} + S_{sw}) = b[\rho_w g(\alpha + n\beta_w)], \quad (3)$$

gdzie:

- S_s – współczynnik pojemności wodnej;
- S_{sw} – współczynnik pojemności wodnej wody;
- ρ_w – gęstość wody;
- g – przyspieszenie ziemskie;
- α – kompresyjność szkieletu skalnego;
- n – porowatość szkieletu skalnego;
- β – kompresyjność wody

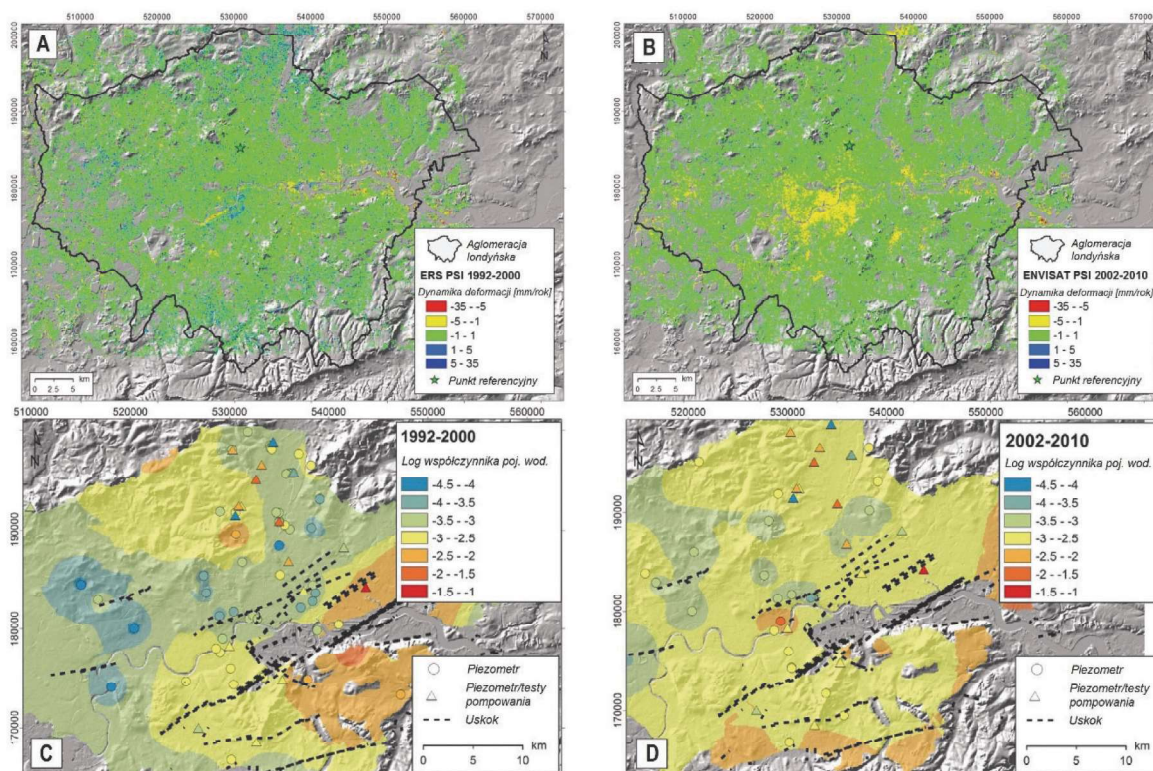
InSAR w połączeniu z danymi hydraulicznymi pozwala na scharakteryzowanie właściwości systemu wodonośnego w skali regionalnej. W przypadkach, w których sezonowe odkształcenie jest elastyczne i stosunkowo stałe w czasie, można łatwo obliczyć współczynnik pojemności wodnej, wykorzystując średnie odkształcenie sezonowe i zmiany wysokości hydraulicznej wody, nawet jeśli obejmują one różne okresy. W miejscach, w których większość wpływów sezonowych ogranicza się do nasyconej warstwy wodonośnej (niewielka utrata wody z warstwy wodonośnej w wyniku odpływu i parowania), można również w ten sposób wyznaczyć możliwe prędkości pompowania wód podziemnych.

Stosowalność danych pozyskanych przy wykorzystaniu InSAR do estymacji zmian wysokości hydraulicznej zależy od amplitudy przemieszczeń powierzchni terenu i sezonowych zmian wysokości hydraulicznej. Z tego względu dane InSAR mogą być z powodzeniem stosowane przede wszystkim do szacowania takich zmian w warstwach wodonośnych nasyconych, które są mniej podatne na sezonowe fluktuacje wysokości hydraulicznej. Dokładność estymacji pojemności wodnej zależy również od rodzaju odkształcenia warstwy wodonośnej. Elastyczny zakres deformacji koresponduje ze stałą wartością pojemności wodnej w czasie. W przypadku jednak występowania w nadkładzie warstwy wodonośnej np. pokładów glin bądź innych pokładów niskoprzepuszczalnych, które charakteryzują się pewnym stopniem opóźnienia w procesie deformacji na skutek odwodnienia, prawidłowe wyznaczenie pojemności wodnej może być bardzo utrudnione i wymagać wielu okresów kalibracji periods (Hoffmann 2003).

Badania przeprowadzone przez (Boni i in. 2016a) są jednym z przykładów integracji danych InSAR oraz zmian wysokości hydraulicznej w celu estymacji czasowo-przestrzennego rozkładu pojemności wodnej warstwy wodonośnej. Dane z szeregów czasowych przemieszczeń powierzchni terenu pozyskane przy wykorzystaniu metody PSInSAR zostały wykorzystane w celu estymacji pojemności wodnej Basenu Londyńskiego. Celem tych badań było poszerzenie wiedzy w zakresie czasowo-przestrzennej ewolucji pojemności wodnej analizowanego obszaru w aspekcie zmiennych charakterystyk pompowania wody. W badaniach wykorzystano dane InSAR, które pochodziły z okresów 1992-2000 oraz 2002-2010 (rys. 6A, B), które pozyskane zostały przez satelity ERS-1, ERS-2 i ENVISAT. Przeprowadzone badania umożliwiły scharakteryzowanie pojemności wodnej kredowego kompleksu wodonośnego na obszarze ok. 1360 km² (rys. 6C, D).

2.3. Ograniczenia w stosowalności InSAR

Głównym wyzwaniem związanym z zastosowaniem InSAR w badaniach odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu jest niska wartość koherencji na terenach naturalnych (łąki, lasy, jeziora). Utrata koherencji jest zazwyczaj proporcjonalna do gęstości roślinności i odwrotnie proporcjonalna do długości fali radarowej. Podczas gdy wpływ pojedynczych drzew, które powodują utratę koherencji na obszarach miejskich, jest możliwy do zniwelowania, np. poprzez zastosowanie dedykowanych algorytmów interpolacyjnych danych, niska wartość koherencji jest szczególnym problemem w przypadku, gdy na całej powierzchni poddawanej analizie dominuje wysoka i gęsta roślinność. Z tego względu systemy SAR o krótkiej długości fali radarowej (np. pasmo X) mogłyby nie pozwolić na wykrycie przemieszczenia powierzchni terenu na obszarach roślinnych, jednocześnie ich aplikacyjność na obszarach miejskich mogłaby być zadowalająca. W celu ograniczenia tego problemu, możliwe jest stosowanie pasm SAR o większej długości fali radarowej (pasmo C, pasmo L). Takie rozwiązanie związane jest wprawdzie z wyższym progiem wykrywania przemieszczeń powierzchni terenu, ale jednocześnie z niższą dokładnością pionową oszacowania wartości tych przemieszczeń. Na dokładność oszacowania wartości przemieszczeń powierzchni terenu wpływ ma również atmosfera, przez którą propaguje fala radarowa (wpływ rzędu cm/rok). Wpływ ten można jednak prawie w całości oszacować i wyeliminować poprzez zastosowanie odpowiednich metod przetwarzania danych, które oparte są o szeregi czasowe (A-DInSAR). W hydrogeologii często zakłada się, że przemieszczenie wykryte przez InSAR jest całkowicie związane z zagęszczeniem warstwy wodonośnej. W skali cm/rok wzorce zagęszczenia przestrzen-



Rys. 6. Pionowe przemieszczenia powierzchni terenu na obszarze Basenu Londyńskiego otrzymane na podstawie przetwarzania danych SAR metodą PSI w okresie (A) 1992–2000 oraz (B) 2002–2010; mapy współczynnika pojemności wodnej dla okresu (C) 1992–2000 oraz (D) 2002–2010 określone na podstawie jednowymiarowego modelu zaproponowanego przez (Hoffmann i in. 2001). Zmodyfikowano na podstawie (Boni i in. 2016b)

Fig. 6. Vertical ground surface velocities estimated for the London Basin with PSI analysis in (A) 1992–2000 i (B) 2002–2010; maps of the aquifer storage coefficient in (C) 1992–2000 and (D) 2002–2010 determined with the use of 1-D aquifer compaction model proposed by (Hofmann et. al. 2001); modified after (Boni i in. 2016b)

nego warstwy wodonośnej są zwykle dobrze odróżnialne od erozji i akumulacji osadów, osuwisk, wulkanizmu, uskoków tektonicznych lub górnictwa. W przypadku przemieszczeń powierzchni terenu o wartościach mm/rok, ich detekcja i interpretacja przy wykorzystaniu InSAR może być dyskusyjna, w szczególności, gdy współistnieje wiele czynników determinujących przemieszczenia powierzchni terenu.

Oczekuje się, że faza SAR powinna być porównywalna między kolejnymi akwizycjami radarogramów. Jeśli przemieszczenie powierzchni terenu pomiędzy dwoma rejestracjami obrazu SAR jest większe niż długość fali SAR i jeśli ten ruch nie jest progresywny przestrzennie, występuje tzw. faza „przeskoku”. W takim przypadku możliwe jest wystąpienie błędów w procesie rozwijania fazy fali radarowej. Z tego względu rozdzielczość czasowa obrazów SAR powinna być zgodna z oczekiwanymi prędkościami przemieszczeń powierzchni terenu. Dlatego w celu optymalnego wykorzystania danych InSAR konieczne jest porównanie linii bazowej czasu akwizycji danych SAR z prędkością przemieszczenia powierzchni terenu. W warunkach idealnych, aby uzyskać stałe tempo obniżenia powierzchni terenu ok. 5 cm/rok w oparciu o technikę PSI, serie czasowe obrazów radarowych powinny składać się odpowiednio, z co najmniej siedmiu, czterech i jednego obrazu rocznie w paśmie X, C i L. W przypadku, gdy przemieszczenia powierzchni terenu są progresywne przestrzennie, większe ich wartości można określić poprzez przetwarzanie danych w oparciu o A-DInSAR. W takich przypadkach należy wziąć pod uwagę także inne czynniki, które mają wpływ na obraz fazy fali radarowej. Obejmują one przede wszystkim: poziom szumów danych SAR, tech-

nikę rozwijania fazy i zmienność czasową przemieszczenia powierzchni terenu.

3. Podsumowanie

Celem niniejszego artykułu było podsumowanie implementacji danych InSAR w ciągu ostatnich kilku lat w celu wsparcia procesu modelowania odwodnieniowych przemieszczeń powierzchni terenu. Z uwagi na gwałtowny w ostatnich latach rozwój technologii InSAR oraz znaczny wzrost dostępności danych pomiarowych pozyskanych przy zastosowaniu tej technologii, prowadzenie monitoringu przemieszczeń powierzchni terenu jest dzisiaj możliwe na bardzo zaawansowanym poziomie. Z tego względu, prowadzone badania naukowe w zakresie wykorzystania InSAR mają na celu skuteczne przewidywanie, zapobieganie bądź, co najmniej niwelowanie niekorzystnych skutków obserwowanych przemieszczeń powierzchni terenu.

Detekcja przemieszczeń powierzchni terenu przy wykorzystaniu InSAR możliwa jest przy zastosowaniu różnorodnych rozdzielczości czasowych i przestrzennych obrazowania SAR. Obrazy radarowe obejmują zakres od wielkoskalowych, regionalnych zobrazowań po skalę lokalną. Dokładność oszacowania przemieszczenia pionowego zwykle waha się od milimetrów w przypadku fal krótkich do centymetrów w przypadku fal długich, przy czym krótsze fale są bardziej wrażliwe na utratę koherencji w mniej spójnych obszarach, np. łąkach, lasach, pastwiskach. Ostatnie badania i studia poszczególnych przypadków wskazują, że implementacja InSAR pozwoliła na

lepsze rozpoznanie właściwości hydromechanicznych warstw skalnych oraz procesu kompaktacji odwodnieniowej.

Potrzebne są jednak dalsze badania, które pomogą usprawnić ocenę, analizę i predykcję procesów związanych z kompaktacją podatnych warstw wodonośnych, a tym samym związane z nią przemieszczenia powierzchni terenu. Działania tego rodzaju są niezbędne w celu wsparcia procesu zarządzania zasobami wodnymi oraz określenia środków remediacji potencjalnych zagrożeń. Główne obszary tematyczne potencjalnych badań obejmują:

- hydromechaniczne właściwości warstw wodonośnych;
- rolę odkształcenia poziomego w procesie kompaktacji;
- regionalną symulację przepływu wód podziemnych w aspekcie procesu kompaktacji systemów wodonośnych.

Biorąc pod uwagę znaczny wzrost ilości danych pomiarowych pochodzących z obserwacji InSAR, wskazane są również dalsze badania w tym zakresie. Na szczególną uwagę zasługuje rola sztucznej inteligencji w przetwarzaniu Big Data oraz wykorzystanie narzędzi statystycznych do oceny niepewności parametrów modelu oraz wyników modelowania przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych drenażem warstwy wodonośnej.

Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na zasoby czystej wody podziemnej na całym świecie, coraz więcej zbiorników wodnych podlega pompowaniu. Jednocześnie, na coraz większych obszarach globu obserwuje się odwodnieniowe przemieszczenia powierzchni terenu, co sprawia, że konieczne jest dokładne modelowanie skutków wyczerpywania się zasobów zbiorników wód podziemnych i opracowywanie skutecznych strategii zarządzania w celu ograniczenia niekorzystnych efektów powstających w ten sposób przemieszczeń powierzchni terenu. Integracja metod modelowania procesu kompaktacji warstw wodonośnych z dużymi zbiorami danych pomiarowych InSAR wydaje się być efektywnym sposobem w tym aspekcie, zapewniając możliwość uzyskiwania bardziej precyzyjnego obrazu kompresji warstw wodonośnych indukowanych drenażem szkieletu skalnego.

Podziękowania

Niniejszy artykuł został opracowany w ramach projektu badawczego pt. „Model estymacji ruchów powierzchni terenu indukowanych drenażem warstw skalnych”, który finansowany jest przez Narodowe Centrum Nauki, Preludium-17 grant nr 2019/33/N/ST10/00724.

Literatura

- ALLIS R., BROMLEY C., CURRIE S. 2009 - Update on subsidence at the Wairakei-Tauhara geothermal system, New Zeali, *Geothermics*. Pergamon, 38(1), s. 169–180. doi: 10.1016/j.geothermics.2008.12.006.
- ALLISON M. i in. 2016 - Global Risks i Research Priorities for Coastal Subsidence, *EOS*. doi: 10.1029/2016eo055013.
- AMITRANO D. i in. 2014 - Sentinel-1 for monitoring reservoirs: A performance analysis, *Remote Sensing*. doi: 10.3390/rs61110676.
- AOBPAET A. i in. 2013 - InSAR time-series analysis of li subsidence in Bangkok, Thaili, *International Journal of Remote Sensing*. doi: 10.1080/01431161.2012.756596.
- BÉJAR-PIZARRO M. i in. 2017 - Mapping groundwater level i aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, *Central Spain, Journal of Hydrology*. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.02.011.
- BERARDINO P. i in. 2002 - A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience i Remote Sensing*, 40(11), s. 2375–2383. doi: 10.1109/TGRS.2002.803792.
- BONÌ R. i in. 2015 - Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe li subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study, *Engineering Geology*. doi: 10.1016/j.enggeo.2015.08.014.
- BONÌ R. i in. 2016a - Characterisation of hydraulic head changes i aquifer properties in the London Basin using Persistent Scatterer Interferometry ground motion data, *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 540, s. 835–849. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.06.068.
- BONÌ R. i in. 2016b - Characterisation of hydraulic head changes i aquifer properties in the London Basin using Persistent Scatterer Interferometry ground motion data, *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V., 540, s. 835–849. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.06.068.
- BONÌ R. i in. 2017 - Exploitation of Satellite A-DInSAR Time Series for Detection, Characterization i Modelling of Li Subsidence, *Geosciences*. MDPI, 7(2), p. 25. doi: 10.3390/geosciences7020025.
- BOZZANO F. i in. 2015 - Understing the subsidence process of a quaternary plain by combining geological i hydrogeological modelling with satellite InSAR data: The Acque Albule Plain case study, *Remote Sensing of Environment*. doi: 10.1016/j.rse.2015.07.010.
- Canadian Space Agency 2020 - RADARSAT Constellation Mission - Canada. ca. Dostęp: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/default.asp> (Ostatni dostęp: 22.03.2020).
- CANUTI P. i in. 2005 - Li subsidence in the Arno River Basin studied through SAR interferometry, w *Li Subsidence--Proceedings of the Seventh International Symposium on Li Subsidence (Vol. I)*. Dostęp: https://www.researchgate.net/publication/309347577_Li_subsidence_in_the_Arno_river_basin_studied_through_SAR_interferometry (Ostatni dostęp: 22.03.2020).
- CASTELLAZZI P. i in. 2016 - Li subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived li subsidence mapping with hydrogeological data, *International Journal of Applied Earth Observation i Geoinformation*. doi: 10.1016/j.jag.2015.12.002.
- CHAUSSARD E. i in. 2014 - Predictability of hydraulic head changes i characterization of aquifer-system i fault properties from InSAR-derived ground deformation, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Blackwell Publishing Ltd, 119(8), s. 6572–6590. doi: 10.1002/2014JB011266.
- CHAUSSARD E. i in. 2017 - Remote Sensing of Ground Deformation for Monitoring Groundwater Management Practices: Application to the Santa Clara Valley During the 2012–2015 California Drought, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Blackwell Publishing Ltd, 122(10), s. 8566–8582. doi: 10.1002/2017JB014676.
- CHEN J. i in. 2016 - Confined aquifer head measurements i storage properties in the San Luis Valley, Colorado, from spaceborne InSAR observations, *Water Resources Research*. doi: 10.1002/2015WR018466.
- CROSETTO M. i in. 2016 - Persistent Scatterer Interferometry: A review, *ISPRS Journal of Photogrammetry i Remote Sensing*. Elsevier B.V., 115, s. 78–89. doi: 10.1016/j.isprs.2015.10.011.
- DUTCHER I. C. GARRETT A. A. 1963 - Geologic i Hydrologic Features of the San Bernardino Area, California, *Geologic Survey Water-Supply Paper 1419*, *Water Supply Paper*, s. 111. doi: 10.3133/wsp1419.
- EHLÉN J. i in. 2007 - Impacts of li subsidence caused by withdrawal of underground fluids in the United States, in *Humans as Geologic Agents*. Geological Society of America, s. 87–99. doi: 10.1130/2005.4016(08).
- ERKENS G. i in. 2015 - Sinking coastal cities, in *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. doi: 10.5194/piahs-372-189-2015.
- European Space Agency 2014a - Envisat - ESA Earth Online, European Space Agency - Earth Online. Dostęp: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-co-missions/ers> (Ostatni dostęp: 22.03.2020).
- European Space Agency 2014b - ERS - ESA Earth Online, European Space Agency - Earth Online. Dostęp: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-co-missions/envisat> (Ostatni dostęp: 22.03.2020).
- European Space Agency 2015 - COSMOSky-MED. Dostęp: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed> (Ostatni dostęp: 22.03.2020).
- European Space Agency 2020a - Sentinel-1 - Missions - Sentinel Online, European Space Agency - Earth Online. Dostęp: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (Ostatni dostęp: 21.03.2020).
- European Space Agency 2020b - TSX (TerraSAR-X) - eoPortal Directory - Satellite Missions. Dostęp: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite>

- missions/t/terrasar-x (Ostatni dostęp: 22.03.2020).
- EZQUERRO P. i in. 2014 - A quasi-elastic aquifer deformational behavior: Madrid aquifer case study, *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.040.
- EZQUERRO P. i in. 2017 - Groundwater i subsidence modeling combining geological i multi-satellite SAR data over the alto guadalentin aquifer (SE Spain), *Geofluids*, doi: 10.1155/2017/1359325.
- FAMIGLIETTI J. S. i in. 2011 - Satellites measure recent rates of groundwater depletion in Californias Central Valley, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2010GL046442.
- FERRETTI A., FUMAGALLI A., i in. 2011 - A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR, *IEEE Transactions on Geoscience i Remote Sensing*, 49(9), s. 3460–3470. doi: 10.1109/TGRS.2011.2124465.
- FERRETTI A., TAMBURINI, A., i in. 2011 - Impact of high resolution radar imagery on reservoir monitoring, *Energy Procedia*. Elsevier Ltd, 4, s. 3465–3471. doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.272.
- FERRETTI A., PRATI, C. I ROCCA, F. 2001 - Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience i Remote Sensing*, IEEE, 39(1), s. 8–20. doi: 10.1109/36.898661.
- GABRIEL A. K., GOLDSTEIN R. M., I ZEBKER, H. A. 1989 - Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry, *Journal of Geophysical Research*. John Wiley & Sons, Ltd, 94(B7), s. 9183–9191. doi: 10.1029/JB094iB07p09183.
- GALLOWAY D. L. i in. 1998 - Detection of aquifer system compaction i li subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California, *Water Resources Research*. American Geophysical Union, 34(10), s. 2573–2585. doi: 10.1029/98WR01285.
- GALLOWAY D. L., BURBEY T. J. 2011 - Review: Regional li subsidence accompanying groundwater extraction, *Hydrogeology Journal*. Springer, 19(8), s. 1459–1486. doi: 10.1007/s10040-011-0775-5.
- GALLOWAY D. L., HOFFMANN J. 2007 - The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology, *Hydrogeology Journal*. Springer, 15(1), s. 133–154. doi: 10.1007/s10040-006-0121-5.
- GAMBOLATI G. i in. 1991 - Mathematical Simulation of the Subsidence of Ravenna, *Water Resources Research*. John Wiley & Sons, Ltd, 27(11), s. 2899–2918. doi: 10.1029/91WR01567.
- GAMBOLATI G., TEATINI P. 2015 - Geomechanics of subsurface water withdrawal i injection, *Water Resources Research*. John Wiley & Sons, Ltd, 51(6), s. 3922–3955. doi: 10.1002/2014WR016841.
- GHIGLIA D. C. PRITT M. D. 1998 - Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, i software, *J Investig Dermatol*. Wiley. Dostęp: <http://books.google.com/books?id=pQtTAAAMAAMAJ> (Ostatni dostęp: 20.03.2020).
- GUO L. i in. 2019 - Analysis of the spatiotemporal variation in li subsidence on the Beijing Plain, China, *Remote Sensing*, doi: 10.3390/rs11101170.
- HANSEN R. F. 2001 - Radar Interferometry, Data Interpretation i Error Analysis. Dordrecht, the Netherlis: Kluwer Academic Publishers. Dostęp: https://www.researchgate.net/publication/27343576_Radar_Interferometry_Data_Interpretation_i_Error_Analysis (Ostatni dostęp: 13.03.2020).
- HEJMANOWSKI R. i in. 2013 - Wpływ odwodnienia górotworu węglowego na osiadanie powierzchni terenu, „Przegląd Górniczy”, T. 69, nr.
- HEJMANOWSKI R. WITKOWSKI W. T. 2015 - Suitability assessment of artificial neural network to approximate surface subsidence due to rock mass drainage, *Journal of Sustainable Mining*, doi: 10.1016/j.jsm.2015.08.014.
- HERRERA G. i in. 2010 - Analysis of subsidence using TerraSAR-X data: Murcia case study, *Engineering Geology*, doi: 10.1016/j.enggeo.2010.09.010.
- HOFFMANN J. i in. 2001 - Seasonal subsidence i rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry, *Water Resources Research*, 37(6), s. 1551–1566. doi: 10.1029/2000WR900404.
- HOFFMANN J., GALLOWAY, D. L., ZEBKER H. A. 2003 - Inverse modeling of interbed storage parameters using li subsidence observations, Antelope Valley, California, *Water Resources Research*, doi: 10.1029/2001WR001252.
- HONGDONG F. i in. 2011 - Li subsidence monitoring by D-InSAR technique, *Mining Science i Technology*. China University of Mining i Technology, 21(6), s. 869–872. doi: 10.1016/j.mstc.2011.05.030.
- HOOPER A. i in. 2012 - Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation, *Tectonophysics*. Elsevier, s. 1–13. doi: 10.1016/j.tecto.2011.10.013.
- HOOPER A. J. 2008 - A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer i small baseline approaches, *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2008GL034654.
- HU B., CHEN X., ZHANG X. 2019 - Using multisensor SAR datasets to monitor li subsidence in Los Angeles from 2003 to 2017, *Journal of Sensors*, doi: 10.1155/2019/9389820.
- JAFARI F. i in. 2016 - Numerical simulation of groundwater flow i aquifer-system compaction using simulation i InSAR technique: Saveh basin, Iran, *Environmental Earth Sciences*, doi: 10.1007/s12665-016-5654-x.
- JIANG L. i in. 2018 - Combining InSAR i Hydraulic Head Measurements to Estimate Aquifer Parameters i Storage Variations of Confined Aquifer System in Cangzhou, North China Plain, *Water Resources Research*, doi: 10.1029/2017WR022126.
- JONES C. E. i in. 2016 - Anthropogenic i geologic influences on subsidence in the vicinity of New Orleans, Louisiana, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, doi: 10.1002/2015JB012636.
- KOPEĆ A., KWINTA A. 2019 - Osiadanie powierzchni terenu z tytułu szczyrywania wody - wyznaczenie technikami InSAR, „Przegląd Górniczy”, T. 75, nr 1.
- KOWALSKI A. 2020 - Deformacje powierzchni na terenach górniczych kopalń węgla kamiennego. Główny Instytut Górnictwa. Katowice.
- MAHMOUDPOUR M. i in. 2013 - Characterization of regional li subsidence induced by groundwater withdrawals in Tehran, Iran, *JGeope*, doi: 10.22059/JGEOPE.2013.36014.
- Maps** – UNESCO Li Subsidence International Initiative - 2020. Dostęp: <https://www.lisubsidence-unesco.org/maps/> (Ostatni dostęp: 2.06.2020).
- MASSONNET D., FEIGL K. L. 1998 - Radar interferometry and its application to changes in the earths surface, *Reviews of Geophysics*. Blackwell Publishing Ltd, 36(4), s. 441–500. doi: 10.1029/97RG03139.
- MEHRABI H. i in. 2019 - Three-dimensional displacement fields from insar through tikhonov regularization i least-squares variance component estimation, *Journal of Surveying Engineering*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 145(4). doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000289.
- MORA O., MALLORQUI J. J., BROQUETAS A. 2003 - Linear i nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience i Remote Sensing*, 41(10 PART I), s. 2243–2253. doi: 10.1109/TGRS.2003.814657.
- MORISHITA Y. i in. 2020 - LICSBAS: An open-source insar time series analysis package integrated with the LICSBAS automated sentinel-1 InSAR processor, *Remote Sensing*. MDPI, 12(3), p. 424. doi: 10.3390/rs12030424.
- ORTEGA-GUERRERO A., RUDOLPH D. L., CHERRY J. A. 1999 - Analysis of long-term li subsidence near Mexico City: Field investigations i predictive modeling, *Water Resources Research*. John Wiley & Sons, Ltd, 35(11), s. 3327–3341. doi: 10.1029/1999WR900148.
- PIROUZI A., ESLAMI A. 2017 - Ground subsidence in plains around Tehran: site survey, records compilation i analysis, *International Journal of Geo-Engineering*, doi: 10.1186/s40703-017-0069-4.
- REZAEI A., MOUSAVI Z. 2019 - Characterization of li deformation, hydraulic head, i aquifer properties of the Gorgan confined aquifer, Iran, in InSAR observations, *Journal of Hydrology*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124196.
- SAMIEIE-ESFAHANY S. i in. 2010 - On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates, *Proceedings of Fringe 2009 Workshop*, 2009(March), s. 1–7. Dostęp: https://www.researchgate.net/publication/259609665_ON_THE_EFFECT_OF_HORIZONTAL_DEFORMATION_ON_INSAR_SUBSIDENCE_ESTIMATES (Ostatni dostęp: 22.03.2020).

- SCHMIDT D. A., BÜRGMANN R. 2003 - Time-dependent li uplift i subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. American Geophysical Union (AGU), 108(B9). doi: 10.1029/2002jb002267.
- SHI X. Q. i in. 2007 - Characterization of li subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China, *Environmental Geology*. Springer, 52(1), s. 27–40. doi: 10.1007/s00254-006-0446-3.
- SZCZEPIŃSKI J. 2019 - The significance of groundwater flow modeling study for simulation of opencast mine dewatering, flooding, i the environmental impact, *Water*. doi: 10.3390/w11040848.
- TEATINI P. i in. 2006 - Groundwater pumping i li subsidence in the Emilia-Romagna coastli, Italy: Modeling the past occurrence i the future trend, *Water Resources Research*. John Wiley & Sons, Ltd, 42(1). doi: 10.1029/2005WR004242.
- THOANG T. T., GIAO P. H. 2015 - Subsurface characterization i prediction of li subsidence for HCM City, Vietnam, *Engineering Geology*. doi: 10.1016/j.enggeo.2015.10.009.
- TOMAS R. i in. 2011 - Persistent Scatterer Interferometry subsidence data exploitation using spatial tools: The Vega Media of the Segura River Basin case study, *Journal of Hydrology*. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.01.057.
- University C. for I. E. S. I. N.-C.-C. 2018 - Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 11. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data i Applications Center (SEDAC). Dostęp: <https://doi.org/10.7927/H49C6VHW>.
- WEISSENBERGER S., CHOUINARD O. 2015 - Adaptation to Climate Change i Sea Level Rise. doi: 10.1007/978-94-017-9888-4.
- WERNER C. i in. 2003 - Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping, w *International Geoscience i Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, s. 4362–4364. doi: 10.1109/igarss.2003.1295516.
- WHITTAKER B. N., REDDISH D. J. 1989 - Subsidence: occurrence, prediction, i control. Elsevier.
- YANG Y. i in. 2015 - Research of features related to li subsidence i ground fissure disasters in the Beijing Plain, in *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. doi: 10.5194/piahs-372-239-2015.
- ZEBKER H. A., ROSEN, P. A., HENSLEY, S. 1997 - Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation i topographic maps, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. American Geophysical Union (AGU), 102(B4), s. 7547–7563. doi: 10.1029/96jb03804.
- ZHOU C. i in. 2018 - Spatiotemporal evolution of li subsidence in the Beijing Plain 2003-2015 using persistent scatterer interferometry (PSI) with multi-source SAR data, *Remote Sensing*. doi: 10.3390/rs10040552.
- ZHOU X., CHANG N., BIN, LI S. 2009 - Applications of SAR interferometry in earth i environmental science research, *Sensors*. Molecular Diversity Preservation International, 9(3), s. 1876–1912. doi: 10.3390/s90301876.

Artykuł wpłynął do redakcji –lipiec 2020
Artykuł akceptowano do druku – 18.08.2020