

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ХМАР І ОПАДІВ ЗА ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В статті розглядається можливість розпізнавання хмар і пов'язаних з ними небезпечних явищ погоди за поляризаційними сигналами їх луно-сигналів.

Ключові слова: поляризація, параметри Стокса, матриця Стокса, купчасто-дощові хмари, опади.

Передмова. Радіолокаційне виявлення і дослідження купчасто-дощових хмар і зв'язаних з ними небезпечних явищ погоди таких як град, грози, зливи, шквали та снігопади до цього часу являють серйозну проблему, тому що мережеві МРЛ використовують як інформативний параметр амплітуду електромагнітної хвилі, а деякі МРЛ і частоту [1, 2]. В той же час найбільш інформативним радіолокаційним параметром є поляризація, яка зараз ніде не використовується в повному обсязі.

Мета і методи досліджень. Метою дослідження є розробка поляризаційної моделі, яка дозволяє пов'язати між собою поляризаційні параметри випроміненої та відбитої електромагнітної хвилі з характеристиками метеооб'єктів. При виявленні і розпізнаванні хмар і опадів, та пов'язаних з ними небезпечних явищ погоди, в статті використовується поляризаційний метод, в якому як інформаційні радіолокаційні параметри використані параметри Стокса і поляризаційна матриця розсіювання.

Результати досліджень та їх аналіз. Атмосферні утворення, як об'єкти радіолокаційного спостереження, являють собою сукупність водяних крапель, які випадають або зависають, і льодяних кристалів. Вони і є відбивачами падаючої на них електромагнітної енергії. Поле, відбите окремою гідрометеорною частинкою, може бути записано у вигляді [3]

$$E_{\text{вд}} = S E_{\text{вн}}, \quad (1)$$

де $E_{\text{вн}}$ і $E_{\text{вд}}$ - напруженості полів випроміненої і відбитої хвиль відповідно,

S - коефіцієнт, що характеризує відбивальні властивості гідрометеорної частинки.

Сигнали, відбиті від елементарних відбивачів, будуть складатися в точці прийому з випадковими амплітудами і фазами. Це обумовлено різними відбивальними властивостями як по амплітуді, так і по фазі льодяних і водяних частинок різних розмірів, випадковим характером зміни концентрації частинок внаслідок процесів випаровування, коагуляції і кристалізації, а також динамічними процесами, які відбуваються всередині атмосферних утворень. Отже сигнали, відбиті від метеорологічних об'єктів, будуть змінюватися в часі випадковим чином, внаслідок чого вираз (1) для сукупності відбивачів може бути переписаний у вигляді

$$E_{\text{вд}}(t) = S(t) E_{\text{вн}}(t), \quad (2)$$

де $S(t)$ - комплексний коефіцієнт, що змінюється в часі випадковим чином, як по модулю, так і по фазі. Він описує відбивальні властивості сукупності відбивачів.

У загальному випадку випромінену електромагнітну хвилю можна вважати поляризованою еліптично. Аналітичне завдання поляризації такої хвилі може бути і за допомогою параметрів Стокса. При завданні поляризації випроміненої і відбитої

хвиль параметрами Стокса поляризаційний стан випроміненої і відбитої хвиль будуть описуватися матрицями-стовпцями

$$\begin{bmatrix} I_{\text{вп}} \\ Q_{\text{вп}} \\ U_{\text{вп}} \\ V_{\text{вп}} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} I_{\text{вд}} \\ Q_{\text{вд}} \\ U_{\text{вд}} \\ V_{\text{вд}} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

в результаті чого вираз (2) для такого способу завдання поляризації буде мати вигляд:

$$\begin{bmatrix} I_{\text{вд}} \\ Q_{\text{вд}} \\ U_{\text{вд}} \\ V_{\text{вд}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\text{вп}} \\ Q_{\text{вп}} \\ U_{\text{вп}} \\ V_{\text{вп}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

або в матричній формі

$$[S_{\text{вд}}] = [T] \cdot [S_{\text{вп}}], \quad (5)$$

де $[T]$ - матриця дійсних коефіцієнтів, які повністю визначають відбивальні властивості метеорологічних об'єктів.

Ця матриця являє собою аналог матриці Мюлера в оптиці. Ми будемо називати її матрицею розсіювання за Стоксом (по запису параметрів поляризації матрицею-стовпцем Стокса). Відзначимо, що елементи матриці розсіювання за Стоксом в залежності від характеру використаних параметрів Стокса (миттєвих або осереднених) можуть бути як випадковими дійсними числами, так і постійними величинами.

Перевага матричного задання відбивальних властивостей метеорологічних об'єктів полягає у тому, що воно дозволяє розділити параметри відбитої хвилі і радіолокаційні властивості відбивальних атмосферних утворень, і шляхом вимірювання цих параметрів отримати повну інформацію про відбивальні властивості метеорологічних об'єктів. Очевидно, що при інших способах задання поляризації електромагнітних хвиль матриці розсіювання будуть мати інший вид. Матричний підхід до опису відбивальних властивостей метеорологічних об'єктів дозволяє вирішити на його основі задачі ідентифікації і розпізнавання різних типів хмар і опадів, що особливо важливо в службі штормових попереджень і активних впливів на атмосферні процеси.

Нехай об'єкт радіолокаційного спостереження являє собою метеорологічну ціль у вигляді зони хмарності або опадів і опромінюється електромагнітною хвилею з вектором Стокса, який має складові $I_{\text{вп}}$, $Q_{\text{вп}}$, $U_{\text{вп}}$, $V_{\text{вп}}$. Кожна зі складових визначається співвідношенням

$$\begin{aligned} I_{\text{вп}} &= E_y^2 + E_x^2, & Q_{\text{вп}} &= E_y^2 - E_x^2, \\ U_{\text{вп}} &= 2 E_y E_x \cos(\varphi_y - \varphi_x); & V_{\text{вп}} &= 2 E_y E_x \sin(\varphi_y - \varphi_x), \end{aligned} \quad (6)$$

де E_x і E_y - амплітуди ортогональних лінійно поляризованих складових хвиль в базисі (1,2),

$(\varphi_y - \varphi_x)$ - різниця фаз між ними.

Відзначимо, що складові вектора Стокса випроміненої хвилі завжди відомі заздалегідь.

При відбиванні падаючої хвилі об'єктом радіолокаційного спостереження (в нашому випадку хмарами і опадами) відбувається зміна поляризації і відбиті сигнали виявляються частково поляризованими навіть у тому випадку, коли опромінюються повністю поляризованою хвилею. У цьому випадку чотири параметри $I_{\text{вд}}$, $Q_{\text{вд}}$, $U_{\text{вд}}$, $V_{\text{вд}}$ вектора Стокса, які повністю визначають поляризаційний стан відбитої хвилі, будуть лінійними функціями чотирьох параметрів $I_{\text{вп}}$, $Q_{\text{вп}}$, $U_{\text{вп}}$, $V_{\text{вп}}$ вектора Стокса випроміненої хвилі. В результаті чого можна записати:

$$\begin{aligned} I_{\text{вд}} &= T_{11} I_{\text{вп}} + T_{12} Q_{\text{вп}} + T_{13} U_{\text{вп}} + T_{14} V_{\text{вп}} \\ Q_{\text{вд}} &= T_{21} I_{\text{вп}} + T_{22} Q_{\text{вп}} + T_{23} U_{\text{вп}} + T_{24} V_{\text{вп}} \\ U_{\text{вд}} &= T_{31} I_{\text{вп}} + T_{32} Q_{\text{вп}} + T_{33} U_{\text{вп}} + T_{34} V_{\text{вп}} \\ V_{\text{вд}} &= T_{41} I_{\text{вп}} + T_{42} Q_{\text{вп}} + T_{43} U_{\text{вп}} + T_{44} V_{\text{вп}} \end{aligned} \quad (7)$$

Отримана система лінійних рівнянь може бути записана в матричній формі (4), елементи якої є дійсними числами, тому що всі параметри обох векторів теж є дійсними числами і являють собою енергетичні характеристики хвилі.

Очевидно, що для хмар і опадів різної природи і мікрофізичної структури, а, отже, які мають різні відбивальні властивості, структура матриці T буде різною, тобто будуть різними її коефіцієнти T_{ik} ($i=1, 2, 3, 4$), $k=(1, 2, 3, 4)$. Вказану різницю і пропонується використовувати для ідентифікації хмар і опадів по певних класах, число яких може бути визначено в залежності від зміни елементів для різних типів атмосферних утворень.

Для повного визначення відбивальних властивостей атмосферних утворень, зокрема, з метою вирішення задачі ідентифікації хмар і опадів по певних класах в залежності від структури матриці T повинні бути виміряні всі її елементи T_{ik} . Вимірювання вказаних елементів може бути виконано шляхом опромінення досліджуваного об'єкта послідовно хвилями чотирьох фіксованих поляризацій.

Для розрахунку коефіцієнтів матриці запишемо вектор Стокса опроміненої хвилі чотирьох поляризацій

$$\begin{aligned} S'_{\text{вп}} &= \left\{ |E_0|^2, -|E_0|^2, 0, 0 \right\}, \quad \beta = 90^\circ; \\ S'_{\text{вп}} &= \left\{ |E_0|^2, -|E_0|^2, 0, 0 \right\}, \quad \beta = 0^\circ; \\ S'_{\text{вп}} &= \left\{ |E_0|^2, 0, |E_0|^2, 0 \right\}, \quad \beta = 45^\circ; \\ S'_{\text{вп}} &= \left\{ |E_0|^2, 0, 0, |E_0|^2 \right\}, \quad \text{колова поляризація} \end{aligned} \quad (8)$$

і розв'яжемо систему лінійних рівнянь

$$I'_{\text{вд}} = T_{11} E_0^2 + T_{12} E_0^2 + T_{13} 0 + T_{14} 0;$$

$$\begin{aligned}
 I''_{\epsilon\delta} &= T_{11} E_0^2 - T_{12} E_0^2 + T_{13} 0 + T_{14} 0; \\
 I'''_{\epsilon\delta} &= T_{11} E_0^2 + T_{12} 0 + T_{13} E_0^2 + T_{14} 0; \\
 I''''_{\epsilon\delta} &= T_{11} E_0^2 + T_{12} 0 + T_{13} 0 + T_{14} E_0^2; \\
 Q'_{\epsilon\delta} &= T_{21} E_0^2 + T_{22} E_0^2 + T_{23} 0 + T_{24} 0; \\
 Q''_{\epsilon\delta} &= T_{21} E_0^2 - T_{22} E_0^2 + T_{23} 0 + T_{24} 0; \\
 Q'''_{\epsilon\delta} &= T_{21} E_0^2 + T_{22} 0 + T_{23} E_0^2 + T_{24} 0; \\
 Q''''_{\epsilon\delta} &= T_{21} E_0^2 + T_{22} 0 + T_{23} 0 + T_{24} E_0^2; \\
 U'_{\epsilon\delta} &= T_{31} E_0^2 + T_{32} E_0^2 + T_{33} 0 + T_{34} 0; \\
 U''_{\epsilon\delta} &= T_{31} E_0^2 - T_{32} E_0^2 + T_{33} 0 + T_{34} 0; \\
 U'''_{\epsilon\delta} &= T_{31} E_0^2 + T_{32} 0 + T_{33} E_0^2 + T_{34} 0; \\
 U''''_{\epsilon\delta} &= T_{31} E_0^2 + T_{32} 0 + T_{33} 0 + T_{34} E_0^2; \\
 V'_{\epsilon\delta} &= T_{41} E_0^2 + T_{42} E_0^2 + T_{43} 0 + T_{44} 0; \\
 V''_{\epsilon\delta} &= T_{41} E_0^2 - T_{42} E_0^2 + T_{43} 0 + T_{44} 0; \\
 V'''_{\epsilon\delta} &= T_{41} E_0^2 + T_{42} 0 + T_{43} E_0^2 + T_{44} 0; \\
 V''''_{\epsilon\delta} &= T_{41} E_0^2 + T_{42} 0 + T_{43} 0 + T_{44} E_0^2;
 \end{aligned} \tag{9}$$

звідси

$$\begin{aligned}
 \frac{I'_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{11} + T_{12}; & \frac{I''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{11} - T_{12}; \\
 \frac{I'''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{11} + T_{13}; & \frac{I''''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{11} + T_{14}; \\
 \frac{Q'_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{21} + T_{22}; & \frac{Q''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{21} - T_{22}; \\
 \frac{Q'''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{21} + T_{23}; & \frac{Q''''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{21} + T_{24}; \\
 \frac{U'_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{31} + T_{32}; & \frac{U''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{31} - T_{32}; \\
 \frac{U'''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{31} + T_{33}; & \frac{U''''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{31} + T_{34}; \\
 \frac{V'_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{41} + T_{42}; & \frac{V''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{41} - T_{42}; \\
 \frac{V'''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{41} + T_{43}; & \frac{V''''_{\epsilon\delta}}{E_0^2} &= T_{41} + T_{44}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

З врахуванням того, що

$$\begin{bmatrix} I_{\omega\delta} \\ Q_{\omega\delta} \\ U_{\omega\delta} \\ V_{\omega\delta} \end{bmatrix} = \left| P_{c\phi} \right|^2 \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

і в результаті розв'язання системи рівнянь (9) отримано всі шістнадцять коефіцієнтів поляризаційної матриці розсіювання, кожен з яких виражається таким чином:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(S'_0 + S''_0) & \frac{1}{2}(S'_0 - S''_0) & S'''_0 - \frac{1}{2}(S'_0 + S''_0) & S'''_0 - \frac{1}{2}(S'_0 + S''_0) \\ \frac{1}{2}(S'_1 + S''_1) & \frac{1}{2}(S'_1 - S''_1) & S'''_1 - \frac{1}{2}(S'_1 + S''_1) & S'''_1 - \frac{1}{2}(S'_1 + S''_1) \\ \frac{1}{2}(S'_2 + S''_2) & \frac{1}{2}(S'_2 - S''_2) & S'''_2 - \frac{1}{2}(S'_2 + S''_2) & S'''_2 - \frac{1}{2}(S'_2 + S''_2) \\ \frac{1}{2}(S'_3 + S''_3) & \frac{1}{2}(S'_3 - S''_3) & S'''_3 - \frac{1}{2}(S'_3 + S''_3) & S'''_3 - \frac{1}{2}(S'_3 + S''_3) \end{bmatrix} \cdot \left| \frac{P_{c\phi}}{E_0} \right|^2. \quad (12)$$

Коефіцієнт T_{11} матриці являє собою середнє значення повної інтенсивності відбитої хвилі при випромінєнні хвилі вертикальної і горизонтальної поляризації. T_{12} - є піврізниця повних інтенсивностей луно-сигналу при тих же поляризаціях опромінєної хвилі. T_{13} - різниця між повною інтенсивністю при опромінєнні хвилею лінійної поляризації з нахилом вектора в 45° і значенням коефіцієнта T_{11} . T_{14} - це різниця між повною інтенсивністю луно-сигналу метеоцілі, яка опромінєна хвилею колової поляризації і значенням T_{11} . T_{21} - півсума других параметрів Стокса луно-сигналів при роботі з вертикальною і горизонтальною поляризаціями випромінєної хвилі. T_{22} - піврізниця других параметрів Стокса луно-сигналів при роботі з такими ж хвилями. T_{23} - різниця другого параметра Стокса луно-сигналу при роботі з випромінєною хвилею лінійної поляризації з вектором нахилу в 45° і коефіцієнтом T_{21} . T_{24} - різниця другого параметру Стокса луно-сигналу при роботі з хвилею, яка поляризована по колу і коефіцієнтом T_{21} . T_{31} - півсума третіх параметрів Стокса при роботі з вертикальною і горизонтальною поляризаціями, T_{32} - піврізниця цих параметрів при роботі з тими же поляризаціями, T_{33} - різниця третього параметра Стокса при роботі з хвилею, яка поляризована під кутом 45° і коефіцієнтом T_{31} , T_{34} - різниця четвертого параметра Стокса при роботі з хвилею поляризованою по колу і коефіцієнтом T_{31} . T_{41} - півсума четвертих параметрів Стокса при роботі з хвилею вертикальної і горизонтальної поляризації, T_{42} - піврізниця цих же параметрів для вертикально і горизонтально поляризованих хвиль. T_{43} - різниця четвертого параметра Стокса луно-сигналу при роботі з хвилею, яка поляризована під кутом 45° і

коефіцієнтом T_{41} . T_{44} - різниця четвертого параметра Стокса при роботі з хвилею колової поляризації і коефіцієнтом T_{41} .

Використовуючи параметри Стокса, можна розрахувати коефіцієнти поляризаційної матриці для зливових опадів, шаруватих і купчастих хмар, у яких

$$G = \frac{g}{g_{сф}}, \quad G_1 = \frac{g'}{g_{сф}}, \quad \text{а}$$

$$g = \frac{abc}{3} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{1 + (\varepsilon - 1)n}, \quad g' = \frac{abc}{3} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{1 + (\varepsilon - 1)n'},$$

$$n = n_a = \frac{\rho^2}{2\sqrt{(1 - \rho^2)^3}} \left(\ln \frac{1 + \sqrt{1 - \rho^2}}{1 - \sqrt{1 - \rho^2}} - 2\sqrt{1 - \rho^2} \right),$$

$$n' = n_a = \frac{\rho^2}{\sqrt{(1 - \rho^2)^3}} \left(\sqrt{\rho^2 - 1} - \operatorname{arctg} \sqrt{\rho^2 - 1} \right),$$

де ε - діелектрична проникність речовини частинок хмар і опадів;

a, b, c - відповідно осі еліпсоїда, яким апроксимуються частинки хмар і опадів.

Так, для зливових опадів

$$T_{11} = \frac{1}{2} (G^2 + G_1^2); \quad T_{12} = \frac{1}{2} (G^2 - G_1^2);$$

$$T_{13} = T_{14} = 0; \quad T_{21} = \frac{1}{2} (G^2 + G_1^2);$$

$$T_{22} = \frac{1}{2} (G^2 - G_1^2); \quad T_{23} = T_{24} = 0;$$

$$T_{31} = T_{32} = 0;$$

$$T_{33} = \frac{GG_1 \left\{ n n' \left[\varepsilon_2^2 (\varepsilon_1 - 1)^2 \right] + (n + n')(\varepsilon_1 - 1) + 1 \right\}}{\sqrt{[1 + n(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n^2 \varepsilon_2^2} \sqrt{[1 + n'(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n'^2 \varepsilon_2^2}};$$

$$T_{34} = \frac{GG_1 \varepsilon_2 (n - n')}{\sqrt{[1 + n(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n^2 \varepsilon_2^2} \sqrt{[1 + n'(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n'^2 \varepsilon_2^2}};$$

$$T_{41} = T_{42} = 0;$$

$$T_{43} = \frac{GG_1 \varepsilon_2 (n - n')}{\sqrt{[1 + n(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n^2 \varepsilon_2^2} \sqrt{[1 + n'(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n'^2 \varepsilon_2^2}} ;$$

$$T_{44} = \frac{GG_1 \left\{ nn' \left[\varepsilon_2^2 (\varepsilon_1 - 1)^2 \right] + (n + n')(\varepsilon_1 - 1) + 1 \right\}}{\sqrt{[1 + n(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n^2 \varepsilon_2^2} \sqrt{[1 + n'(\varepsilon_1 - 1)]^2 + n'^2 \varepsilon_2^2}} ; \quad (13)$$

для шаруватих хмар

$$T_{11} = \frac{1}{2} (G^2 + G_1^2) ; \quad T_{12} = T_{13} = T_{14} = 0 ;$$

$$T_{21} = 0 ;$$

$$T_{21} = \frac{1}{2} (G^2 + G_1^2) ; \quad T_{23} = T_{24} = 0 ;$$

$$T_{31} = T_{32} = 0 ;$$

$$T_{31} = \frac{1}{2} (G^2 + G_1^2) ; \quad T_{34} = 0 ;$$

$$T_{41} = T_{42} = T_{43} = 0 ; \quad T_{44} = \frac{1}{2} (G^2 + G_1^2) ; \quad (14)$$

для купчастих хмар

$$T_{11} = \frac{1}{15} (4G^2 + 2GG_1 + 9G_1^2) ; \quad T_{12} = T_{13} = T_{14} = 0 ;$$

$$T_{21} = 0 ;$$

$$T_{22} = \frac{1}{15} (2G^2 + 6GG_1 + 7G_1^2) ; \quad T_{23} = T_{24} = 0 ;$$

$$T_{31} = T_{32} = 0 ;$$

$$T_{33} = \frac{1}{15} (4G^2 + 2GG_1 + 9G_1^2) ; \quad T_{34} = 0 ;$$

$$T_{41} = T_{42} = T_{43} = 0 ;$$

$$T_{44} = \frac{1}{15} (4G^2 + 2GG_1 + 9G_1^2) . \quad (15)$$

Результати розрахунку коефіцієнтів матриці Стокса представлені в табл.1 – 9.

Таблиця 1 - Коефіцієнти матриці розсіювання для водяних частинок при факторі форми $\rho = 0,200$

Поляризація випроміненої хвилі				
Матриця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертавання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 13,06603 \\ 12,55672 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12,55672 \\ 13,06603 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 3,58708 \\ -0,42767 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,42767 \\ 3,58708 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 13,06603 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 8,33926 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 13,06603 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 13,06603 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 7,61999 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 5,09904 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 7,61999 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 7,61999 \end{bmatrix}$

Таблиця 2 - Коефіцієнти матриці розсіювання для водяних частинок при факторі форми $\rho = 0,500$

Поляризація випроміненої хвилі				
Матриця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертавання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 2,05730 \\ 1,39739 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,39739 \\ 2,05730 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,50928 \\ -0,04326 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,04326 \\ 1,50928 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 2,05730 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,78360 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 2,05730 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 2,05730 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,51852 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,37255 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,51852 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,51852 \end{bmatrix}$

Таблиця 3 - Коефіцієнти матриці розсіювання для водяних частинок при факторі форми $\rho = 1,500$

Поляризація випроміненої хвилі				
Мат-риця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 0,99787 \\ -0,42871 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,42871 \\ 0,99787 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,90102 \\ 0,01086 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ -0,01086 \\ 0,90102 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 0,99787 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,94947 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,99787 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,99787 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,12787 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,10206 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,12787 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,12787 \end{bmatrix}$

Таблиця 4 - Коефіцієнти матриці розсіювання для водяних частинок при факторі форми $\rho = 2,000$

Поляризація випроміненої хвилі				
Мат-риця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,17059 \\ -0,75998 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,75998 \\ 1,17059 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,89015 \\ 0,01826 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ -0,01826 \\ 0,89015 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,17059 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,03046 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,17059 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,17059 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,38655 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,31181 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,38655 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,38655 \end{bmatrix}$

Таблиця 5 - Коефіцієнти матриці розсіювання для льодяних частинок при факторі форми $\rho = 0,200$

Поляризація випроміненої хвилі				
Матриця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,49137 \\ 0,75648 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,75648 \\ 1,49137 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,26630 \\ -0,22005 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,22005 \\ 1,26630 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,49137 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,38832 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,49137 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,49137 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,21173 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,15677 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,21173 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,21173 \end{bmatrix}$

Таблиця 6 - Коефіцієнти матриці розсіювання для льодяних частинок при факторі форми $\rho = 0,500$

Поляризація випроміненої хвилі				
Матриця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,18168 \\ 0,34898 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,34898 \\ 1,18168 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,12799 \\ -0,04714 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,04714 \\ 1,12799 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,18188 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,15533 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,18188 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,18188 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,05833 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,04427 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,05833 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,05833 \end{bmatrix}$

Таблиця 7 - Коефіцієнти матриці розсіювання для льодяних частинок при факторі форми $\rho = 1,500$

Поляризація випроміненої хвилі				
Матриця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 0,96313 \\ -0,18699 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,18699 \\ 0,96313 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,94466 \\ 0,01660 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ -0,01660 \\ 0,94466 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 0,96313 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,95397 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,96313 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,96313 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,02302 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,01813 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,02302 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,02302 \end{bmatrix}$

Таблиця 8 - Коефіцієнти матриці розсіювання для льодяних частинок при факторі форми $\rho = 5,000$

Поляризація випроміненої хвилі				
Матриця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертання
<u>Злилові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,11163 \\ -0,66753 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,66753 \\ 1,11163 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,88587 \\ -0,42767 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ -0,07313 \\ 3,58708 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,11163 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,00026 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,11163 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,11163 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,30444 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,24504 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,30444 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,30444 \end{bmatrix}$

Таблиця 9 - Коефіцієнти матриці розсіювання для льодяних частинок при факторі форми $\rho = 8,000$

Поляризація випроміненої хвилі				
Матриця	Лінійна вертикальна	Лінійна горизонтальна	Лінійна з кутом поляризації 45°	Колова правого обертання
<u>Зливові опади</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,21215 \\ -0,82008 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0,82008 \\ 1,21215 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,88561 \\ 0,11171 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ -0,11171 \\ 0,88561 \end{bmatrix}$
<u>Шаруваті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,21215 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,05239 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,21215 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,21215 \end{bmatrix}$
<u>Купчасті хмари</u>				
$T =$	$\begin{bmatrix} 1,44291 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 1,35770 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,44291 \\ 0,00000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,00000 \\ 0,00000 \\ 0,00000 \\ 1,44291 \end{bmatrix}$

Висновки.

1. Розроблена поляризаційна модель відбивальних властивостей хмар і опадів у вигляді поляризаційної матриці розсіювання дозволяє провести радіолокаційне розпізнавання хмар на різних стадіях їхнього розвитку і опадів різної інтенсивності.
2. Отримані результати при впровадженні в оперативну практику нового покоління метеорологічних радіолокаторів з поляризаційною селекцією луно-сигналів дозволяють успішно здійснювати прогноз небезпечних явищ погоди, пов'язаних з купчасто-дощовою хмарністю.
3. Отримані в статті результати будуть надалі використані для розробки поляризаційних методів і технічних засобів виявлення і розпізнавання хмар і пов'язаних з ними небезпечних явищ погоди.

Перелік використаних джерел

1. Степаненко В. Д. Радиолокация в метеорологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 350 с.
2. Павлов Н. Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 430 с.
3. Корбан В. Х. Поляризаційна селекція хмар і опадів. – Одеса, 2004. – 248 с.

Идентификация облаков и осадков по поляризационным параметрам.

Корбан В.Х., Дегтярева Л.Н., Корбан Д.В.

В статье рассматривается возможность распознавания облаков и связанных с ними опасных явлений погоды по поляризационным сигналам их эхо-сигналов.

Ключевые слова: поляризация, параметры Стокса, матрица Стокса, кучево-дождевые облака, осадки.

Identification of clouds and precipitations on their polarizing parameters.

Korban V.Kh., Degtyareva L.N., Korban D.V.

The opportunity of reflection of clouds and dangerous weather phenomena, connected to them, by the help of the reflected polarized signals is investigated in this article.

Key words: polarization, parameters Stocks', matrix Stocks', cumulonimbus clouds, precipitations.