

Sylwia Tomecka-Suchoń

Akademia Górniczo-Hutnicza Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Kraków

Teoretyczna analiza wpływu nasycenia gruntu roztworem NaCl na amplitudę fali elektromagnetycznej GPR

Słowa kluczowe

georadar, mineralizacja gruntu, fala elektromagnetyczna

Streszczenie

W pracy rozpatruje się, w sposób teoretyczny, wpływ nasycenia gruntu roztworami soli NaCl na amplitudy mierzonych sygnałów elektromagnetycznych GPR. Rozpatruje się przypadek płaskiej fali elektromagnetycznej rozchodzącej się w jednorodnym, dwuwarstwowym ośrodku. Zmiany przewodności są wynikiem nasycenia gruntu roztworem soli NaCl o koncentracjach zmieniających się w zakresie od 1 g/kg do 240 g/kg. Założono 30% nasycenie gruntu solanką. Obliczenia własności elektrycznych solanki i gruntów przeprowadzono przy wykorzystaniu znanych empirycznych zależności. Na tej podstawie oszacowano wpływ koncentracji soli NaCl na wartości współczynnika tłumienia, współczynników odbicia i transmisji elektrycznej składowej fali elektromagnetycznej o częstotliwości 800 MHz oraz współczynnika odbicia mocy. Analiza wyników obliczeń doprowadziła do konstatacji, że składowa rzeczywista względnej przenikalności elektrycznej gruntu nasyconego roztworem soli NaCl praktycznie nie zależy od jej koncentracji, natomiast składowa urojona względnej przenikalności elektrycznej gruntu oraz współczynnik tłumienia są prawie liniową funkcją koncentracji soli NaCl aż do koncentracji rzędu 150 g/kg. Przy wyższych koncentracjach obserwuje się zmniejszenie się tego wpływu. Zauważono, że największa czułość zmian współczynnika tłumienia na zmiany koncentracji NaCl w gruncie występuje aż do ok. 50 g/kg. Przy wyższych koncentracjach soli NaCl czułość wyraźnie obniża się. W konsekwencji stwierdza się, że analiza pomiaru georadarem przy częstotliwościach 800 MHz stwarza możliwość ilościowej oceny koncentracji soli NaCl w gruncie, w zakresie od ok. 1 g/kg do ok. 150 g/kg soli NaCl.

1. Parametry wpływające na strukturę wyników pomiarów georadarowych

Jak wiadomo (Landau, 1960) do celów praktycznych wygodne jest sprowadzenie równań Maxwella w dowolnym ośrodku do równania Helmholtza w postaci:

$$\Delta A(r) + A(r)k^2 = 0 \quad (1)$$

gdzie:

Δ – operator Laplace'a,

k – liczba falowa.

W przypadku badania własności rozkładu pola elektromagnetycznego w ośrodkach skalnych wygodnie jest sprowadzić ogólne równanie Helmholtza (1) do równania dla fali

płaskiej rozprzestrzeniającej się wzdłuż kierunku „z”. Dla tego przypadku równanie Helmholtza przybierze postać:

$$\frac{d^2 A(z)}{dz^2} + A(z)k^2 = 0 \quad (2)$$

Rozwiązaniem równia (2) dla fali monochromatycznej jest funkcja:

$$A(z) = A_0 e^{-ikz} \quad (3)$$

gdzie: A_0 – amplituda fali w źródle

z - odległość od źródła w kierunku osi „z”.

W przypadku ośrodka stratnego liczba falowa k jest wielkością zespoloną:

$$k = k' - ik'' \quad (4)$$

Wstawiając wyrażenie (4) do rozwiązania (3) składowa elektryczna pola E przyjmuje postać:

$$E(z) = A_0 e^{-k'z} e^{i(\omega t - k''z)} \quad (4a)$$

Można zauważyć, że k' jest odpowiedzialne za przesunięcie fazowe, a k'' za tłumienia fali (współczynnik tłumienia). Wiadomo (Landau, 1960), że wielkości te są funkcjami własności materiałowych ośrodka oraz częstotliwości. Wartości składowych, rzeczywistej i urojonej liczby falowej można obliczyć według wzorów (5a) oraz (5b):

$$k' = \sqrt{\mu\epsilon}\omega \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (5a)$$

$$k'' = \sqrt{\mu\epsilon}\omega \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (5b)$$

gdzie:

$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ – przenikalność elektryczna ośrodka,

ϵ_r – względna przenikalność elektryczną,

ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{F}{m} \right]$

μ – przenikalność magnetyczna ośrodka, $\left[\frac{H}{m} \right]$

γ – przewodność, $\left[\frac{S}{m} \right]$

$\omega = 2\pi f$; f – jest częstotliwością w [Hz].

Oznaczając:

$$\epsilon^* = \epsilon - \frac{i\gamma}{\omega} \quad (6a)$$

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (6b)$$

gdzie:

$$\epsilon_r^* = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0}, \quad \epsilon_r' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{oraz} \quad \epsilon_r'' = \frac{\gamma}{\omega\epsilon_0}$$

po podstawieniu wzorów (6) wzory (5a) i (5b) przybiorą postać:

$$k' = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \omega \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2} + 1 \right]} \quad (7a)$$

$$k'' = \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \omega \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2} - 1 \right]} \quad (7b)$$

Stosunek składowych urojonej do rzeczywistej przenikalności elektrycznej określa się jako tangens kąta stratności δ :

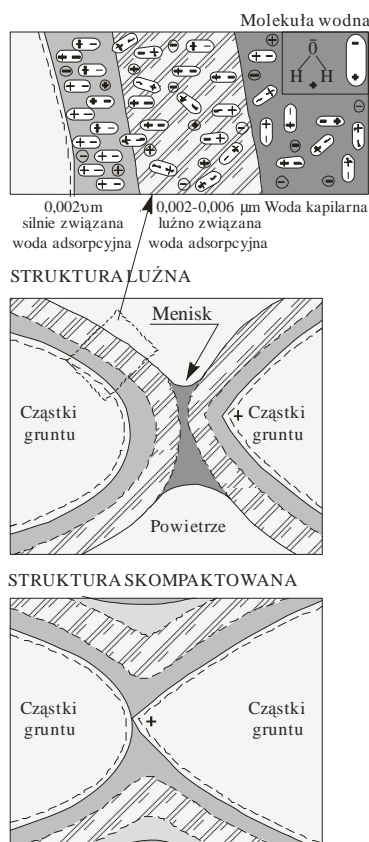
$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' \quad (8)$$

Składowe rzeczywista i urojona przenikalności elektrycznej są przedmiotem pomiarów laboratoryjnych.

2. Własności elektryczne gruntów

Jest sprawą powszechnie znaną, że własności elektryczne skał zmieniają się w zależności od częstotliwości przykładanych do nich pól elektrycznych - od pól stacjonarnych do szybkozmiennych. Tu przedmiotem badań są utwory przypowierzchniowe występujące do głębokości rzędu kilkunastu metrów. Są to zwykle skały słabo zwięzłe, grunty silnie porowate, wilgotne lub nasycone wodą słodką. Silnie zmineralizowane grunty są zwykle skutkiem działalności przemysłowej. Zagadnienia te są prezentowane w pracach Peplńskiego i innych (1995), Saarenketo (1998), Diasa (2000). W pracy (Peplinski i in. 1995) prezentuje się półempiryczne modele związku zespolonej względnej przenikalności elektrycznej gruntu z jego własnościami mechanicznymi na podstawie pomiarów wykonanych dla szerokiego przedziału częstotliwości od 0,3 GHz do 1,3 GHz. Badane grunty posiadały typowy skład mineralny: piaski, muły i iły. Określano zależności od składu mineralnego, gęstości objętościowej, zawartości wilgoci, przenikalności elektrycznej wody z uwzględnieniem zastosowanych częstotliwości przykładanych pól elektrycznych oraz temperatury. Zawartości piasków zmieniały się od 15 do 50%, mułów od 35 do 65% i iłów od 15 do 20%. Średnice cząstek piasku zmieniały się w przedziale od 0,05-2 mm, mułów od 0,002-0,05 mm. Dla iłów, głównie kaolinitu, średnice ziaren były mniejsze niż 0,002 mm. Wykazano, że występuje silny związek pomiędzy przenikalnością elektryczną (rzeczywistą i urojoną) a udziałami wody międzycząsteczkowej w ogólnej objętości wody w gruncie. Równocześnie obserwuje się małe zróżnicowanie obydwu składowych przenikalności elektrycznej w przedziale częstotliwości pola 0,3-1,3 GHz. Występuje natomiast silna zależność pomiędzy przenikalnością elektryczną a rodzajem kaolinitu.

Ogólnie można stwierdzić (Saarenketo 1998), że na przenikalność elektryczną gruntu składają się: przenikalności poszczególnych składników, ich udziały objętościowe, własności geometryczne a także ich wzajemne oddziaływanie. Najistotniejszym składnikiem jest woda. Woda w gruncie może występować jako woda adsorpcyjna (hydroskopijska), kapilarna oraz swobodna (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Struktura wody związanej w gruncie (Saarenketo 1998)
 Fig. 2.1. Structure of bound water in soil (Saarenketo 1998)

Wodą hydroskopijską nazywa się tę wodę, której cząsteczki są adsorbowane przez cząstki gruntu przy pomocy sił międzycząsteczkowych. Ta warstwa wody zależy od temperatury, względnej zawartości wilgoci w powietrzu i ciśnienia atmosferycznego. Warstwę tę tworzą cząsteczki, które są w największym stopniu elektrostatycznie uporządkowane wokół ujemnie naładowanych powierzchni minerałów i przylegają do innych warstw wody związanej. Wodą kapilarną określa się ten rodzaj wody, który nie jest wodą hydroskopijską ale nie przemieszcza się zgodnie z prawem grawitacji. Warstwa ta jest dodatkowo dzielona na dwie warstwy: wewnętrzną i zewnętrzną. Wewnętrzna stanowi warstwę pośrednią pomiędzy warstwą adsorpcyjną a wodą kapilarną. Woda ta jest słabiej związana zarówno siłami powierzchniowymi jak i siłami koloidalnymi, natomiast woda kapilarna jest związana tylko siłami koloidalnymi. Ilość wody kapilarnej zależy od tekstury, struktury gruntu, zawartości substancji organicznej i sił grawitacji. Woda ta tworzy meniski kapilarne pomiędzy cząstkami gruntu a powietrzem. Woda swobodna jest nazywana wodą grawitacyjną i podlega w pełni działaniu sił grawitacyjnych.

Własności elektryczne gruntów opisywane są za pomocą parametrów: przenikalności magnetycznej - μ , przenikalności elektrycznej - ϵ oraz przewodności elektrycznej - γ .

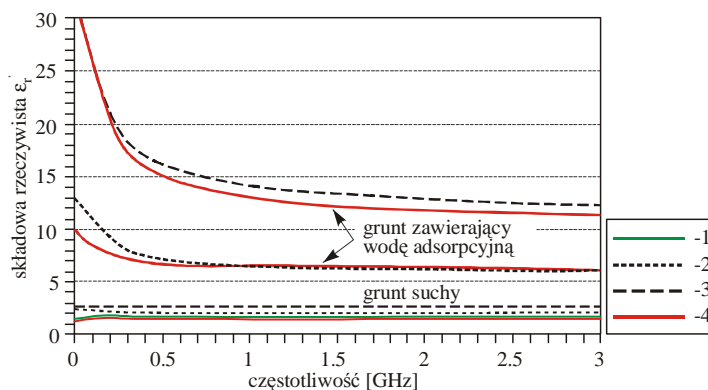
Przenikalność elektryczna jest miarą zdolności materiału do gromadzenia ładunków elektrycznych powstałych pod wpływem przyłożonego zewnętrznego pola elektrycznego. Definiuje się pojęcie współczynnika stratności $\tan\delta$ jako miary proporcji pomiędzy ładunkami przenoszonymi i gromadzonymi.

Przenikalność elektryczną, jak przedstawiono to wyżej (6) można traktować jako wielkość zespoloną. Wielkość ta jest zależna od częstotliwości.

Na wartość tangensa strat (8) wpływa wartość koncentracji soli rozpuszczonych w wodach nasycających ośrodek, a także występowanie wewnętrznych strat termicznych, orientacja cząstek wody oraz straty związane z występowaniem cząstek ilastych.

Część rzeczywista względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r' zmienia się od 1 dla próżni do 81 dla wody swobodnej w 20° C. Przenikalność elektryczna wody zależy od stopnia związania cząstek wody z cząstkami gruntu. Względna przenikalność silnie związanej wody adsorpcyjnej zmienia się w przedziale 3,5-3,8. Przenikalność magnetyczną przyjmuje się za równą przenikalności magnetycznej próżni i za nie mającą wpływu na propagację impulsów radarowych. Przewodność elektryczną w gruntach określa się jako zdolność do przemieszczania się elektronów. Większość minerałów jak kwarc, mika, skalenie przyjmuje się jako nieprzewodzące. Jednak jeśli powierzchnie tych minerałów znajdują się w kontakcie z wodą to wtedy tworzą się elektrolity, w których jony ulegają przesunięciu zgodnie z kierunkiem przyłożonego pola i w konsekwencji następuje przepływ prądu elektrycznego. Ruch jonów jest proporcjonalny do wielkości pola elektrycznego i zależy od temperatury, koncentracji jonów i składu cząsteczkowego.

Wyniki pomiarów składowych rzeczywistych i urojonych przenikalności elektrycznej dla przykładowych gruntów w funkcji częstotliwości są zamieszczone na rys. 2.2a, b (Saarenketo 1998):

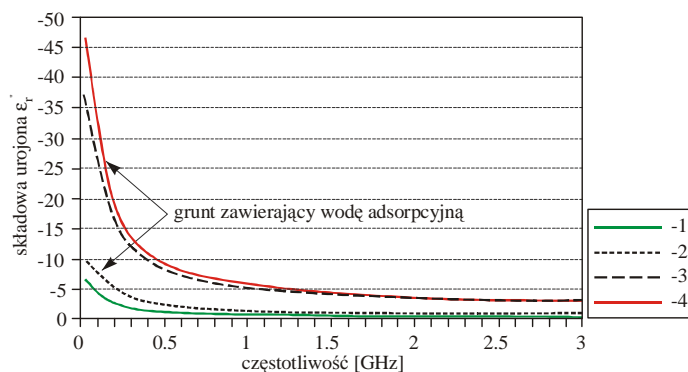


Rys. 2.2a. Zależność rzeczywistej składowej zespolonej przenikalności elektrycznej różnych gruntów o dwóch procentowych, wagowych zawartościach wilgoci przy częstotliwościach pola z przedziału od 30 MHz do 3 GHz (Saarenketo 1998)

Oznaczenia: 1 – glina kaolinitowa (0% lub 9,2%), 2 - glina Eddego (0% lub 4,3%), 3 - czarna glina Houston (0,2% lub 14,6%), 4 - glina Beaumont (0% lub 15,5%)

Fig. 2.2a. Real part of the relative dielectric permittivity value for oven-dry and water-adsorbed soils at frequencies between 30 MHz and 3.0 GHz

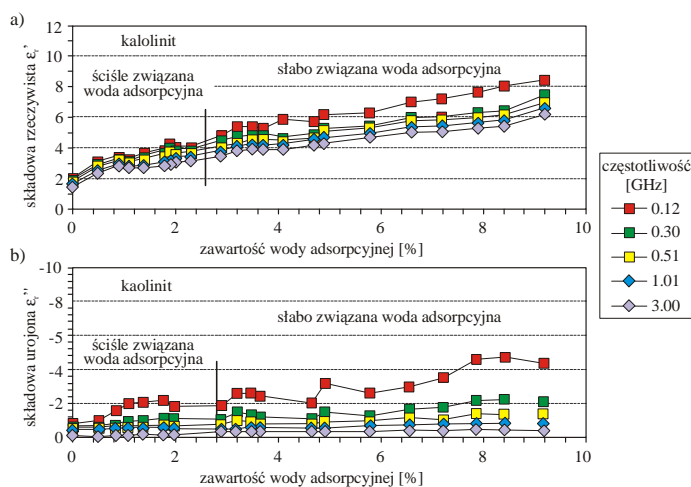
Notes: 1 - Kaolinitic clay (0% or 9,2%), 2 - Eddy clay (0% or 4,3%), 3 - Houston black clay (0,2% or 14,6%), 4 - Beaumont clay (0% or 15,5%)



Rys. 2.2b. Zależność urojonej składowej zespolonej przenikalności elektrycznej różnych gruntów o dwóch procentowych, wagowych zawartościach wilgoci od częstotliwości pola EM z przedziału od 30 MHz do 3 GHz. Oznaczenia jak na rys. 2.2a (Saarenketo 1998)

Fig. 2.2b. Imaginary part of the relative dielectric permittivity value for oven-dry and water-adsorbed soils at frequencies between 30 MHz and 3.0 GHz. Symbols are the same as in fig. 2.2a

Na powyższych wykresach można zauważyć, że dla suchych gruntów wartości obydwu składowych przenikalności elektrycznej nieznacznie różnią się od zera, szczególnie dla wyższych częstotliwości (powyżej 500 MHz). Dla gruntów zawierających wodę adsorpcyjną wartości te silnie wzrastają szczególnie dla niższych częstotliwości (poniżej 500 MHz).

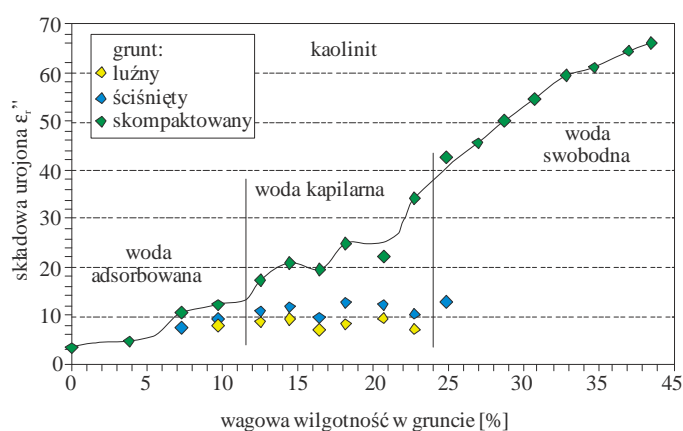


Rys. 2.3a, b. Zależność składowych rzeczywistej i urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej gruntu mułowcowego zawierającego kaolinit od procentowej, wagowej zawartości wody adsorpcyjnej w kaolinicie i częstotliwości pola (Saarenketo 1998)

Fig. 2.3a,b. Real and imaginary part of the relative dielectric permittivity value for water-adsorbing kaolinit (Saarenketo 1998)

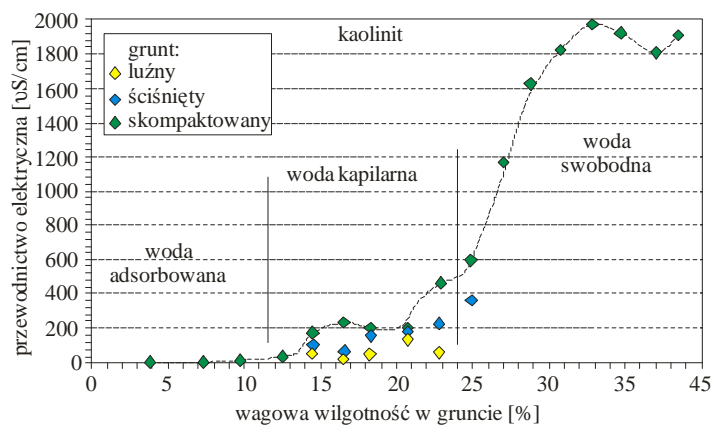
Bardziej szczegółowo zależność obydwu składowych przenikalności elektrycznej od stopnia wagowej zawartości wody adsorpcyjnej w funkcji częstotliwości dla kaolinitu prezentują

rysunki rys. 2.3a, b. Można zauważyć wyraźną zależność rzeczywistej składowej przenikalności elektrycznej od procentowej zawartości wody adsorpcyjnej przy równoczesnej niewielkiej zależności od częstotliwości (malenie ϵ_r' wraz ze wzrostem częstotliwości). Składowa urojona nieznacznie odbiega od zera i nie zależy od procentowej zawartości wody adsorpcyjnej, chociaż również nieznacznie maleje wraz z częstotliwością. Przytoczone (Saarenketo 1998) wyniki pomiarów dla innych gruntów wykazują, że w przypadku zawartości innych minerałów ilastych bezwzględne wartości ϵ_r' i ϵ_r'' mogą różnić się istotnie od wartości zmierzonych dla kaolinitu. Oprócz tego możliwy jest wzrost bezwzględnych wartości ϵ'' wraz ze wzrostem wagowej zawartości wody adsorpcyjnej. Bez zmian pozostaje jednak kierunek zmian zależnych od częstotliwości.



Rys. 2.4. Zależność składowej rzeczywistej zespolonej przenikalności elektrycznej od procentowej, wagowej zawartości wilgoci dla gliny kaolinitowej (Saarenketo 1998)

Fig. 2.4. Relative dielectric permittivity value ϵ^* vs. gravimetric moisture content in kaolinitic clay



Rys. 2.5. Zależność przewodnictwa elektrycznego od procentowej, wagowej zawartości wilgoci dla gliny kaolinitowej (Saarenketo 1998)

Fig. 2.5. Electrical conductivity vs. gravimetric moisture content in kaolinitic clay

Zależność ε_r' oraz ε_r'' od wagowej zawartości wilgoci w gruncie - wody kapilarnej oraz swobodnej jest wyraźniejsza niż dla wody adsorpcyjnej. Składowe rzeczywista i urojona szybko wzrastają wraz z zawartością wilgoci, przewyższając kilkakrotnie wartości odpowiadające zawartości wody adsorpcyjnej (rys. 2.4). Jednak zależność ta występuje dla skał, które uległy procesowi kompaktacji. Inne opisywane przykłady wskazują, że zależność od częstotliwości jest taka sama jak poprzednio (wzrost przenikalności elektrycznej wraz z maleniem częstotliwości).

Również przewodność gruntów zależy głównie od zawartości wód kapilarnej i swobodnej oraz od stopnia kompaktacji gruntu. Prezentuje to rysunek (rys. 2.5).

3. Empiryczne modele umożliwiające ilościową ocenę przenikalności elektrycznej badanych gruntów

Podstawą do oceny czułości metody georadarowej na zmieniające się warunki zachodzące w gruncie były empiryczne rozważania (Stogryn 1971) i (Ulaby 1986). Rozważania te doprowadziły do konstrukcji empirycznych związków pomiędzy wartościami składowych rzeczywistej i urojonej przenikalności elektrycznej od koncentracji NaCl w solankach oraz w gruntach. Zamieszczone poniżej wzory odpowiadają względnym przenikalnościom elektrycznym.

Częstotliwościowe zależności przenikalności elektrycznej dla solanek wyrażają się znanymi wzorami Debye'a:

$$\varepsilon_{sol}' = \varepsilon_{w\infty} + \frac{\varepsilon_{sol\phi} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f \tau_{sol})^2} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{sol}'' = 2\pi f \tau_{sol} \frac{\varepsilon_{sol\phi} - \varepsilon_{w\infty}}{1 + (2\pi f \tau_{sol})^2} + \frac{\gamma_{sol}}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (10)$$

gdzie:

ε_{sol0} – statyczna, względna przenikalność elektryczną solanki,

$\varepsilon_{w\infty}$ – wysoko-częstotliwościowa granica względnej przenikalności elektrycznej wody.

Sugerowana przez różnych autorów wartość wynosi 4,9,

τ_{sol} – czas relaksacji solanki,

γ_{sol} – oporność w S/m,

f – częstotliwość fali w Hz.

Ponieważ wielkości występujące w powyższych wzorach, będące funkcjami koncentracji soli S oraz temperatury T uzyskiwane są eksperymentalnie, poniżej podaje się ich regresyjne aproksymacje (Ulaby, 1986).

$$N_{sol} = [1.707 \cdot 10^{-2} + 1.205 \cdot 10^{-5} S + 4.058 \cdot 10^{-9} S^2] \quad (11)$$

gdzie: S – oznacza koncentrację soli w g/kg,

N_{sol} – oznacza koncentrację soli wyrażoną w mml/dcm³

$$\varepsilon_{sol\phi}(T, N_{sol}) = \varepsilon_{sol\phi}(T, 0) \cdot a_1(N_{sol}) \quad (12)$$

$$\tau_{sol}(T, N_{sol}) = \tau_{sol}(\tau, 0) \cdot b_1(T, N_{sol}) \quad (13)$$

$$\gamma_{sol}(T, N_{sol}) = \gamma_{sol}(25, N_{sol}) \cdot C_1(\Delta, N_{sol}) \quad (14)$$

Funkcje występujące w powyższych wzorach zamieszcza się poniżej:

$$\varepsilon_{sol\phi}(T, 0) = 88,045 + 0,4147 \cdot T * 6,295 \cdot 10^{+4} T^2 * 1,075 \cdot 10^{+5} T^3 \quad (15)$$

$$a_1(N_{sol}) = 1.0 + 0.255 N_{sol} * 5.15 \cdot 10^{+2} N_{sol}^2 + 6.89 \cdot 10^{+3} N_{sol}^3 \quad (16)$$

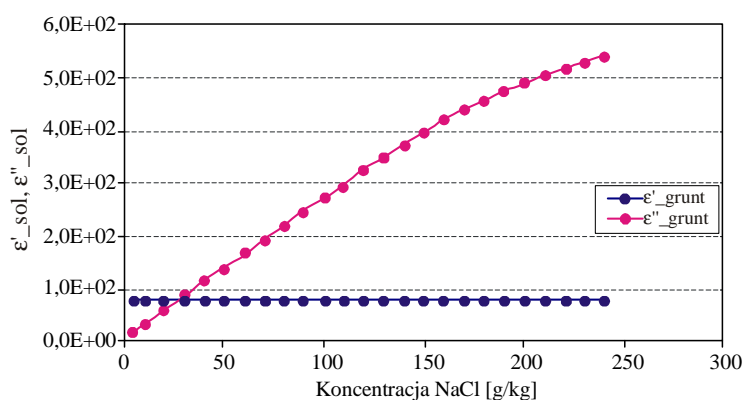
$$\tau_{sol\phi}(T, 0) \cdot 2\pi = 1.1109 \cdot 10^{+10} + 3.827 \cdot 10^{+12} T * 6.938 \cdot 10^{+14} T^2 + 5.096 \cdot 10^{+16} \cdot T^3 \quad (17)$$

$$b_1(T, N_{sol}) = 1.0 * 0.146 \cdot 10^{+2} T N_{sol} + 4.89 \cdot 10^{+2} N_{sol} + 2.97 \cdot 10^{+2} N_{sol}^2 * 5.64 \cdot 10^{+3} N_{sol}^3 \quad (18)$$

$$\gamma_{sol}(25, N_{sol}) = N_{sol} \left(10.399 + 2.378 N_{sol} * 0.683 N_{sol}^2 + 0.135 N_{sol}^3 * 1.01 \cdot 10^{+2} N_{sol}^4 \right) \quad (19)$$

$$C_1(\Delta, N_{sol}) = 1.0 - 1.96 \cdot 10^{-2} \Delta + 8.08 \cdot 10^{-5} \Delta^2 + - N_{sol} \cdot \Delta \cdot \left[3.02 \cdot 10^{-5} + 3.92 \cdot 10^{-5} \Delta + N_{sol} \left(1.72 \cdot 10^{-5} - 6.58 \cdot 10^{-6} \Delta \right) \right] \quad (20)$$

gdzie: $\Delta = 25 - T [^{\circ}C]$



Rys. 3.1. Wykres zależności składowych rzeczywistej (ε'_{sol}) i urojonej (ε''_{sol}) względnej przenikalności elektrycznej roztworu wodnego soli NaCl od jej koncentracji, przy częstotliwości pola $f = 800$ MHz

Fig. 3.1. Real (ε'_{sol}) and imaginary (ε''_{sol}) parts of relative dielectric permittivity of NaCl solution vs. concentration of NaCl for frequency $f=800$ MHz

Na podstawie powyższych wzorów określono zależność przewodności roztworu wodnego NaCl oraz względnych przenikalności elektrycznych dla solanek o koncentracji NaCl zmieniających się w przedziale od 1 g/kg do 240 g/kg. Założono 30% nasycenie solanką. Wykresy zależności zawiera rysunek 3.1. Wynika z niego, że wartości składowej rzeczywistej względnej przenikalności elektrycznej są praktycznie stałe, na poziomie 79. Wartość składowej

urojonej wzrasta wraz z koncentracją NaCl od 9,6 do 540. W obliczeniach założono częstotliwość 800 MHz i temperaturę 22°C.

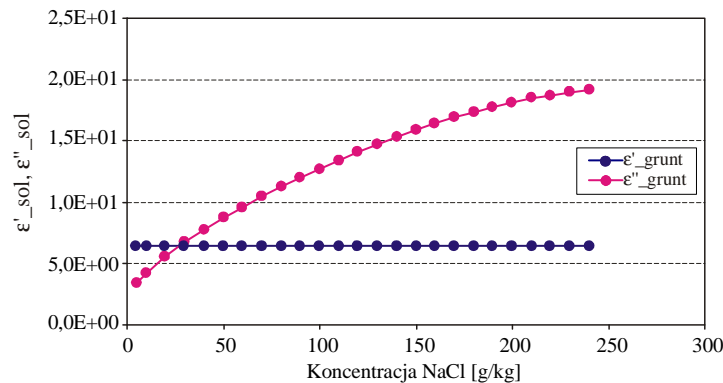
Uzyskane za pomocą powyższych wzorów wartości dla składowych rzeczywistej i urojonej względnej przenikalności elektrycznej soli NaCl posłużyły do obliczenia względnej przenikalności elektrycznej gruntu zawierającego roztwór solanki NaCl. Wartości te obliczone zostały przy wykorzystaniu kolejnych wzorów empirycznych:

$$\varepsilon_{gleba} = 1 + \frac{\rho_{obj}}{\rho_{min}} (\varepsilon_{min}^{\alpha} - 1) + (m_v^{\beta} \varepsilon_{w-swob}^{\alpha} - m_v) \quad (21)$$

gdzie:

- ε_{gleba} – względna przenikalność elektryczna gruntu nasyconego roztworem o względnej przenikalności elektrycznej ε_{w-swob} .
- ρ_{obj}, ρ_{min} – gęstości gruntu - objętościowa i mineralna,
- m_v – stosunek objętości roztworu do objętości gruntu,
- α – wykładnik potęgi równy 0,65,
- β – wykładnik potęgi. Dla gruntów piaszczystych przyjmuje wartość 1,0.

Na podstawie powyższych wzorów określono zależność względnych przenikalności elektrycznych dla gruntu piaszczystego niezailonego, nasyconego roztworem NaCl o koncentracjach NaCl zmieniających się w przedziale od 1 g/kg do 240 g/kg. Wykres zależności zawiera rysunek 3.2. W obliczeniach założono względną przenikalność elektryczną minerałów 4,7, objętość roztworu w gruncie 30% i częstotliwość fali EM 800 MHz. Składowa rzeczywista względnej przenikalności elektrycznej jest w przybliżeniu stała i wynosi 6,44. Składowa urojona zawiera się w przedziale od ok. 3,4 do 19,2. Można zauważyć wyraźną tendencję składowej urojonej do „nasycania” się przy koncentracjach ok. 200 g/kg.

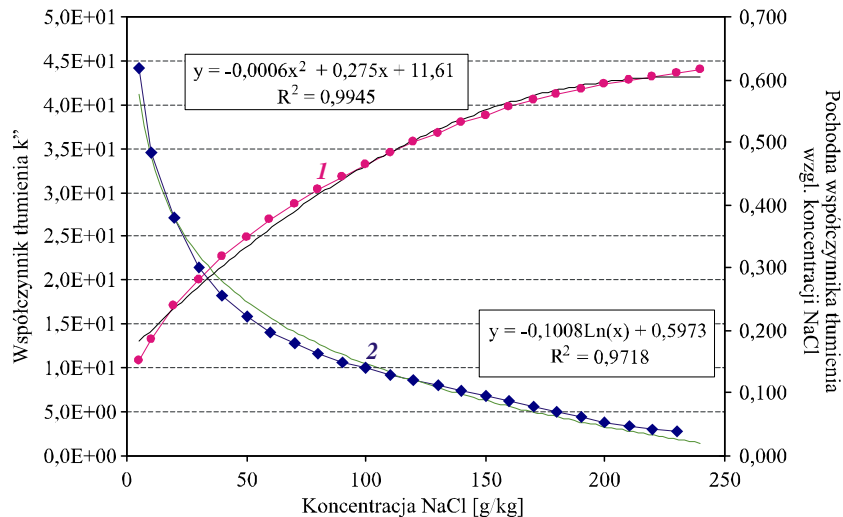


Rys. 3.2. Wykres zależności składowych rzeczywistej ($\varepsilon'_{\text{grunt}}$) i urojonej ($\varepsilon''_{\text{grunt}}$) względnej przenikalności elektrycznej gruntu piaszczystego nasyconego wodnym roztworem soli NaCl od jej koncentracji. Założono zawartość solanki w gruncie na poziomie 30% objętościowych i częstotliwość pola $f = 800$ MHz

Fig. 3.2. Real ($\varepsilon'_{\text{grunt}}$) and imaginary ($\varepsilon''_{\text{grunt}}$) parts of relative dielectric permittivity of sandy soil vs. concentration NaCl solution. The assumed content of saline solution in the soil is 30% (vol) and field frequency $f=800$ MHz

Następnym krokiem było oszacowanie współczynnika tłumienia k'' fali EM w gruncie w funkcji koncentracji soli NaCl. Na podstawie wzoru (4a) wiadomo, że za tłumienie fali w środku odpowiedzialna jest urojona składowa liczby falowej k'' , którą można obliczyć za pomocą wzoru (7b).

Na tej podstawie, dla założonych wyżej warunków przeprowadzono obliczenia zależności współczynnika tłumienia od koncentracji soli NaCl w gruncie. Wartości współczynnika tłumienia rosną wraz ze zwiększaniem się koncentracji NaCl od wartości 7,8 $[m^{-1}]$ przy koncentracji 0,1 g/kg do 44,1 $[m^{-1}]$ przy koncentracji 240 g/kg. Można zauważyć wyraźny efekt „nasywania” się funkcji od koncentracji ok. 150 g/kg (rys. 3.3). Miarą „czułości” współczynnika tłumienia na zmiany koncentracji soli jest pierwsza pochodna. Wartości „czułości” zmieniają się w przedziale od ok. 0,8 $[m^{-1} g/kg]$ przy koncentracji ok. 0,1 g/kg do ok. 0,04 $[m^{-1} g/kg]$ przy koncentracji ok. 240 g/kg. Wykres tej zależności zawarty jest na rysunku rys. 3.3. Z wykresu można zauważyć, że najwyższa „czułość” amplitudy fal EM na zmiany koncentracji soli występuje w przedziale o 0 do ok. 50 g/kg.



Rys. 3.3. Wykres zależności współczynnika tłumienia k'' fali EM (1) wraz z jego pochodną (2) w gruncie piaszczystym nasyconym wodnym roztworem soli NaCl od jej koncentracji. Założono 30% zawartość objętości solanki w gruncie i częstotliwość pola EM $f = 800$ MHz

Fig. 3.3. Attenuation coefficient (1) and its derivative (2) of sandy soil saturated with NaCl solution vs. its concentration. The assumed content of saline solution in the soil is 30% (vol) and field frequency $f = 800$ MHz

Wynik pomiarów georadarowych nad ośrodkiem warstwowym zależy od relacji pomiędzy amplitudami fal odbitych od powierzchni rozdzielających te ośrodki i fal przechodzących. Miarą tych relacji są współczynniki odbicia R i transmisji T . Wiadomo, że pomiędzy współczynnikami dla składowej elektrycznej pola zachodzi związek:

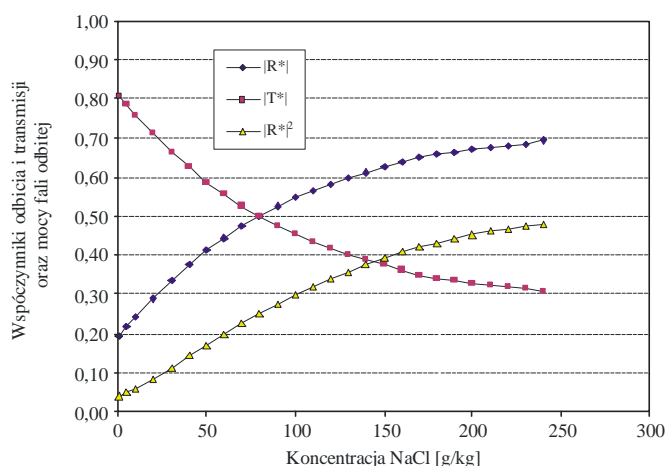
$$1 - R_E = T_E \quad (22)$$

W przypadku ośrodka dwuwarstwowego, stratnego, zespolony współczynnik odbicia składowej elektrycznej fali elektromagnetycznej jest opisany wzorem (Landau, 1960):

$$R_E^* = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}^*} - \sqrt{\epsilon_{r2}^*}}{\sqrt{\epsilon_{r1}^*} + \sqrt{\epsilon_{r2}^*}} = |R_E^*| e^{i\phi} \quad (23)$$

zaś współczynnik mocy fali odbitej wyraża się wzorem:

$$|R_E^*|^2 = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}^*} - \sqrt{\epsilon_{r2}^*}}{\sqrt{\epsilon_{r1}^*} + \sqrt{\epsilon_{r2}^*}} \right|^2 \quad (24)$$



Rys. 3.4. Wykres zależności modułów współczynników odbicia $|R^*|$, transmisji $|T^*|$ oraz mocy fali odbitej $|R^*|^2$ w dwuwarstwowym ośrodku zanieczyszczonym solami NaCl
Fig. 3.4. The reflection and transmission coefficients and GPR reflected signals power in two-layers medium vs. concentration of NaCl

Ze względu na zainteresowanie w niniejszej pracy zmianami amplitud fal EM pomija się obliczenia dotyczące przesunięć faz ϕ . Moduł $|R_E^*|$ można obliczyć przez rozłożenie pierwiastka kwadratowego zespolonych przenikalności elektrycznych za pomocą wzorów (4) oraz (7a) i (7b). Przy obliczeniach założono, że warstwa otaczająca warstwę zanieczyszczoną roztworem soli NaCl posiada parametry: względna przenikalność elektryczna ϵ_r' (składowa rzeczywista) = 3,2, przewodność elektryczna $\gamma = 0,002$ [S/m], przenikalność magnetyczna $\mu_r = 1$. Warstwa zanieczyszczona ma rozciągłość 2 [m]. Warstwa ta jest nasycana solanką o koncentracji soli NaCl w przedziale od 1 g/kg do 240 g/kg. Założono względną przenikalność magnetyczną $\mu_r=1$. Wyniki obliczeń zamieszczono na rys. 3.4.

Porównując uzyskane zmiany modułu współczynników odbicia i transmisji z wartościami współczynnika tłumienia zamieszczonymi na rysunku 3.3 widać oczekiwaną zgodność. Widać, że współczynnik odbicia zmienia się od wartości od 0,2 dla koncentracji 1 [g/kg] do ok. 0,7 przy koncentracji 240 [g/kg] NaCl. Odpowiada to wartościom współczynnika tłumienia od ok.10 [m^{-1}] do ok. 44[m^{-1}]. Z wykresu można zauważyć, że współczynnik mocy fali odbitej osiąga wartość bliską 0,5 przy koncentracji soli NaCl bliskiej 250 [g/kg].

5. Podsumowanie

1. Mierzony sygnał georadarowy przy częstotliwości 800 MHz jest czuły na zawartość soli NaCl w gruncie.
2. Składowa rzeczywista względnej przenikalności elektrycznej gruntu nasyconego roztworem soli NaCl praktycznie nie zależy od jej koncentracji.
3. Składowa urojona względnej przenikalności elektrycznej gruntu jest prawie liniową funkcją koncentracji soli NaCl, aż do koncentracji rzędu 150 [g/kg]. Przy wyższych koncentracjach obserwuje się efekt wysycenia skutkujący słabszym przyrostem względnej przenikalności elektrycznej przy przyroście koncentracji NaCl.
4. Również współczynnik tłumienia fali EM jest prawie liniową funkcją koncentracji NaCl aż do koncentracji ok. 150 [g/kg] w gruncie. Przy wyższych koncentracjach obserwuje się efekt wysycenia skutkujący słabszym przyrostem współczynnika tłumienia przy przyroście koncentracji NaCl.
5. Największa czułość zmian współczynnika tłumienia na zmiany koncentracji NaCl w gruncie występuje aż do ok. 50 [g/kg]. Przy wyższych koncentracjach soli NaCl czułość wyraźnie obniża się.
6. Wysokość amplitud mierzonego sygnału podczas pomiaru georadarem przy częstotliwościach 800 MHz stwarza możliwość, w zakresie koncentracji soli NaCl do ok. 150 g/kg soli NaCl, prowadzenie ilościowej oceny stopnia nasycenia gruntu roztworem soli NaCl. W tym zakresie występuje prawie linowa zależność mocy sygnału odbitego od warstwy zanieczyszczonej od koncentracji soli NaCl. Przy wyższych koncentracjach daje się zauważyć pewną nieliniową zależność mocy sygnału odbitego od koncentracji NaCl, co zmniejsza czułość wyniku pomiaru na zamianę koncentracji NaCl.

Praca została wykonana w ramach badań własnych. Nr umowy: 10.10.140.784

Literatura

- [1] Dias, C. A., 2000: Developments in a Model to Describe Low-Frequency Electrical Polarization of Rocks, *Geophysics*, vol.65, No. 2, March-April 2000.
- [2] Courant R., Friedrichs K., Lewy H., 1967: On the partial difference equations of mathematical physics, *IBM Journal*, March 1967, pp.215-234.
- [3] Davis J.L., Annan A.P., 1989: Ground-Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting* vol.37, pp.531-551.
- [4] Landau L., Liszyc E., 1960: *Elektrodynamika ośrodków ciągłych*, PWN.
- [5] Seyfried M. S., Murdock M. D., 2004: Measurement of Soil Water Content with a 50 – MHz Soil Dielectric Sensor, *SSSAJ Soil Science Society of America Journal*, vol. 68, March-Apriel, 2004.
- [6] Peplinski N. R., Ulaby F. T., Dobson M. C., 1995: Dielectric Properties of Soil in the 0,3-1,3 GHz Range, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol.33, No. 3, pp. 803 – 807.
- [7] Saarenketo T., 1998: Electrical Properties of Water in Clay and Silty Soils, *Journal of Applied Geophysics* No.40, pp. 73 – 88.
- [8] Stogryn A., 1971: Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water, *IEEE Trans. Microwave Theory Techn., MIT-19*, pp.733-736.
- [9] Ulaby F. T., Moore, R. K., Fung, A. K., 1986: *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, Vol. III From Theory to Applications, Appendix E. *Microwave Dielectric Properties of Earth Material*. Artech House, pp.2017 – 2119.
- [10] Worthington P. E., 1985: The Evolution of Shally-Sand Concepts in Reservoir Evaluation, *The Log Analyst*. January-February, 1985, pp.23 – 40.

Theoretical Analysis of the Influence of Soil Saturation with NaCl Solution on the Amplitude of Reflected Georadar Waves

Key words

georadar, mineralization, soil, electromagnetic wave, GPR

Abstract

The paper discusses in theoretical way the influence of saturation of soil with salt solution NaCl on amplitudes of recorded GPR electromagnetic signals. It considers the case of a plane electromagnetic wave propagating in a homogenous two-layer medium. The research regards an influence of the electric conductivity of second layer on the reflection coefficient for GPR waves. The conductivity changes result from saturation of the soil (the soil saturation with saline was assumed to be 30%) with NaCl solutions of concentrations ranging from 1 to 240 g/kg. The electrical properties of saline NaCl and soil were calculated on the base of known empirical relationships. Basing on it, we estimated the influence of NaCl concentration on the values of GPR attenuation, reflection and transmission coefficients for the 800 MHz frequency. The analysis of results indicated that the real part of the relative dielectric permittivity of the soil saturated with saline is practically independent of NaCl concentration, while its imaginary part and attenuation coefficient are almost linear function of saline concentration up to 150 g/kg. At higher concentration the ratio of increase is smaller. The highest sensitivity of the change of attenuation coefficient on soil concentrations NaCl appears less then about 50 g/kg. At higher NaCl concentrations the sensitivity markedly falls. In consequence, it was found that the georadar recording analysis at 800 MHz consents to quantitative assessment of NaCl concentration in the soil in 1 – 150 g/kg range.

Przekazano: 26 kwietnia 2010 r.