

ZASTOSOWANIE TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ I METODY ANALIZY OBRAZU DO BADANIA STRUKTURY GLEBY ZAGREGOWANEJ

A. Guc, H. Czachor, A. Król

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego, Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

E-mail: aguc@demeter.ipan.lublin.pl, hczachor@demeter.ipan.lublin.pl, akrol@demeter.ipan.lublin.pl

S t r e s z c z e n i e. Artykuł zawiera krótkie omówienie zasady działania tomografii komputerowej. Zwrócono uwagę, że stosując metodę analizy obrazów do pomiarów parametrów geometrycznych agregatów glebowych zawartych w obrazach tomograficznych, konieczne jest określenie zależności między wielkością minimalnego, dającego się parametryzować agregatu, a rozmiarami woksela. Wykonano analizę tomogramów rzeczywistych oraz uzyskanych metodą symulacji komputerowej dla monoagregatowych struktur (agregaty od 1 do 7 mm). Stwierdzono, że warunkiem ilościowej analizy jest aby rozmiar agregatu był przynajmniej 10 razy większy od woksela.

S ł o w a k l u c z o w e: tomografia komputerowa, analiza obrazu, agregaty glebowe, woxsel

WSTĘP

Tomografia komputerowa jest nieniszczącą metodą badania struktury obiektów trójwymiarowych i z tego względu może okazać się idealnym narzędziem do badań struktury gleby. Bazuje ona na zjawisku tłumienia (pochłaniania i rozpraszania) wiązki promieniowania X przy przejściu przez ośrodek materialny, którego współczynnik tłumienia zależy tylko od jego składu chemicznego. Informację o strukturze wzdłuż drogi promieni X uzyskuje się poprzez wyznaczenie funkcji współczynnika tłumienia ośrodka β na podstawie współczynnika osłabienia wiązki k . Wymaga to rozwiązania następującego równania całkowego:

$$\int_0^L \beta(x) dx = -\frac{1}{L} \ln(1/k) = -\frac{1}{L} \ln(E_L/E_0) \quad (1)$$

gdzie: E_L i E_0 - odpowiednio energia wiązki przed i po przejściu przez ośrodek, L - długość drogi promieni X w ośrodku.

Dowód warunków rozwiązalności tego typu równań został podany w 1917 r. przez Radona [9]. Prace nad matematyczną teorią rekonstrukcji obrazów rozpoczął w 1955

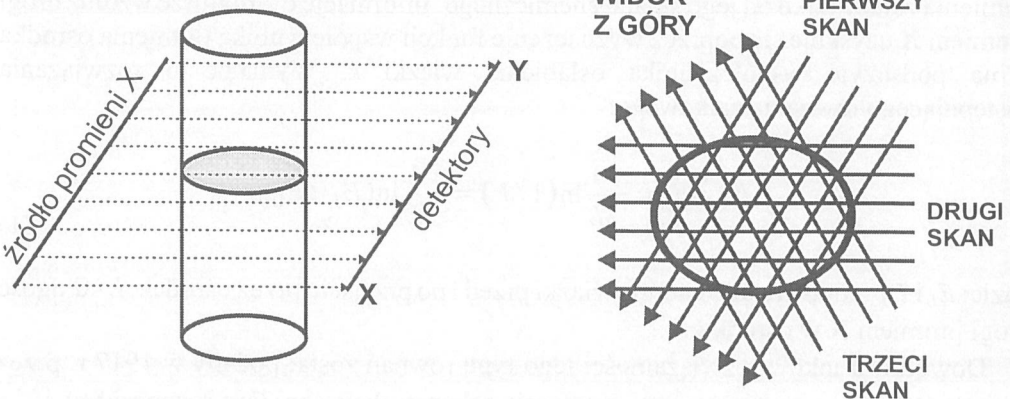
Cormack. Istnieje kilka metod rekonstrukcji, m.in. metody algebraiczne [2,4-7], metoda maksimum entropii (Wernecke and D'Addario [12]) i algorytm filtrowanego wstecznego rzutowania (filtered back projection algorithm) oparty o transformatę Fouriera i opracowany przez Bracewella i Riddle'a [1] oraz (niezależnie) Ramanchandrana i Lakshminarayanana [10]. Shepp i Logan [11] pokazali, że ostatnia z wymienionych metod jest lepsza od pozostałych, w szczególności od metod algebraicznych.

Pierwszy eksperymentalny tomograf zbudował w 1967 r. Godfrey N. Hounsfield, na który otrzymał patent w 1972 [8] na podstawie wniosku złożonego w 1968. W 1972 zaprezentował on tomograf do wykrywania tkanki nowotworowej w żywym mózgu.

Praktyczna realizacja algorytmu polega na wykonaniu wielu kolejnych prześwietleń wzdłuż prostych, znajdujących się na wybranej płaszczyźnie, których kierunek zmienia się stopniowo od 0 do 360° . W efekcie przetworzenia otrzymanych w ten sposób danych uzyskuje się rozkład współczynników tłumienia dla całej płaszczyzny. W celu uzyskania rozkładu w całej próbce należy powtórzyć tę procedurę dla całej rodziny równoległych płaszczyzn obejmujących badany obiekt (Rys. 1).

Teoretyczna zdolność rozdzielcza tomografu jest równa większej z dwóch wielkości: długości tzw. ogniska źródła promieniowania X i rozmiarów detektora. Zdolność rozdzielcza tomografów medycznych wynosi około 0,5 mm, co wiąże się ze stosunkowo dużymi rozmiarami detektorów.

Tomografy przechowują dane o warstwie badanego ośrodka w postaci 2-wymiarowej macierzy współczynników Hounsfielda wokseli tzw. tomogramu. Współczynniki te przedstawiają współczynniki tłumienia promieniowania X w skali od -1000 (powietrze) do ok. 3000. Wartość 0 jest przypisana wodzie. Tomogramy są archiwizowane albo w postaci elektronicznej albo na kliszach światłoczułych, gdzie stopień szarości odzwierciedla wartość wsp. Hounsfielda w taki sposób, że wartość minimalna odpowiada - czerni a maksymalna - bieli.



Rys. 1. Idea wykonywania prześwietleń przez skanery tomografu.
Fig. 1. The idea of tomography X-ray.

W trakcie rejestrowania promieniowania X przez detektor oraz wykonywania procedury wyznaczania współczynników tłumienia następuje uśrednienie informacji o współczynniku tłumienia wewnątrz prostopadłościanu o rozmiarach liniowych równych zdolności rozdzielczej tomografu (odpowiednio w każdym z 3 kierunków przestrzennych). Prostopadłościan ten nosi nazwę woksela. Uśrednienie to ma szczególnie ważne znaczenie dla materiałów porowatych, w tym również dla gleby, gdyż elementy struktury tych ośrodków mogą być mniejsze od woksela. Z uwagi na to uśrednianie, istotnym staje się określenie związku pomiędzy rozmiarami woksela, a dokładnością pomiarów podstawowych parametrów geometrycznych agregatów takich jak np. obwód, średnica, pole powierzchni.

Celem pracy jest określenie warunków limitujących wykorzystanie metody analizy obrazu do przetwarzania informacji zawartych w tomogramach gleby zagregowanej.

W metodzie tej woksela reprezentowane są przez „punkty” obrazu, tzw. piksele. Nieciągła, dyskretna natura danych zawartych w tomogramach pociąga za sobą konsekwencje natury topologicznej: piksele obrazów tomogramów mają powierzchnię i brzeg, a więc można im przypisać pole powierzchni i długość obwodu. Mimo to w analizie obrazu mówi się o nich jako o punktach. Aby to przybliżenie było bliskie prawdy, obiekty przedstawiane na obrazach poprzez zbiór pikseli, muszą mieć rozmiary liniowe w poszczególnych kierunkach „wystarczająco” większe od rozmiarów pikseli (tj. składać się z wystarczająco dużej liczby pikseli).

Brzeg obiektów na obrazach cyfrowych ma niezerową grubość, gdyż jest złożony z „punktów” o niezerowych rozmiarach. Definiowanie „punktów” tworzących brzeg jest niezbędne jeśli jednym z wyników analizy obrazu ma być wyznaczenie długości obwodu obiektu. Wobec tych uwag najmniejszy obiekt musi się składać z 1 piksela wnętrza i 8 pikseli brzegowych rozmieszczonych wokół niego. Ten układ geometrycznie tworzy kwadrat o boku składającym się z 3 pikseli. Jednak dla tak małych obiektów wyniki analizy obrazu zależą od użytego algorytmu, dając np. dla kwadratu 3x3 pikseli pole powierzchni 1, 4 lub 9, a obwód 8. Istnienie tej niejednoznaczności powoduje, że konieczne jest określenie zależności pomiędzy wielkością woksela a minimalnym rozmiarem agregatu/poru, którego parametry geometryczne można badać metodą analizy obrazów.

MATERIAŁ I METODY

Wykonano dwojakiego rodzaju prace: symulacyjne i eksperymentalne. Pierwsze z nich polegały na wygenerowaniu obrazu, który otrzymałoby się z tomografu dla układu kul o znanej strukturze i przeanalizowaniu możliwości jednoznacznej identyfikacji kul i porów dla układów o różnych składach granulometrycznych.

Procedura wyznaczania obrazu była następująca:

1. utworzenie wirtualnego ośrodka składającego się z kul [3],
2. wyznaczenie 20 kolejnych przekrojów tej struktury w odległości co 50 μm ,
3. utworzenie obrazu binarnego każdego przekroju przy założeniu, że rozmiary piksela

- (punkty obrazu) wynosiły $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$; w obrazie binarnym (dwustanowym tj. dwukolorowym) pikselom przypisywano wartość 1 (kolor biały), jeśli znajdowały się wewnątrz okręgu powstającego jako wynik przecięcia kuli (agregatu) przez płaszczyznę przekroju lub 0 (kolor czarny) w pozostałych przypadkach,
4. dodanie do siebie 20 obrazów binarnych otrzymanych w poprzednim etapie,
 5. wykonanie obrazu końcowego poprzez zastąpienie obszaru o rozmiarze 10×10 pikseli jednym pikselem, któremu przypisano sumę wartości pikseli z zastępowanego obszaru.

Wygenerowany obraz składał się z wokseli o wartościach od 0 (woksel całkowicie poza agregatem) do 2000 (woksel całkowicie wewnątrz agregatu) i rozmiarach $0,5 \times 0,5 \times 1 \text{ mm}$.

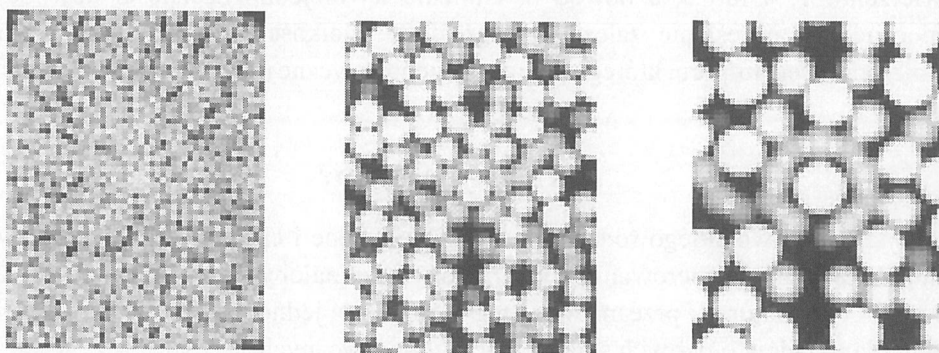
Wykonano symulacje dla zbioru monodispersyjnych kul o średnicach od 1 do 8 mm.

Badania eksperymentalne polegały na wykonaniu prześwietleń gleby składającej się z agregatów o wymiarach od 1 do 6 mm wypełniającej cylinder pomiarowy. Rozmiary cylindra wynosiły: wysokość 10 cm, średnica 10 cm. Do uzyskania tomogramów wykorzystano tomograf firmy General Electric, który charakteryzował się wymiarami detektorów $0,5 \times 1 \text{ mm}$, a więc woksel miał wymiary $0,5 \times 0,5 \times 1 \text{ mm}$.

Wszystkie obrazy badano w systemie AVS (Advanced Visualisation System). Dokonano komputerowego pomiaru grubości brzegu agregatów i porów oraz szybkości zmiany współczynnika Hounsfielda na obszarach brzegowych.

WYNIKI

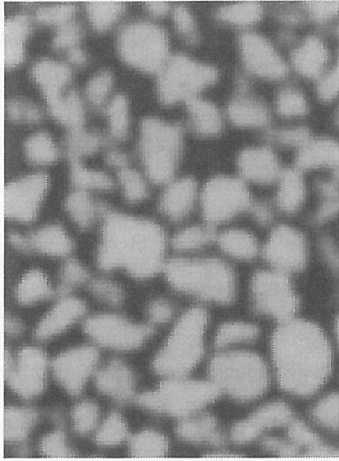
Obrazy, otrzymane metodą symulacji komputerowej (Rys. 2) oraz z tomografu (Rys. 3), miały podobny charakter. Badania ilościowe opierające się na analizie rozkładów wartości wokseli oraz gradientu jasności w otoczeniu tych granic pokazały, że rozmiar agregatów dla woksela $0,5 \times 0,5 \times 1 \text{ mm}$ powinien wynosić przynajmniej 5 mm.



Rys. 2. Obrazy struktury zbudowanej z kul o średnicach (a) 1 mm, (b) 3 mm i (c) 5 mm uzyskane metodą symulacji. Obrazy przedstawiają obszar $24 \times 32 \text{ mm}$ (48×64 piksele).

Fig. 2. Images of structure build up from spheres of following diameters (a) 1 mm, (b) 3 mm and (c) 5 mm obtained from packing simulation. Images shows the filed $24 \times 32 \text{ mm}$ (48×64 pixels).

WNIOSKI



Rys. 3. Obraz struktury uzyskanej z tomografu (rozmiar agregatów 5 mm).

Fig. 3. Image of soil aggregates obtained from tomographe (size of the aggregates >5 mm).

Uzyskane wyniki wskazują, że parametryzacja struktury gleby za pomocą będącego do dyspozycji tomografu komputerowego i metody analizy obrazu może być wykonywana w glebach, w których dominują agregaty nie mniejsze niż 5 mm. Oznacza to, że metoda daje się zastosować do gleby zagregowanej o dość dużych rozmiarach agregatów.

Stosunek rozmiaru woksela do najmniejszego elementu struktury, którego parametry geometryczne można wyznaczać metodą analizy obrazu wynosił 1:10. Rozróżnianie elementów odpowiadających frakcji piasku byłoby więc możliwe przy tomografii o zdolności rozdzielczej <math><100\ \mu\text{m}</math>.

PIŚMIENNICTWO

1. **Bracewell R.H., Riddle A.C.:** Inversion of fan beam scans in radio astronomy. *Astrophysics Journal*, 150, 427-434, 1967.
2. **Budinger T., Gullberg G.:** Three-dimensional reconstruction in nuclear medicine emission imaging. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 21, 2-21, 1974.
3. **Czachor H.:** Geometria fazy stałej i przestrzeni porów w rolniczych osrodkach granularnych na przykładzie gleby mineralnej. *Acta Agrophysica*, 7, 1997
4. **Gordon R.:** A tutorial on ART (Algebraic Reconstruction Techniques). *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 21, 78-93, 1974.
5. **Gordon R., Bender R., Herman G.:** Algebraic reconstruction techniques (ART) for three dimensional electron microscopy and X-ray photography. *Journal of Theoretical Biology*, 36, 105-117, 1970.
6. **Herman G., Lent A.:** Iterative reconstruction algorithms. *Cornput. Biol. Med.*, 6, 273-294, 1976.
7. **Herman G., Naparstek A.:** Fast image reconstruction based on a Radon inversion formula appropriate for rapidly collected data. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 33, 511-533, 1976.
8. **Hounsfield G.N.:** A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X- or gamma radiation. Britain Patent 1283915. 1972.
9. **Radon J.:** Uber die bestimmung von funktionen durch ihre intergralwerte langsgewisser mannigfaltigkeiten. *Berichte Saechsische Akademie der Wissenschaften*, 29, 262-277, 1917.
10. **Ramachandran G.N., Lakshminarayanan A.V.:** Three dimensional reconstructions from radiographs and electron micrographs: Application of convolution instead of Fourier transforms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 68, 2236-2240, 1971.
11. **Shepp L., Logan B.:** The Fourier reconstruction of a head section. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 21, 21-43, 1974.
12. **Wernecke S., Addario L.D.:** Maximum entropy image reconstruction. *IEEE Transactions on Computing*, 26, 351-364, 1977.

APPLICATION COMPUTER TOMOGRAPHY AND IMAGE ANALYSIS METHOD
TO INVESTIGATION AGGREGATE SOIL STRUCTURE

A. Guc, H. Czachor, A. Król

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences
Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

SUMMARY

The article contains a short presentation of the ideas underlying computer tomography. It points to the fact that when applying image analysis method to measure geometric parameters of soil aggregates displayed in tomographic images it is necessary to establish the relation between the minimum size of aggregate eligible for evaluation and the size of voxel. The analysis has been carried out for monoaggregate structures (the size of aggregates ranging from 1 to 7 mm) and encompassed two kinds of tomograms - those generated by computer tomographs as well as computer simulation. Quantitative analysis can be done if aggregate is at least 10 times bigger than voxel.

K e y w o r d s: computer tomography, image analysis, soil aggregate, voxel