

Porównanie wyników badania zagęszczenia gleby uprawnej metodą penetrometryczną i georadarową

Streszczenie. W artykule dokonano analizy wykorzystania georadaru do identyfikacji anomalii zagęszczenia antropogenicznego gruntu w jego profilu do głębokości 1 m. Do badań wykorzystano antenę o częstotliwości 800 MHz, które przeprowadzono metodą profilowania refleksyjnego polegającego na tym, że obie anteny przesuwano się równocześnie wzdłuż ścieżek pomiarowych i prostopadle do analizowanego profilu glebowego. Równolegle do metody georadarowej użyto metody penetrometrycznej, której wyniki stanowiły punkt odniesienia dla otrzymanego w czasie badań georadarowych echogramu. Porównanie wyników badań daje zadowalające wyniki, które uzasadniają przeprowadzenie szczegółowych badań dotyczących parametryzacji metody georadarowej w odniesieniu do metody penetrometrycznej.

Abstract. The article analyzes the use of the georadar to identify anomalies of anthropogenic soil density in its profile on a depth of 1 m. An 800 MHz receiver was used for the research. The study was carried out by reflective profiling. It consists in the fact that both receivers move simultaneously along the measuring paths and perpendicular to the analyzed soil profile. Parallel to the georadar method, the penetrometric method was used. The results of this second method were a reference point for the echogram obtained during the georadar studies. The comparison of the test results gave satisfactory results that justify the detailed research on the parameterization of the georadar method with respect to the penetrometric method. (The comparison of the results of the examination of cultivated soil thickening by means of penetration and georadar methods).

Słowa kluczowe: georadar, penetrometr, zagęszczenie gleby, echogram, eksploatacja

Keywords: georadar, penetrometer, soil compactness, echogram, exploitation

Wstęp

Identyfikacja anomalii w profilu glebowym w warunkach produkcyjnych pomimo wielu zaawansowanych metod pomiarowych nadal stanowi wyzwanie dla naukowców. Szczególnie dotyczy to nieinwazyjnych metod, które mogą być stosowane bez względu na stopień rozwoju roślin, również te wykonywane ze statków powietrznych. Wyodrębnienie obszarów na powierzchni pola jest bardzo złożone i wymaga zaawansowanych środków technicznych potrafiących realizować swoje funkcje w czasie rzeczywistym. Uwzględnić należy wiele czynników a dużym wyzwaniem jest jak największe uproszczenie wyznaczania granic tych obszarów na podstawie jednego czynnika i określenie jego korelacji ze zmiennością danego parametru produkcyjnego [1]. Niektóre parametry gleby są zmienne w czasie i przestrzeni i uchwycenie tej zmienności metodami tradycyjnymi jest czasochłonne, pracochłonne i kosztowne. Z tego powodu powstało wiele technologicznie zaawansowanych urządzeń, dzięki którym w trybie pomiaru ciągłego (on-the-go) z wykorzystaniem detekcji zbliżeniowej (proximal sensing) można w czasie rzeczywistym pozyskać duże ilości danych w warunkach polowych [2].

Procesy o charakterze przypadkowym są zasadniczo bardziej złożone niż procesy uwarunkowane [3], dlatego należy je traktować z większą uwagą. Bergeijk i in. [4] wykorzystali orkę do zbierania informacji o właściwościach gleby, natomiast Mouazen i in. [5] stosowali głębosz, jako czujnik zagęszczenia, a Sirjacobs i in. [6] zastosowali głębosz, jako narzędzie wzorcowe do mapowania pola. Bajla i in. [7] mierzyli opór penetracji gleby poziomym penetrometrem, konkludując, że zastosowana metoda może być wykorzystana do szybkiego określenia stanu gleby dla celów rolnictwa precyzyjnego oraz do prognozowania oporów roboczych narzędzi stosowanych w rolnictwie. Tóth i in. [8] zastosowali do badania zmienności glebowej nóż mierzący opór poziomy gleby, w kilku punktach profilu glebowego. Obecnie powszechnie stosuje się penetrometry stożkowe do pomiaru parametru zwężności gleby, uwzględniając w konstrukcji stożka penetrometru normę ASAE.

Sam stożek pomiarowy penetrometru był przedmiotem badań w zakresie jego kąta wierzchołkowego i pola podstawy [9]. Walczykova i in. [10] skonstruowali sondę z elektronicznym rejestratorem, a Buliński i in. [11] badali wpływ prędkości ruchu sondy na charakterystykę parametrów oporu gleby. Walczykova i in. [12] przedstawili przestrzenny rozkład zmienności właściwości fizycznych gleby wykorzystując do pozycjonowania mobilny rejestrator kartograficzny, a Drummond i in. [13] wykorzystywali automatyczny penetrometr do mapowania gleby. Metoda georadarowa jest jedną z najbardziej zaawansowanych metod z grupy pomiarów geofizycznych, która znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach, m.in. również w rolnictwie. Jest to nieinwazyjna metoda, której istotą jest emisja i odbiór impulsów elektromagnetycznych do zlokalizowania anomalii strukturalnych pod powierzchnią gruntu, jak również w obiektach budowlanych. Bardziej zaawansowaną odmianą tej metody geofizycznej jest mapowanie georadarowe. Wykonuje się wówczas serie równoległych profilowań, co pozwala na interpolowanie wyników pomiędzy kolejnymi profilami, a sam wynik jest przedstawiany w postaci przejrzystych map na dowolnym poziomie głębokościowym [2].

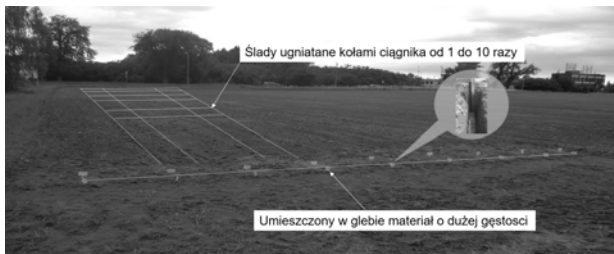
GPR ma ogromne możliwości stosowania w geofizyce ogólnie, a w rolnictwie w szczególności, w tym również we wspieraniu zarządzania zasobami wodnymi. Kompaktowy, przenośny system z cyfrowym pozyskaniem danych umożliwia gromadzenie danych wraz z położeniem geograficznym, jak również włączenie nowoczesnych technik analizy danych [14]. Nieinwazyjność, szybkość, pozyskanie dużej ilości informacji i względnie niskie koszty sprawiają, że georadar jako metoda uzupełniająca techniki konwencjonalne jest stosowany w badaniach gleby rolniczej. Sposób oszacowania właściwości gleby na podstawie danych GPR polega na poszukiwaniu atrybutów sygnału, takich jak amplituda odbitych fal radarowych, faza czy obwiednia, które dostarczają informacji na temat ciągłości oraz/lub nieciągłości odbić w badanej warstwie, geometrii przestrzennych struktur gleby oraz ich charakterystyki. Wartości ww. atrybutów danych GPR

poddaje się geostatystycznej analizie, by znaleźć powiązanie pomiędzy obrazem z radaru, a poszukiwanymi właściwościami gleby (porowatość, gęstość, zawartość wody, tekstura), zmieniającymi się w małej skali w profilu glebowym. W opinii wielu autorów opracowanie danych GPR jest bardzo złożone i wymaga bardzo dobrego wyszkolenia kadry wykonującej pomiary i interpretującej uzyskane wyniki.

Metodyka badań

Badania przeprowadzono na polu doświadczalnym o sztucznie wytworzonych parametrach gęstości gleby, które były adekwatne do założonej kombinacji ugniecenia gleby przez koła ciągnika (rys.1). Na powierzchni pola wyznaczono ścieżki, stanowiące linie pomiarowe (kolor żółty) wzdłuż których prowadzono pomiary penetrometryczne, georadarowe oraz wilgotnościowe w profilu glebowym. Interwał czasowy badań wynosił 5 godzin, co pozwoliło zachować jednorodne warunki wilgotnościowe gleby.

Dodatkowo przeprowadzono doświadczenie polegające na umieszczeniu materiału o znacznie wyższej gęstości na różnych poziomach profilu glebowego.



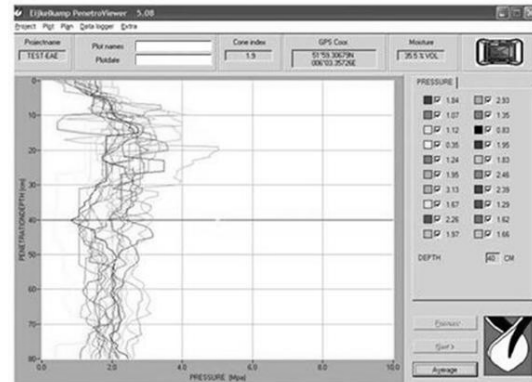
Rys.1. Schemat doświadczenia terenowego

Pomiar zagęszczenia gleby przeprowadzono metodą inwazyjną stosując penetrometr stożkowy (rys. 2), model Penetrologger Eijkelkamp z sondą ThetaProbe zaprojektowany do pomiaru zwięzłości i wilgotności gleby na gruntach uprawnych wg. normy ASAE (obecnie ASABE). Obudowa penetrometru wyposażona była w wewnętrzny odbiornik GPS za pomocą, którego określano i zapisywano współrzędne wykonywanych pomiarów. Głębokość sondowania wynosiła 0,8 m przy rejestracji wartości mierzonej zwięzłości profilu glebowego w odstępach co 0,01 m. Pomiary przeprowadzono wykorzystując stożek o średnicy nominalnej 11,28 mm i kącie rozwarcia 30°.



Rys.2. Penetrometr stożkowy

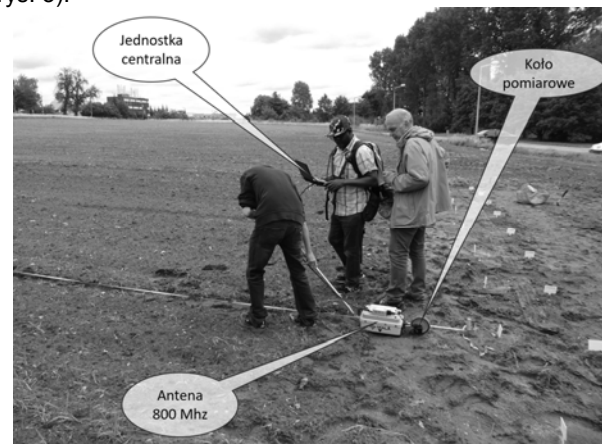
Urządzenie poziomowano przy pomocy zainstalowanej w obudowie poziomicy zachowując w czasie sondowania tolerancję odchylenia sondy od pionu nie przekraczającą 3,5°. Głębokość mierzono czujnikiem ultradźwiękowym współpracującym z płytką referencyjną. Pomiary zwięzłości dokonywano ze średnią prędkością wciskania stożka penetrometru wynoszącą 5 cm·s⁻¹. Analizę graficzną i numeryczną przeprowadzono wykorzystując program Penetro Wiewer (rys. 3)



Rys. 3. Graficzny i numeryczny przebieg zwięzłości gleby przedstawiony za pomocą programu Penetro Wiewer

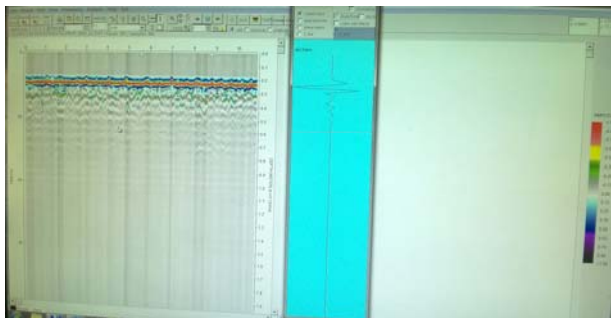
Jako metodę alternatywną zastosowano georadar firmy MALA, który prowadzono w tym samym śladzie co penetrometr stożkowy. Pozwoliło to wyeliminować ograniczenia technik próbkowania penetrometrycznego tworząc trójwymiarowy widok charakterystyki profilu poprzecznego gleby. Prędkość fali elektromagnetycznej (v) i stała dielektryczna (k) są silnie zależne od zawartości wody w glebie (θ), z powodu wysokiej stałej dielektrycznej wody w porównaniu z innymi materiałami (K dla wody = 80, K dla różnych materiałów geologicznych = 5-15 i K dla powietrza = 1), np. względna przenikalność elektryczna mokrego piasku jest ośmiokrotnie większa od względnej przenikalności elektrycznej piasku suchego [15]. W konsekwencji wykonano pomiary wilgotności gleby w przedziałach co 10 cm w głąb badanego profilu gleby.

W badaniach georadarowych wykorzystano metodę profilowania refleksyjnego polegającego na tym, że obie anteny przesuwają się równocześnie wzdłuż ścieżek pomiarowych i prostopadle do analizowanego profilu glebowego, co pozwoliło spolaryzować pole elektryczne równoległe do dłuższej osi anten. Badania przeprowadzono przy użyciu anteny częstotliwości 800 MHz pozwalającej na uzyskanie fali o długości 0,12 m i rozdzielczości 0,03 m (rys. 3).



Rys. 4. Widok georadaru w czasie realizacji pomiaru

Założono, że odcinki rozbiegowe dla pomiaru georadarowego będą stanowić 10% długości odcinka pomiarowego. Wynikiem badań georadaru jest echogram (rys. 5) na którym można zidentyfikować anormalne stany zgęszczenia profilu poprzecznego gleby.



Rys. 5. Przykładowy echogram badania profilu glebowego

Wilgotność objętościową oraz zasolenie gleby mierzono za pomocą sondy TDR (rys. 6). Pomiary wykonano na trzech głębokościach: 0 - 0,1 m, 0,1-0,2 m oraz 0,2 - 0,3 m. Pomiar wilgotności oparty jest tutaj na wykorzystaniu metody reflektometrii czasowej (Time Domain Reflectometry), a ponieważ pręty pomiarowe sondy mają galwaniczny kontakt z glebą, to jednocześnie możliwy jest też pomiar jej przewodności elektrycznej, która ma związek z zasoleniem gleby [16] i pośrednio z teksturą.

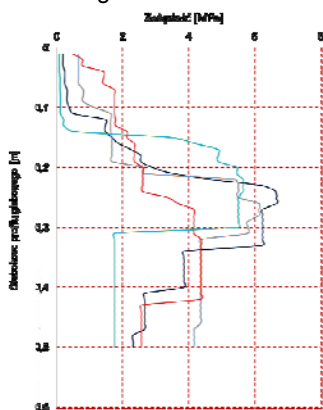


Rys. 6. Pomiar wilgotności gleby w czasie badań

Dokładność pomiaru wilgotności sondy TDR to $\pm 2\%$, zaś zasolenia $\pm 10\%$. Ponadto wykonano pomiary gęstości objętościowej dla trzech głębokości przy użyciu cylinderek objętościowych o objętości 250 cm^3 .

Wyniki badań

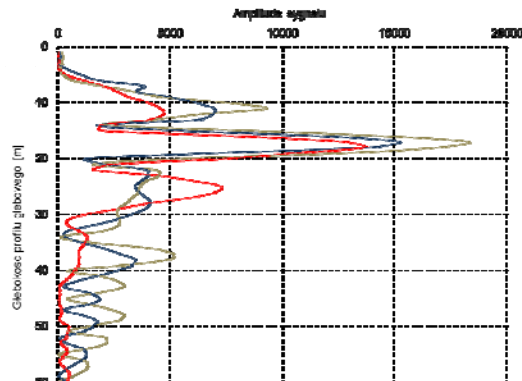
Na rysunku 7 przedstawiono charakterystykę zwięzłości profilu glebowego dla wybranych punktów w obrębie poligonu doświadczalnego.



Rys. 7. Charakterystyki zwięzłości gleby

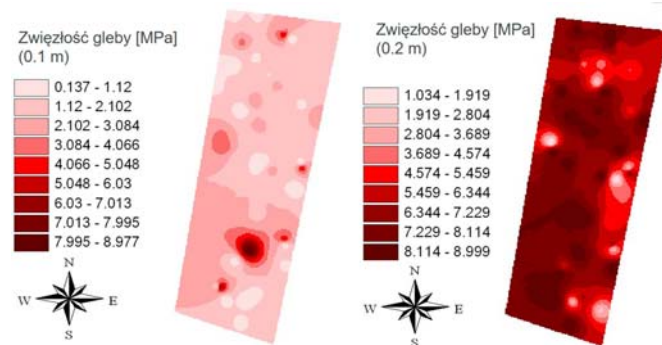
Stwierdzono, że na głębokości ok 0,15 m gwałtownie wzrastała wartość zwięzłości gleby (ok 8 MPa) i stan taki utrzymywał się do głębokości ok 0,3 m a przemieszczając się w głąb profilu zwięzłość gleby malała.

Analizując poszczególne trasy georadarowe, zaobserwowano, że przebieg amplitudy sygnału jest bardzo zbliżony do przebiegu zwięzłości gleby powstałej przy użyciu metody penetrometrycznej. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe charakterystyki zarejestrowanych tras w czasie eksperymentu.

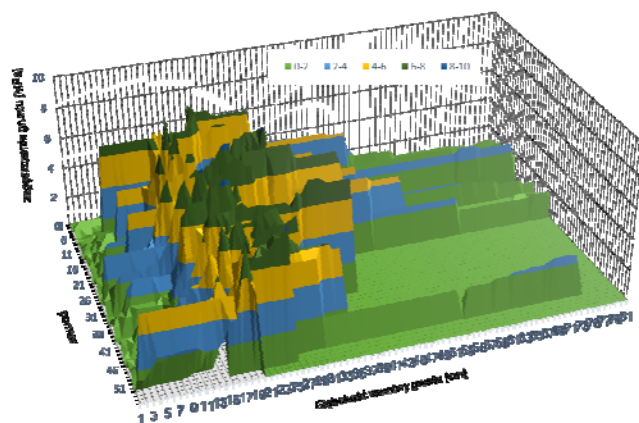


Rys. 8. Charakterystyki amplitudowe tras georadarowych

Na rysunku 9 wizualizowano przestrzenny rozkład zwięzłości gleby w obrębie poligonu doświadczalnego dla istotnych z punktu widzenia doświadczenia głębokości tj. 0,1 m oraz 0,2 m. Stany anormalne mierzonego parametru w ujęciu przestrzennym miały charakter incydentalny i umiejscowione były w kilku, miejscach poligonu zajmując obszarowo niewielkich obszar.



Rys. 9. Przestrzenny rozkład zwięzłości gleby w obrębie poligonu doświadczalnego

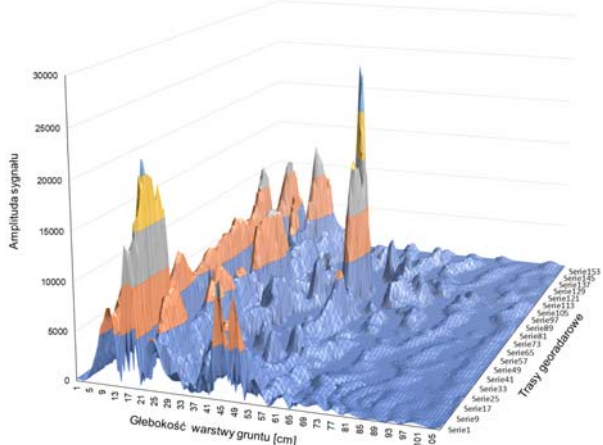


Rys. 10. Wizualizacja zagęszczenia gleby w obrębie jej profilu poprzecznego wykonana penetremetrem stożkowym

Wilgotność objętościowa gleby wynosiła średnio 15,75% natomiast wilgotność wagowa wynosiła średnio 9,41%.

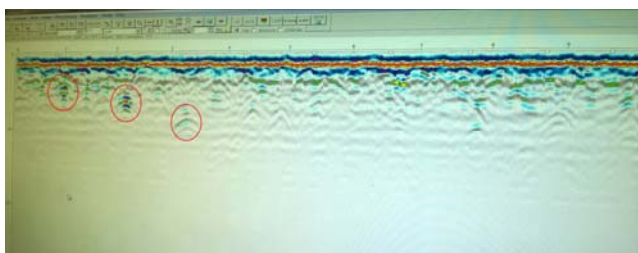
Dokonano wstępnego oszacowania podobieństwa w wartościach zagęszczenia przekroju poprzecznego gleby do głębokości 0,8 m wykonanego penetrometrem stożkowym (rys. 10) oraz echogramu zwizualizowanego przestrzennie przedmiotowego profilu wykonanego anteną o częstotliwości 800 MHz (rys. 11).

Odnotowano znaczne podobieństwo w obrębie identyfikacji anomalii w profilu glebowym między zastosowanymi metodami. W obu przypadkach stwierdzono ją na głębokości między 0,1 m – 0,25 m, co wydaje się uzasadnione biorąc pod uwagę charakterystykę gleby poligonu doświadczalnego.

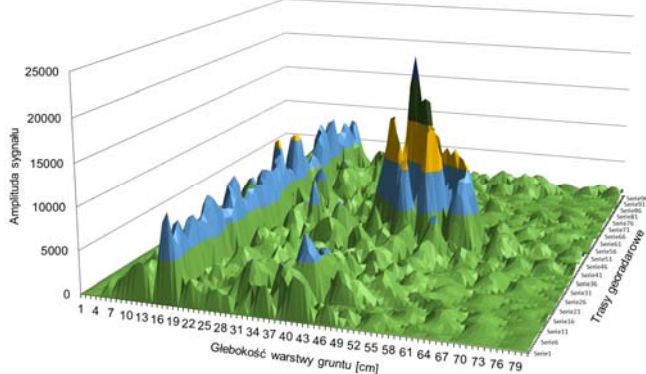


Rys. 11. Wizualizacja zagęszczenia gleby w obrębie jej profilu poprzecznego wykonana metodą georadarową

Na rysunku 12 przedstawiono rzeczywisty echogram z badań gruntu wykonanych dodatkowo gdzie sztucznie zagęszczono grunt na różnych głębokościach. Zaobserwowano istotne zmiany w obrębie sztucznie wprowadzonych anomalii gleby, które przedstawionym na rysunku 12 echogramie zaznaczono czerwonymi obwiedniami.



Rys. 12. Wizualizacja zagęszczenia gleby w obrębie jej profilu poprzecznego wykonana przy pomocy georadaru



Rys. 13. Wizualizacja zagęszczenia gleby w obrębie jej profilu poprzecznego wykonana na podstawie tras georadarowych

Oznacza to, że pomiar zagęszczenia gruntu georadarem daje pozytywne wyniki w relacji z metodą penetrometryczną identyfikując rzeczywiste anomalie w wartości zagęszczenia gruntu. Na rysunku 13 zwizualizowano jeden ze zidentyfikowanych punktów na echogramie na podstawie tras georadarowych i amplitudy sygnału.

Zbieżność wskazań nie oznacza jeszcze relacji funkcyjnej, ale daje nadzieję na stworzenie zastępczej do obecnie stosowanych metod identyfikacji nadmiernego zagęszczenia gleby w jej głębszych warstwach.

Podsumowanie

Zastosowana metoda pomiaru zmienności zagęszczenia gleby przy wykorzystaniu georadaru pozwala na wystarczającą identyfikację anomalii w profilu glebowym ale na tym etapie badań musi być weryfikowana metodami inwazyjnymi. Porównanie obu wykorzystywanych metod dało zadowalające wyniki, które uzasadniają przeprowadzenie szczegółowych badań dotyczących parametryzacji metody georadarowej w odniesieniu do metody penetrometrycznej.

The research was supported by AGH University of Science and Technology as a science project no. 11.11.140.645

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Juliszewski, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: tadeusz.juliszewski@urk.edu.pl, dr hab. inż. Paweł Kielbasa, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: pawel.kielbasa@urk.edu.pl, dr inż. Mirosław Zagórda, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: Miroslaw.Zagorda@urk.edu.pl, dr hab. inż. Sylwia Tomecka-Suchoń, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, e-mail: tomecka@agh.edu.pl, dr inż. Jerzy Karczewski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, e-mail: karcz@agh.edu.pl, Akinsunmade Akinniyi, Nigerian Geological Survey Agency, Abuja, Nigeria

LITERATURA

- [1] Corwin D.L., Lesch S.M. 2010. Delineating site-specific management units with proximal sensors. W: Geostatistical Applications for Precision Agriculture, Oliver M. (Ed.) Springer Science+ Business Media B.V., rozdz. 6, 139-165.
- [2] Maria Walczykova, Paweł Kielbasa, Mirosław Zagórda. 2016. Pozyskanie i wykorzystanie informacji w rolnictwie precyzyjnym. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej – Monografia. ISBN 978-83-64377-03-7.
- [3] Cacko J., Bily M., Bukovec J. 1984. Meranie, vyhodnocovanie a simulacia prevadzkoých nahodných procesov. 1, wyd., Bratislava: Veda, s. 210.
- [4] Bergeijk J., Goense D., Speelman L. 2001. Soil Tillage Resistance as a Tool to map Soil Type Differences. J. Agric. Engng Res. Vol. 79(4). s. 371-387.
- [5] Mouazen A.M., Ramon H., Baerdemaeker J. 2003. Modelling Compaction from On-line Measurement of Soil Properties and Sensor Draught. Precision Agriculture. Vol. 4. s. 203-212.
- [6] Sirjacobs D., Hanquet B., Lebeau F., Destain M.F. 2002. On-line soil mechanical resistance mapping and correlation with soil physical properties for precision agriculture. Soil & Tillage Research. Vol. 64 s. 231-242.
- [7] Bajla J., Walczykova M., Štrba M., Benda I. 2005. Ocena poziomego oporu gleby z wykorzystaniem teorii procesów stochastycznych. Inżynieria Rolnicza. Nr 10(70). s. 13-21.
- [8] Tóth J., Bajla J., Čičo M., Kučera M. 2009. The comparison of soil resistance measurements with horizontal and knife penetrometer. Traktori i pogonske mašine, Vol. 14, No 1. s. 59-63.

- [9] Lejman K., Owsiak Z. 1996. Analiza parametrów stożka penetrometru. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych. Z. 425. s. 121-126.
- [10] Walczykova M., Walczyk J. 1992. Zastosowanie techniki komputerowej w badaniach zwięzłości gleby. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Nr 268. s. 3-12.
- [11] Buliński J. 2006. Możliwości ograniczenia ugniatania gleb kołami pojazdów rolniczych. Postępy Nauk Rolniczych. Nr 4. s. 31-42.
- [12] Walczykova M., Zagórda M. 2005a. Preparation of yield maps in Agro-Map expert program. Proceedings of Int. Conf., Slovak Agricultural University. s. Dudince 2-3. 06.2005.
- [13] Drummond P.E., Christy C.D., Lund E.D. 2000. Using an automated penetrometer and soil EC probe to characterize the rooting zone. s. 8. www.veristech.com/pdf_files.
- [14] Adamchuk V.I., Viscarra Rossel R.A. 2010b. Development of on-the-go proximal soil sensor systems. W: Proximal soil sensing, Progress in soil science. Springer Science+Business Media B.V., 15-28.
- [15] Karczewski J., Ortyl Ł. Pasternak M., 2011. Zarys metody georadarowej, Wydanie drugie poprawione i rozszerzone, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków, Kraków, ISBN 978-83-7464-422-8.
- [16] Malicki M. A., Walczak R. T., Kokot J., Skierucha W. M., Kotliński J., Sobczuk H. A. 1998. Monitoring wilgotności, zasolenia i temperatury gleby. X Szkoła „Fizyka z elementami agrofizyki” na temat „Fizyczne właściwości gleby a rozwój roślin – metody badań” Lublin 22-23 września 1998, s. 33 – 54.