

Modelowanie procesu osiadania terenu górniczego Kopalni Węgla Brunatnego *Bełchatów* – nowe podejście

Michał Palmąka¹



Land subsidence modeling in mining area of open pit Brown Coal Mine *Bełchatów* – a new approach.

Prz. Geol., 59: 245–250.

Abstract. From the beginning of open-pit mining works (i.e. ground massive dewatering, access excavation, cover dumping) in 1976, which were strictly connected with an exposure a brown coal beds on *Bełchatów* field it was noticed, that a land surface subsided in the vicinity of Brown Coal Mine *Bełchatów*. Quantitative land subsidence assessments, which are based on deterministic models (elastic ground model, consolidation model), are not efficient enough to simulate the process – adjusted coefficient of determination amounts $R^2_{kor} = 0.15–0.28$. The alternative approach a quantitative description of the land subsidence, which is presented in the doctoral thesis, is the application of statistical models (multiple regression, neural networks), which are built on ground of collected sampling data in 1976–2005. Among three model types, which were divided according to available variables sets, the most efficient were autocorrelation models ($R^2_{kor} = 0.96–0.97$), which included as a variable the subsidence depth from previous years. To the variables, which have a significant impact on land subsidence progress, belong also the history of ground massive dewatering and the depth of Cenozoic cover. The most significant effects of the land subsidence appear within a one or two years delay towards the dewatering process, which is a relevant indication in the assessment of the consolidation delay. Recorded differences in land subsidence and dewatering semivariogram distances prove the spatial anisotropy of ground massive – on average the distance is twice longer in parallel of latitude direction, which is caused by the structure and geographical location of *Kleszczów Graben*. As the results show, the optimal frequency of land subsidence and decline of water table measurement is about every 2–3 years and the measurement points should be located not farther than 1200 m from one another. The minimum number of observations, which are needed to build an efficient land subsidence model, in a data set is about 200–300. Presented coherent statistical methods enable to compare different types of linear and non-linear land subsidence models and allow applying proposed methodology for modeling subsidence process in another mining areas – included contiguous *Szczerców Brown Coal Field*.

Keywords: *Bełchatów*, GIS, geostatistics, interpolation, linear models, non-linear models, land subsidence, Sammon's mapping, self-organized mapping (SOM), neural networks, multiple linear regression

Wykonywanie od 1976 r. wkopu udostępniającego złożę węgla brunatnego, a następnie blisko 30 lat działalności kopalni spowodowały szereg przemian w środowisku abiotycznym i biotycznym w rejonie *Bełchatowa*. Prowadzenie robót górniczych wymaga wcześniejszego odwodnienia górotworu. Wraz z postępującym obniżeniem zwierciadła wód podziemnych na obszarze pola *Bełchatów* prowadzone były prace górnicze polegające na usunięciu nadkładu, które umożliwiły eksploatację głęboko położonych pokładów węgla brunatnego (od 110 do 280 m p.p.t). Z odwodnieniem związany jest ruch wód podziemnych oraz zmiana stanu naprężenia w górotworze, co inicjuje rozwój różnorodnych procesów geologiczno-inżynierskich. Jednym z obserwowanych zjawisk jest osiadanie terenu w otoczeniu kopalni odkrywkowej, wynikające przede wszystkim ze zmiany stanu naprężeń efektywnej spowodowanej zdjęciem siły wyporu wody na szkielet gruntowy. Na prędkość i wielkość osiadania wpływa także wiele innych czynników, których ilościowy udział w analizowanym zjawisku jest niejednokrotnie trudny do oszacowania (np. zagadnienie odprężenia górotworu). Proces osiadania jest wypadkową oddziaływań wynikających z prowadzonych prac górniczych, takich jak wielkość odwodnienia i przemieszczenia mas gruntu, lecz uwarunkowany jest również podatnością środowiska geologicznego na zmiany wywołane ingerencją górniczą. Złożoność tych procesów powoduje, że czyste deterministyczne modele opisu nie pozwalają

najczęściej na adekwatną ilościową ocenę wielkości osiadań. Z tego względu podjęto próbę zaawansowanej analizy osiadania terenu górniczego Kopalni Węgla Brunatnego *Bełchatów* z wykorzystaniem wieloczynnikowych metod statystycznych i GIS (Palmąka, 2008).

Cele pracy

Prognozowanie i ocena przebiegu osiadań mają kluczowe znaczenie w odpowiednim kształtowaniu i zagospodarowaniu infrastrukturalnym terenu górniczego, a także w późniejszym prowadzeniu prac rekultywacyjnych. Głównym celem badań było utworzenie takiego statystycznego modelu procesu osiadania, aby wygenerowana na jego podstawie prognoza w zadowalający sposób odzwierciedlała obserwowane zjawiska deformacji terenu. Dodatkowo podjęto próbę wskazania tych charakterystyk środowiska geologicznego, które w istotny sposób warunkują wielkość mierzonego osiadania. Wyboru najistotniejszych parametrów dokonano opierając się na wrażliwości utworzonych modeli statystycznych.

Na podstawie udostępnionych przez KWB *Bełchatów* danych z lat 1976–2005 przeprowadzono szereg analiz geostatystycznych, na bazie których wybrano odpowiednie metody interpolacji przestrzennej osiadania terenu, ustalono optymalną częstość wykonywania jego pomiarów oraz określono gęstość siatki pomiarowej. Istotnym elementem

¹Katedra Ochrony Środowiska i Zasobów Naturalnych, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; mpalmaka@yahoo.com.

badań było określenie przestrzennych zależności pomiędzy wartościami analizowanych zmiennych a osiadaniami terenu.

Uwarunkowania geologiczno-górnice w rejonie Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów

Zarówno budowa tektoniczna rejonu Bełchatowa, jak i przemieszczenia w obrębie górotworu z nią związane oraz uwarunkowania hydrogeologiczne występujące na tym terenie odgrywają istotną rolę w przebiegu osiadania. Uskok ograniczający rów Kleszczowa od północy i południa wyznaczają na terenie górniczym KWB Bełchatów istotną barierę, która rzutuje na uzyskiwane charakterystyki procesu. Na terenie górniczym KWB Bełchatów wyróżniono trzy kompleksy wodonośne – czwartorzędowy, trzeciorzędowy (neogen i paleogen) oraz mezozoiczny (kredowy i jurajski) (Jończyk i in., 2005). Dodatkowo na warunki hydrogeologiczne wpływa tektonika podłoża mezozoicznego wraz z rozwiniętymi w obrębie utworów górnojurajskich zjawiskami krasowymi. Istotną rolę w wykształceniu kompleksów wodonośnych odgrywa także występowanie rynien erozyjnych, wypełnionych utworami piaszczysto-zwirowymi.

Innymi znaczącymi uwarunkowaniami wpływającymi na wielkość osiadania są charakterystyki odkształcalności gruntów. Zależą one od budowy geologicznej oraz od zmieniającego się stanu naprężenia w masywie – poczynając od warunków początkowego stanu zawodnienia, poprzez odwodnienie górotworu i późniejszą restytucję poziomu zwierciadła wód podziemnych. Odkształcalność gruntu ulega zmianie w zależności od stanu naprężenia związanego z odwodnieniem lub z przemieszczaniem się mas gruntu. W warunkach górotworu otaczającego kopalnię odkrywkową za miarę odkształcalności przyjmuje się moduł ściśliwości jednoosiowej M_0 . Na podstawie danych literaturowych i badań laboratoryjnych przyjęto, zgodnie z ideą Eurokodu, tzw. parametry wyprowadzone z uwzględnieniem ścieżki obciążenia górotworu (Dobak, 1986; Wojciechowski & Serewko, 1987; Dobak & Dziedzic, 1995).

Zmiany wartości modułu ściśliwości wraz z głębokością w odniesieniu do wyróżnionych 18 kompleksów geologiczno-inżynierskich uwzględnione zostały na dwa sposoby: jako cała wartość modułów w funkcji naprężenia/głębokości (Pots) oraz jako wartość uśredniona modułu ściśliwości w każdym analizowanym profilu geologicznym (Potsr) (ryc. 1). Analiza zmian wartości M_0 wskazuje, że dla potrzeb praktycznych wystarczająca jest dyskretyzacja procedur całkowania/uśredniania na poziomie warstwek obliczeniowych o miąższości 0,5 m. Przy prowadzeniu obliczeń założono, że odkształcenia spowodowane odwodnieniem w istotny sposób rzutują na sumaryczną wartość osiadań tylko w obrębie niezdiagnozowanych osadów kenozoiku.

Zastosowana metodyka

W celu przeprowadzenia analiz statystycznych wytypowano 125 profili geologicznych osiagających strop utworów mezozoicznych oraz 55 profili geologicznych obejmujących wyłącznie osady kenozoiku. Profile, które znalazły

się w obrębie sukcesywnie powiększanej odkrywki, były wyłączane z dalszej analizy. Ocena zmian odkształcalności gruntów o różnej genezie wskazuje, że na potrzeby modelowania statystycznego uzasadniony jest podział profilu na następujące zgeneralizowane grupy utworów: żwiry (Ż), piaski (P), mułki (M), gliny (G), ropy (I), węgle brunatne (WB) i zwietrzliny utworów mezozoicznych (ZW). Każdy profil geologiczny został opisany w postaci tabeli, w której zawarto:

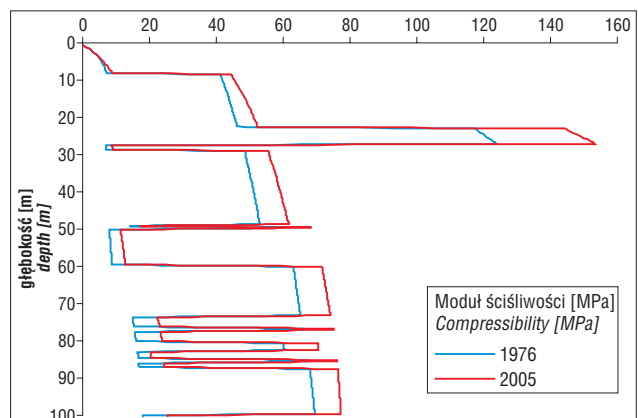
- położenie otworu badawczego (współrzędne w układzie kartograficznym 1965),
- miąższość poszczególnych warstw gruntu,
- sumaryczną miąższość utworów kenozoiku (MK),
- procentowy udział zgeneralizowanych grup utworów w każdym analizowanym profilu,
- głębokość zalegania zwierciadła wód podziemnych.

Dla każdego analizowanego profilu obliczono wartości scałkowanych/uśrednionych miar odkształcalności (Pots, Potsr) w latach 1976–2005, uwzględniając ich zmiany wynikające z obniżenia zwierciadła wód podziemnych w rejonie Bełchatowa.

Ze względu na dostępność danych oraz zależności fizyczne przyjęto, że zmiennymi objaśniającymi przebieg osiadania (Os) w tworzonych modelach mogą być m.in.: depresja zwierciadła wody podziemnej traktowana jako miara odwodnienia (Od), miąższość nadkładu kenozoicznego (MK), procentowy udział wyróżnionych rodzajów gruntu w profilu (Ż, P, M, G, I, WB, ZW), wartości miar odkształcalności (Pots, Potsr). Łącznie wyróżniono 14 zmiennych objaśniających przebieg osiadania (Os), które rozpatrywano w zestawieniach uwzględniających aktualny stan naprężenia i odkształcalności odwadnianego górotworu oraz wybrane parametry z lat poprzedzających, co pozwoliło na testowanie ich opóźnionego wpływu na przebieg osiadań.

Analiza zestawień zmiennych objaśniających w zależności od rozpatrywanego czasu pozwoliła na wyróżnienie 3 typów modeli (tab. 1):

- typ I, w którym wszystkie zmienne odnoszone są do stanu w aktualnie rozpatrywanym dla danej analizy czasie (określane jako tzw. bieżące);



Ryc. 1. Zmiana modułu ściśliwości w funkcji głębokości i odwodnienia w latach 1976–2005 na przykładzie otworu 66/14

Fig. 1. Compressibility change in depth and dewatering function between years 1976–2005 (borehole 66/14 example)

Tab. 1. Klasyfikacja modeli osiadania terenu w zależności od wykorzystanych zmiennych
 Table 1. Classification of land subsidence models according to adopted variables

Model osiadania terenu wokół KWB „Bełchatów” Land subsidence model in mining area of open pit Brown Coal Mine “Bełchatów”					
Typ modelu Model type	Zmienne objaśniające Independent variables				Zmienna objaśniana Dependent variable
	Zmienne niezależne od czasu Time independent variables	Zmienne zależne od czasu Time dependent variables			
		Zmienne aktualne (t0) Present variables	Zmienne z lat poprzedzających (t1-t24) Variables from previous years		
Typ I / Type I					Os
Typ II / Type II	Ż, P, G, I, M, WB, Z, MK	Od, Pots, Potsr, N15, Odw, P15	Od, Pots, Potsr, N15, Odw, P15		
Typ III / Type III					

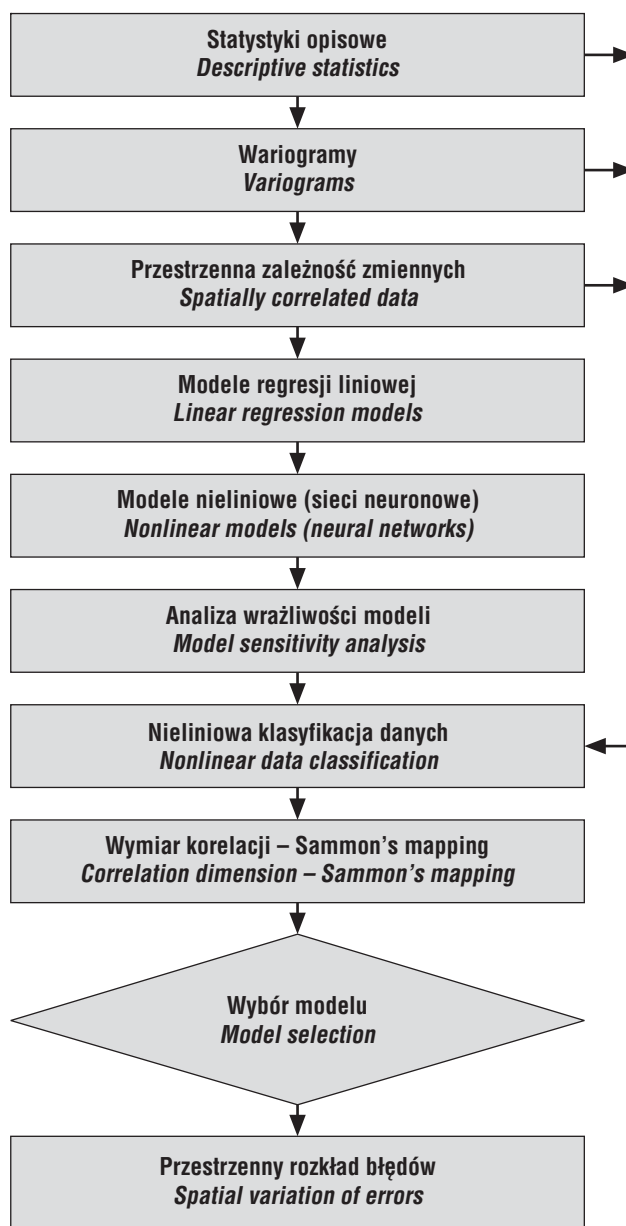
zestaw zmiennych wykorzystanych w budowie modelu danego typu
 set of variables adopted for each type of land subsidence model

- typ II, w którym uwzględnione są charakterystyki odwodnienia (Od_{ix}) i odkształcalności górotworu ($Pots_{ix}$, $Potsr_{ix}$) z lat poprzedzających, a pozostałe zmienne odnoszą się do rozpatrywanego (bieżącego) czasu;
- typ III, w którym z lat poprzedzających uwzględnia się nie tylko charakterystyki odwodnienia (Od_{ix}) i odkształcalności górotworu ($Pots_{ix}$, $Potsr_{ix}$), ale także wartości osiadania (Os_{ix}). Z uwagi na strukturę prowadzonych analiz modele te zaliczamy do tzw. autokorelacyjnych. Pozostałe zmienne odnoszą się do rozpatrywanego (bieżącego) czasu.

W badaniach zastosowano szereg różnorodnych analiz statystycznych zgodnie z przedstawioną na schemacie ścieżką metodyczną (ryc. 2), co pozwoliło na:

- przeanalizowanie zbiorów obliczeniowych pod względem występowania przypadków ekstremalnych (interpretacja statystyk opisowych, testowanie rozkładu zmiennych);
- zbadanie zależności liniowych pomiędzy zmiennymi (korelacje);
- ocenę zależności przestrzennych między zmiennymi (analiza wariogramów oraz skupień i entropii na mapach Woronoja) (Schafmeister, 1999);
- utworzenie modeli osiadania (wielorakie regresje liniowe, sieci neuronowe) (Piegorsch & Bailer, 2005; Tadeusiewicz, 1993);
- nieliniową analizę skupień zmiennych (sieci Kohonena, *Sammon's mapping*) (Kohonen, 1982; Grassberger & Procaccia, 1983);
- dokonanie wyboru najlepszego modelu osiadania według przyjętych kryteriów (analiza wrażliwości) oraz analizę przestrzennego rozkładu różnic pomiędzy wartościami obserwowanymi a wartościami prognozowanymi (rozkład błędów) osiadania terenu górniczego KWB *Bełchatów* w celu wytypowania ewentualnych obszarów anomalnych.

Ze względu na przestrzenny charakter rozpatrywanego procesu osiadania oraz czynników, które go indukują, kluczową rolę przy tworzeniu modelu odgrywał system informacji geograficznej (GIS), który służył do gromadzenia i przetwarzania danych z terenu górniczego KWB *Bełchatów*, jak również do weryfikacji prognoz osiadania na tym obszarze.



Ryc. 2. Schemat metodyczny budowy modelu osiadania w rejonie KWB *Bełchatów*

Fig. 2. Methodological chart of land subsidence model building for Brown Coal Mine *Bełchatow* region

Wyniki badań

Na podstawie analizy wariogramów stwierdzono, że masyw gruntowy rejonu Belchatowa należy traktować jako ośrodek anizotropowy. Różnice odnotowane w zasięgu wariogramów w wartościach osiadania (Os) i odwodnienia (Od) na ortogonalnych osiach oraz wartości efektu samorodka, tzn. lokalnej zmienności, jaka występuje między wartościami w punktach położonych w odległości mniejszej niż krok wariogramu, są średnio 2–3 razy większe na linii równoleżnikowej niż na południkowej. Związane jest to z budową geologiczną rowu Kleszczowa, która w znaczący sposób wpływa na ukierunkowany przebieg osiadania terenu górniczego KWB *Belchatów*.

Jednocześnie odnotowano, że najlepszą metodą przestrzennej interpolacji wartości osiadania (Os), odwodnienia (Od) i zagregowanej miary odkształcalności górotworu (Pots) jest kriging zwyczajny z zastosowaniem sferycznego modelu wariogramu empirycznego. Uwzględniając zasięg oddziaływania wariogramów empirycznych odnotowano, że w celu efektywnej przestrzennej interpolacji wartości osiadania profile obserwacyjne (rozumiane jako profile geologiczne, do których przypisuje się zmienne zależne od czasu) powinny być położone w odległości nie większej niż 1200 m od siebie. Na podstawie analizy skupień i entropii na mapach Woronoja oraz nieliniowej klasyfikacji danych stwierdzono, że zmienne (Os, Od, Pots) w obszarze badań mają charakter jednorodny, tzn. nie wyodrębniono powtarzających się miejsc o wartościach anomalnych lub stref zmienności, które stanowiłyby podstawę do utworzenia zindywidualizowanych przestrzennie wydziałów.

Wykorzystanie w badaniach liniowych (regresje wielorakie) i nieliniowych (sieci neuronowe – perceptrony wielowarstwowe) modeli kinematycznych, tzn. modeli bazujących na zależności matematycznej pomiędzy charakterystykami wymuszeń (zmienne objaśniające) a pomiarami skutków (zmienna objaśniana) (Wolski, 1996), było możliwe dzięki dużej liczbie zgromadzonych danych pomiarowych. Liczba punktów, którym przypisano w rozpatrywanym okresie obserwacji odpowiednie charakterystyki zmiennych objaśniających i objaśnianych (osiadań), wynosiła od

356 do 1207. Z uwagi na postęp procesu odwodnienia i osiadania zmieniał się w kolejnych latach zasięg przestrzenny terenu objętego analizami, jak również liczba rozpatrywanych punktów. Stanowiło to istotny metodycznie czynnik utrudniający interpretację niektórych wyników. W celu dodatkowego zbadania efektywności utworzonych modeli osiadania każdorazowo ze zbioru obliczeniowego wyłączano ok. 10% punktów pomiarowych, traktując je jako podzbiór testowy, z którym porównywano otrzymane wartości osiadań. Najlepsze rezultaty prognozowania osiadania otrzymano przy zastosowaniu modeli typu III (tab. 2). W modelu bazującym na zmiennych objaśniających, mierzonych w okresach rocznych, wartość skorygowanego współczynnika dopasowania wynosi $R^2_{kor} = 0,96–0,97$ (ryc. 3), a standardowy błąd szacowania rocznego osiadania wynosi średnio $S_e = \pm 9,5$ mm (1).

Do efektywnych modeli osiadania $R^2_{kor} = 0,91–0,92$ zaliczono również autoregresje wielorakie i sieci neuronowe utworzone na podstawie zmiennych mierzonych w cyklach 6-letnich z okresu 1976–2005 (ryc. 4). Estymacja 6-letniego osiadania obarczona jest błędem standardowym w wysokości $S_e = \pm 23$ mm (2).

Dla modeli typu II osiągnięto podobne wyniki modelowania za pomocą regresji liniowych i sieci neuronowych (tab. 2). Skorygowane współczynniki dopasowania modelu pozostają na poziomie $R^2_{kor} \approx 0,67–0,73$ (modele średnio efektywne), a standardowy błąd szacowania odkształceń pionowych waha się na poziomie $\pm 25–42$ mm dla danych z okresu 1976–2005. Maksymalny błąd w najlepszym modelu typu II wynosi 65 mm.

Na podstawie modeli typu I prognozowanie osiadania terenu jest mało skuteczne, ponieważ wartość skorygowanego współczynnika dopasowania mieści się w przedziale $R^2_{kor} = 0,49–0,61$ (błąd standardowy estymacji $\pm 61–72$ mm), przy czym lepsze wyniki modelowania osiągnięto przy wykorzystaniu sieci neuronowych. Wartość maksymalna błędów szacowania osiadania dla modeli typu I wynosi 120 mm.

Po przeanalizowaniu zależności (ryc. 5) pomiędzy osiadaniami aktualnymi (Os) a osiadaniami występującymi w latach poprzednich (Os_m) stwierdzono, że zmiana wartości

Tab. 2. Porównanie wartości skorygowanych współczynników dopasowania dla najlepszych modeli osiadania spośród 3 ich typów

Table 2. Adjusted coefficient of determination comparison for the best land subsidence models among 3 their types

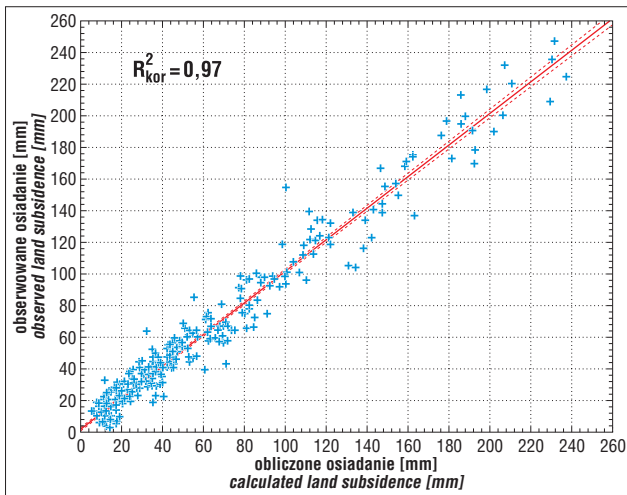
Typ modelu <i>Model type</i>	Obserwacje roczne <i>Annual observations</i>		Obserwacje 6-letnie <i>6-year observations</i>	
	Regresja liniowa <i>Linear regression</i>	Sieci neuronowe <i>Neural networks</i>	Regresja liniowa <i>Linear regression</i>	Sieci neuronowe <i>Neural networks</i>
Typ I / <i>Type I</i>	0,504	0,614	0,493	0,573
Typ II / <i>Type II</i>	0,684	0,728	0,710	0,670
Typ III / <i>Type III</i>	0,959	0,967	0,909	0,916

$R^2_{kor} \geq 0,9$
$0,9 > R^2_{kor} \geq 0,6$
$R^2_{kor} < 0,6$

efektywne modele osiadania / *efficient land subsidence models*

średnio efektywne modele osiadania / *medium-efficient land subsidence models*

nieefektywne modele osiadania / *inefficient land subsidence models*



Ryc. 3. Efektywność modeli osiadania typu III – na podstawie rocznych obserwacji

Fig. 3. Efficiency of type III land subsidence models – annual observations

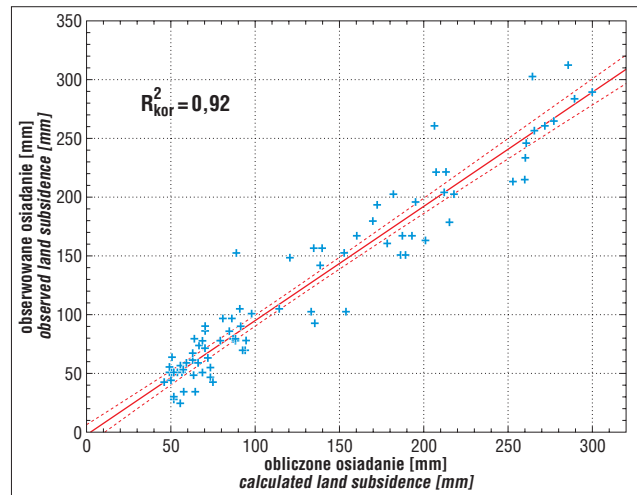
$$Os = \begin{bmatrix} 1,14Os_{t1} + 0,024MK \\ (\pm 0,01)(\pm 0,003) \end{bmatrix} \pm S_{\varepsilon} \quad (1)$$

współczynnika korelacji Pearsona charakteryzuje się liniowym spadkiem w horyzoncie czasowym obejmującym 5 lat. Jeśli wziąć pod uwagę autokorelację pomiędzy Os_{tX} - Os_t , wydaje się zasadne zalecenie, aby częstość wykonywania pomiarów osiadania terenu górniczego KWB *Bełchatów* nie była rzadsza niż raz na 2–3 lata, kiedy to współczynnik korelacji pomiędzy zmiennymi wynosi $r = 0,91$ – $0,95$. Na podstawie gromadzonych z taką częstością danych dotyczących odkształceń pionowych terenu możliwe jest statystycznie istotne wzbogacenie bazy danych na potrzeby rozwijania kinematycznych modeli osiadania.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy umożliwiły przestrzenne i ilościowe scharakteryzowanie procesu osiadania terenu górniczego KWB *Bełchatów*. Spośród przetestowanych równań regresyjnych i sieci neuronowych najlepsze prognozy procesu osiadania (Os) otrzymano dzięki zastosowaniu modeli, w których jako zmienna objaśniająca występuje wartość pionowego odkształcenia powierzchni terenu odnotowana w latach poprzedzających prognozę (Os_{t1}) – tzw. modele autokorelacyjne (typ III). Uwzględnienie wstecznej analizy trendu osiadania powoduje wzrost skuteczności prognozy do poziomu $R^2_{kor} = 0,97$. Dotychczasowe wyniki przewidywania osiadań otrzymywane przy zastosowaniu modeli deterministyczno-fizycznych (model sprężysty, model sprężysto-filtracyjny) nie dawały zadowalających rezultatów. Wartość skorygowanego współczynnika dopasowania dla tego typu modeli jest niska i kształtuje się w zakresie $R^2_{kor} = 0,15$ – $0,28$.

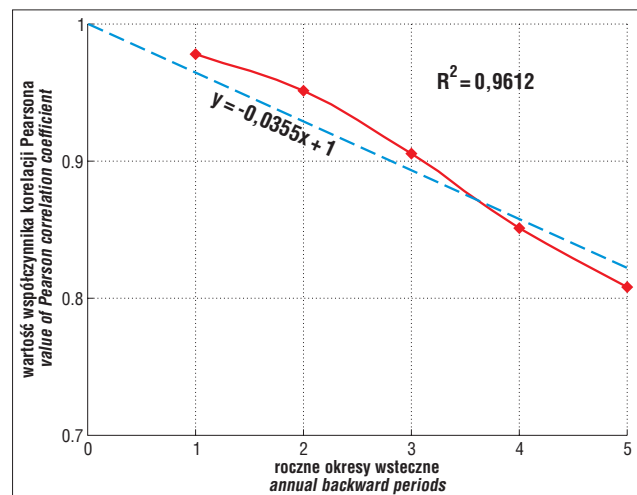
Po uwzględnieniu wpływu zmiennych niezależnych na wariancję objaśnianą regresją liniową oraz częstość występowania poszczególnych zmiennych objaśniających w sieciach, stwierdzono, że w prognozowaniu osiadania terenu górniczego KWB *Bełchatów* największą rolę odgrywają:



Ryc. 4. Efektywność modeli osiadania typu III – na podstawie obserwacji 6-letnich

Fig. 4. Efficiency of type III land subsidence models – 6-year observations

$$Os = \begin{bmatrix} -0,162MK + 0,75Od_{t6} + 0,79Os_{t6} + 22,2 \\ (\pm 0,053)(\pm 0,14)(\pm 0,04)(\pm 5,9) \end{bmatrix} \pm S_{\varepsilon} \quad (2)$$



Ryc. 5. Zmiana wartości współczynnika korelacji pomiędzy aktualnym osiadaniem (Os) a wartościami osiadania w rocznych okresach wstecznych (Os_{tX})

Fig. 5. Change of correlation coefficient value between present land subsidence (Os) and a land subsidence in previous annual periods (Os_{tX})

- osiadanie z okresów poprzedzających Os_{tX} (Os_{t1} – do 95%, Os_{t6} – do 89%);
- aktualne odwodnienie (Od – do 61%);
- odwodnienie z okresów poprzedzających Od_{tX} (Od_{t2} – do 75%, Od_{t6} – do 56%);
- procentowy udział węgla brunatnego w profilu (WB – do 8%).

Podane powyżej wartości procentowe określają maksymalny wpływ zmiennej niezależnej na wartość osiadania w równaniach regresyjnych/sieciach neuronowych.

Zastosowane metody statystyczne pozwoliły uszczegółowić zalecenia dotyczące zakresu monitoringu, który może służyć polepszeniu efektywności prognozowania osiadania:

- liczebność zbioru powinna obejmować nie mniej niż 200–300 punktów obserwacyjnych;
- pomiary osiadania powinny być prowadzone nie rzadziej niż raz na 2–3 lata, przy założeniu przeciętnej prędkości osiadań rzędu 7 mm/rok.;
- punkty pomiarowe nie powinny być położone dalej niż 1200 m od siebie.

Maksymalna wartość liniowego współczynnika korelacji Pearsona ($r = 0,75$) pomiędzy zmiennymi – osiadaniami (O_s) i odwodnieniem w latach poprzedzających ($O_{d,x}$) – została odnotowana po dwóch latach od przeprowadzenia odwodnienia ($O_{d,2}$). Na tej podstawie można wnioskować, że najbardziej znaczące efekty procesu osiadania występują z 2-letnim opóźnieniem w stosunku do wymuszającego go odwodnienia, co stanowi istotną wskazówkę podczas oceny tempa konsolidacji.

Opracowane liniowe i nieliniowe modele osiadania są specyficzne dla terenu górniczego KWB *Belchatów* i odzwierciedlają przebieg odkształceń pionowych terenu na tym obszarze. Jeżeli wziąć pod uwagę zarówno sąsiedztwo złoża węgla brunatnego na polu Szczerców, które jest w trakcie udostępniania, i wynikające z tego faktu podobne uwarunkowania geologiczne, jak również możliwość łatwego adaptowania sieci neuronowych do nowych danych poprzez przeprowadzenie procesu „douczenia” lub korekty zmiennych objaśniających w równaniach regresji, istnieje możliwość zastosowania wypracowanych w pracy modeli osiadania do prognoz deformacji terenu w rejonie nowo udostępnianego wyrobiska. Szczególnie przydatne mogą okazać się przytoczone powyżej wnioski dotyczące sieci monitoringowej w odniesieniu do lokalizacji profili obserwacyjnych służących do obliczeń modelowych.

Utworzenie modeli na potrzeby prognoz osiadania w innych rejonach górnictwa odkrywkowego objętych odwodnieniem wymaga weryfikacji danych poprzez zastosowanie wskazanej w pracy metodyki statystycznej. Modele osiadania powinny być formułowane na podstawie:

- rzeczywistego przebiegu lub programu odwodnienia terenu górniczego;
- budowy geologicznej masywu gruntowego, a w szczególności występowania gruntów o znacznej odkształcalności (organogenicznych i spoistych);

- wyników monitoringu osiadania, którego częstość powinna być dostosowana do prędkości procesu – po zainicjowaniu osiadań wskazane są pomiary raz na 6 miesięcy, a w późniejszych okresach, przy ustalonym przebiegu deformacji powierzchni terenu, nie rzadziej niż raz na 3 lata.

Zastosowane metody tworzenia i optymalizacji liniowych i nieliniowych modeli osiadania mają charakter uniwersalny z uwagi na przyjęte metody analityczne i mogą być stosowane przy opracowywaniu prognoz osiadania w rejonach objętych wielkoobszarowym odwodnieniem.

Literatura

- DOBĄK P. 1986 – Zmiany odkształcalności gruntów wywołane procesami inżyniersko-geologicznymi w rejonie Kopalni Węgla Brunatnego *Belchatów*. Rozprawa doktorska. Wydział Geologii UW, Warszawa.
- DOBĄK P. & DZIEDZIC A. 1995 – Metodyka oceny parametrów konsolidacji w warunkach odwadniania masywu gruntowego. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego nr 9 S602 023 04, Warszawa.
- GRASSBERGER P. & PROCACCIA I. 1983 – Measuring the strangeness of strange attractors. *Physica D*, 9: 189–208.
- JONCZYK M.W., STACHOWICZ Z. & SZCZECIŃSKI J. 2005 – Dynamika rozwoju leja depresyjnego BOT KWB *Belchatów* SA w następstwie eksploatacji systemu odwodnienia węglębnego. Pr. Nauk. Inst. Gór. Politech. Wrocław, Konf., 112: 289–298.
- KOHONEN T. 1982 – Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biol. Cybernetics*, 43: 59–69.
- PALMAKA M. 2008 – Modelowanie procesu osiadania terenu górniczego KWB *Belchatów* z wykorzystaniem analiz wieloczynnikowych i GIS. Rozprawa doktorska. Wydział Geologii UW, Warszawa.
- PIEGORSCH W.W. & BAILER A.J. 2005 – Analyzing Environmental Data. John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England.
- SCHAFMEISTER M.-T. 1999 – Geostatistik für die hydrogeologische Praxis. Springer, Berlin.
- TADEUSIEWICZ R. 1993 – Sieci neuronowe. Wydanie 2. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM, Warszawa.
- WOJCIECHOWSKI J. & SEREWKO K. 1987 – Wytyczne prognozowania osiadań i odkształceń terenu oraz zabezpieczeń obiektów przeciw szkodom górniczym w zasięgu leja depresji KWB *Belchatów*. Centralny Ośrodek Badawczo-Projektowy Górnictwa Odkrywkowego Poltegor, Wrocław.
- WOLSKI B. 1996 – Geodezyjna identyfikacja procesu deformacji podłoża gruntowego. Monografia 201, Seria Inżynieria Sanitarna i Wodna. Politechnika Krakowska, Kraków.

Praca wpłynęła do redakcji 2.12.2009 r.
Po recenzji akceptowano do druku 17.09.2010 r.