

А.М. Лінкова

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: gannalinkova@gmail.com

Вплив помилки розрахунку питомої ефективної поверхні розсіювання на результат відновлення інтенсивності дощу за допомогою двочастотного зондування

***Предмет і мета роботи.** Кількість опадів є важливою інформацією для агрокліматичного обґрунтування агротехнічних і меліоративних заходів, що безпосередньо впливають на врожай сільськогосподарських культур. Обернені задачі відновлення інтенсивності дощу за допомогою дистанційних методів належать до некоректних задач математичної фізики й описуються нелінійним інтегральним рівнянням. Метою цієї роботи є аналіз впливу помилок вимірювання прийнятої потужності двочастотного радара на результати відновлення інтенсивності, отриманої за допомогою запропонованого раніше методу розв'язання оберненої задачі.*

***Методи і методологія роботи.** Чисельне моделювання з використанням підходу до розв'язання інтегрального рівняння розсіювання на основі методів регуляризації для випадку двочастотного зондування в НВЧ-діапазоні.*

***Результати роботи.** Проведено чисельне моделювання відновлення інтенсивності дощу в діапазоні 1...30 мм/год для робочих довжин хвиль 0,82 і 3,2 см та різних значень помилок прийнятої потужності. Показано, що більший вплив на достовірність відновлення інтенсивності чинить помилка розрахунку питомої ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) хвилі меншої довжини. Помилка обчислення питомої ЕПР на більшій довжині хвилі практично не впливає, якщо інтенсивність дощу менше 15 мм/год, при цьому для більш сильних дощів вплив також незначний (не більше 5 %).*

***Висновок.** Аналіз результатів показав, що помилка відновлення інтенсивності залишається в прийнятних межах (менше 20 %), якщо помилка вимірювання питомої ЕПР на меншій довжині хвилі не перевищує 15 %, а для більшої довжини хвилі вона може сягати 30 %. Іл. 2. Бібліогр.: 18 назв.*

***Ключові слова:** обернена задача, інтегральне рівняння, інтенсивність дощу.*

В останні десятиліття у всьому світі відбувається суттєва зміна кліматичних умов, що впливають на виробничу діяльність різних галузей економіки, в тому числі і сільського господарства [1].

Опади відіграють важливу роль у формуванні запасів ґрунтової вологи протягом усього року і є основним джерелом вологи для сільськогосподарських угідь [2]. Урожай сільськогосподарських культур значною мірою залежить від кількості опадів упродовж вегетаційного періоду, а врахування режиму опадів необхідне для обґрунтування меліоративних заходів, технології обробітку сільськогосподарських культур (строків сівби і висаджування розсади, глибини загортання насіння та ін.), визначення термінів і способів їх збирання [2].

Обернені задачі дистанційного зондування рідких опадів, як правило, описуються інтегральним рівнянням Фредгольма 1-го роду [3]. Для розв'язання такого типу обернених задач в радіометеорології широко використовується параметризація функції розподілу крапель дощу за розмірами [4–7], коли початкова задача відновлення невідомої функції розподілу може бути зведена до визначення параметрів обраного розподілу крапель за розмірами. При цьому невід'ємною проблемою існуючих досліджень є те, що використання параметризації дозволяє з високою точністю відновити параметри рідких опадів тільки в рамках обраної моделі розподілу крапель за розмірами, що – в порівнянні з випадком реальних розподілів – може призвести до значної помилки відновлення.

У роботах [8, 9] запропоновано інший метод розв'язання інтегрального рівняння, що використовує регуляризацію і не вимагає параметризації розподілу крапель за розмірами. До цього часу регуляризацію активно застосовували для дистанційного зондування атмосфери в оптичному діапазоні [10], однак у радіометеорології вона практично не використовувалася через обмеження технічних можливостей створення багаточастотних радарів у мікрохвильовому діапазоні хвиль.

У попередніх дослідженнях [8, 9] показано, що для різних типів розподілу крапель за розмірами залежність питомої ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) дощу від довжини хвилі монотонно зменшується для довжин хвиль понад 8 мм і може бути апроксимована двопараметричними функціями, параметри яких можна визначити на основі двочастотного зондування опадів. Це дозволило сформулювати підхід до розв'язання інтегрального рівняння розсіювання з використанням методів регуляризації [11]. Зокрема, метод регуляризації Тихонова [12] був використаний для отримання стійких розв'язків інтегрального рівняння. Числове моделювання показало [8, 9], що помилка відновлення інтенсивності дощу залежить як від верхньої межі суми, так і від параметра регуляризації. Для вибору їх відповідних значень було запропоновано використовувати критерій мінімуму норми вектора нев'язки між виміряними даними двочастотного зондування і результатами обчислення питомої ЕПР, які знаходять шляхом розв'язання оберненої задачі. Запропонований критерій не забезпечує мінімальну помилку, але дозволяє отримати помилку відновлення інтенсивності менше 20 % для дощів з інтенсивністю $I > 5$ мм/год, які становлять найбільший інтерес для практичних застосувань.

Зазначені результати без врахування помилок розрахунку питомої ЕПР на двох частотах можуть сильно вплинути на помилку відновлення. У зв'язку з цим доцільно оцінити цей вплив на результати відновлення інтенсивності, отримані шляхом розв'язання інтегрального рівняння розсіювання методом регуляризації.

1. Розв'язання інтегрального рівняння розсіювання. Нижче наведено короткий опис методу відновлення інтенсивності дощу, запропонований у роботах [8, 9].

Прийнята потужність сигналів, відбитих від зони дощу, записується таким чином [13]:

$$P(R_i, \lambda) = \frac{P_T(\lambda) G_A^2(\lambda) \lambda^2 V_{ef}(R_i, \lambda)}{(4\pi)^3 R_i^4 L_0} \times \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_p(\lambda, d) N(R_i, d) dd \times \frac{1}{\exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_1} dR \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_{at}(\lambda, d) N(R_i, d) dd \right\}}, \quad (1)$$

де $P_T(\lambda)$ – потужність передавача; $G_A(\lambda)$ – коефіцієнт посилення приймально-передавальної антени; $\int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_p(\lambda, d) N(R_i, d) dd = \sigma_0^r(R_i, \lambda)$ –

питома ЕПР; $V_{ef}(R_i, \lambda)$ – ефективний розсіювальний об'єм; $R_i = R_0 + (i - 1)\Delta R$ – відстань від радіолокаційної станції (РЛС) до розсіювального об'єму, $i = 1 \dots N_R$, $N_R = (R_1 - R_0) / \Delta R$ – кількість елементів розділення за дальністю; ΔR – розділення за дальністю; λ – довжина хвилі; R_0 – відстань від РЛС до початку зони дощу; R_1 – відстань від РЛС до кінця зони дощу; $\sigma_p(\lambda, d)$ – ЕПР окремих частинок; $N(R_i, d)$ – розподіл крапель за розмірами; d – діаметр крапель; d_{\min} і d_{\max} – мінімальний і максимальний діаметри крапель;

$\exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_1} dR \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_{at}(\lambda, d) N(R_i, d) dd \right\} = K(R_i, \lambda)$ – ослаблення сигналу при поширенні на трасі; $\sigma_{at}(\lambda, d)$ – поперечний переріз ослаблення окремої частинки; L_0 – коефіцієнт втрат, який враховує різні чинники, в тому числі ослаблення сигналу в тратах радара, вплив підстильної поверхні та ін. [14].

У спрощеній формі рівняння (1) набуде вигляду

$$P(R_i, \lambda) = \frac{C_r(\lambda) V_{ef}(R_i, \lambda) \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_p(\lambda, d) N(R_i, d) dd}{R_i^4 \exp \left\{ 2 \int_{R_0}^{R_1} dR \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_{at}(\lambda, d) N(R_i, d) dd \right\}}, \quad (2)$$

де $C_r(\lambda) = P_T(\lambda) G_A^2(\lambda) \lambda^2 / ((4\pi)^3 L_0)$ – деяка стала радара.

Для обчислення значення питомої ЕПР дощу за результатами експериментів згідно з (2) необхідне знання ослаблення сигналу на трасі. На цей час розроблено декілька різних способів урахування ослаблення сигналів [15–17], які дозволяють оцінити величину загасання в кожному елементі розділення за дальністю. Не зупиняючись на конкретному способі врахування коефіцієнта ослаблення на трасі поширення, в якості першого етапу розглянемо результати розв’язання оберненої задачі шляхом числового рішення інтегрального рівняння в i -му елементі розділення за дальністю при $K(R_i, \lambda) \rightarrow 1$:

$$\sigma_0^r(R_i, \lambda) = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \sigma_p(\lambda, d) N(R_i, d) dd, \quad (3)$$

в якому питома ЕПР полідисперсного середовища $\sigma_0^r(R_i, \lambda)$ обчислюється за результатами радіолокаційних вимірювань як $\sigma_0^r(R_i, \lambda) = \frac{P(R_i, \lambda) R_i^4}{C_r(\lambda) V_{ef}(R_i, \lambda)}$. На подальших етапах передбачається корекція результатів з урахуванням ослаблення сигналів.

Далі розглянемо розв’язання рівняння (3) для одного елемента розділення за дальністю (залежність від дальності відсутня). Це рівняння є лінійним інтегральним рівнянням Фредгольма 1-го роду [3], в якому ЕПР окремих крапель $\sigma_p(\lambda, D)$ виступає в якості ядра рівняння, розподіл крапель за розмірами $N(D)$ – в якості шуканої функції, а частотна залежність питомої ЕПР $\sigma_0^r(\lambda)$ є вільним членом інтегрального рівняння.

Розглянемо підхід до розв’язання рівняння (3), запропонований в роботах [8, 9]. У [9] інтегральне рівняння (3) трансформовано в систему лінійних алгебричних рівнянь (СЛАР) шляхом заміни інтеграла підсумовуванням за діаметром. Отримана при цьому система рівнянь належить до класу некоректних математичних задач [18], для розв’язання яких доцільно застосовувати методи регуляризації [11, 12]. Зокрема, для отримання стійких розв’язків рівняння в [8, 9] пропонується використовувати регуляризацію Тихонова [12]. Крім цього, для розв’язання отриманої СЛАР необхідно виміряти залежність питомої ЕПР від довжини хвилі. Однак такі вимірювання важко виконати че-

рез технічні проблеми, що пов’язані з розробкою радарів, частота яких може змінюватися в широкому діапазоні (багаточастотні радари).

У зв’язку з цим у [8] було розглянуто поведінку питомої ЕПР $\sigma_0^r(\lambda)$ в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 1 \text{ мм} \dots 5 \text{ см}$ і показано, що для $\lambda > 8 \dots 10 \text{ мм}$ криві монотонно спадають і можуть бути апроксимовані двопараметричними функціями, що зручно в разі використання двочастотного зондування опадів. Зокрема, в роботі [8] для апроксимації залежності $\sigma_0^r(\lambda)$ застосовані експоненціальна функція, степенева, а також їх середнє, коефіцієнти яких можуть бути визначені за результатами двочастотного зондування на робочих довжинах хвиль λ_1^o і λ_2^o .

Використання апроксимованої залежності $\sigma_0^{ap}(\lambda)$ призводить до трансформації СЛАР, в якій вільний член замінюється на стовпець апроксимованих значень питомої ЕПР:

$$\mathbf{B}' = \left[\sigma_0^{ap}(\lambda_1) \dots \sigma_0^{ap}(\lambda_i) \dots \sigma_0^{ap}(\lambda_M) \right]^T.$$

З урахуванням вищесказаного вихідна задача (3) може бути зведена до наступної СЛАР, яка в матричному вигляді [8, 9] записується як

$$\mathbf{A}^T \mathbf{B}' = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \alpha_r \mathbf{E}) \mathbf{X}, \quad (4)$$

де \mathbf{A} – відома квадратна матриця з коефіцієнтами $A_{i,j} = \Delta d \sigma_p(d_j, \lambda_i)$; $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_j, \dots, x_M]^T$ – стовпець невідомих; $\mathbf{B}' = [b_1, \dots, b_i, \dots, b_M]^T$ – стовпець значень питомої ЕПР у заданому діапазоні довжин хвиль $\lambda = \lambda_1 \dots \lambda_M$; $x_j = N(d_j)$; $b_i = \sigma_0^r(\lambda_i)$; $j, i = 1 \dots M$; $M = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{\Delta d}$ – верхня межа підсумовування (кількість дискретних значень діаметра); Δd – крок за діаметром (різниця між двома сусідніми дискретними значеннями діаметра); \mathbf{E} – одинична матриця; \mathbf{A}^T – транспонована матриця \mathbf{A} ; α_r – параметр регуляризації.

Проведене в [9] чисельне моделювання показало, що помилка відновлення інтенсивності дощу залежить як від параметра регуляризації, так і від значення M , що вимагає вибору їх оптимальних значень під час розв’язання оберненої задачі. Для цього в [8, 9] пропонується використовувати критерій мінімуму норми вектора нев’язки експериментально отриманих даних двочастотного зондування $\sigma_0^r(\lambda_1^o), \sigma_0^r(\lambda_2^o)$ і відновлених значень питомої

ЕПР $\sigma_0^c(\lambda_1, \alpha_{ri}, M_j)$, $\sigma_0^c(\lambda_2, \alpha_{ri}, M_j)$

$$\Delta^\sigma = \min \left[\sqrt{(\Phi_1 - \Phi_2)^2 + (\Phi_3 - \Phi_4)^2} \right], \quad (5)$$

де $\Phi_1 = \sigma_0^r(\lambda_1^o)$; $\Phi_2 = \sigma_0^c(\lambda_1, \alpha_{ri}, M_j)$; $\Phi_3 = \sigma_0^r(\lambda_2^o)$; $\Phi_4 = \sigma_0^c(\lambda_2, \alpha_{ri}, M_j)$; $i = 1 \dots L_\alpha$, $j = 1 \dots L_M$ – кількість значень параметра регуляризації і верхньої межі суми в деякому обраному діапазоні відповідно. У виразі (5) відновлені значення питомої ЕПР $\sigma_0^c(\lambda_1, \alpha_{ri}, M_j)$, $\sigma_0^c(\lambda_2, \alpha_{ri}, M_j)$ обчислюються шляхом розв'язання прямої задачі (3) з використанням отриманого розв'язку оберненої задачі $N^r(d)$ для заданих α_{ri} і M_j .

Аналіз помилок відновлення інтенсивності дощу при двочастотному зондуванні ($\lambda_1^o = 8$ мм і $\lambda_2^o = 3,2$ см), отриманих у [9] у результаті розв'язання регуляризованої СЛАР (4) з використанням критерію (5), показав, що максимальні помилки результатів відновлення інтенсивності дощу відповідають області малих інтенсивностей (менше 3 мм/год) і дорівнюють 50...60 %. При цьому для інтенсивності дощу більше 5 мм/год для гамма-розподілу, який найбільш адекватно описує розподіл крапель за розмірами в реальних дощах, максимальна помилка не перевищує 20 %.

2. Вплив M на помилку відновлення інтенсивності. Подальші дослідження показали, що в обраному діапазоні зміни параметра регуляризації ($\alpha_r = 10^{-15} \dots 10^{-5}$) помилка відновлення інтенсивності виявляє слабку залежність від M в діапазоні $M \geq 25$, особливо при $\alpha_r \geq 10^{-10}$. Це дозволяє зафіксувати значення параметра M при розв'язанні оберненої задачі. Тоді критерій (5) запишеться в такому вигляді:

$$\Delta_1^\sigma = \min \left[\sqrt{(\Phi_1 - \Phi_2)^2 + (\Phi_3 - \Phi_4)^2} \right], \quad (6)$$

де $\Phi_1 = \sigma_0^r(\lambda_1^o)$; $\Phi_2 = \sigma_0^c(\lambda_1, \alpha_{ri})$; $\Phi_3 = \sigma_0^r(\lambda_2^o)$; $\Phi_4 = \sigma_0^c(\lambda_2, \alpha_{ri})$.

Результати, аналогічні [9], отримані з використанням критерію (6) для $\alpha_r = 10^{-15} \dots 10^{-5}$ і фіксованого $M = 30$, наведено на рис. 1. Точки відповідають апроксимації частотної залежності питомої ЕПР ступеневою функцією, зірочки – апроксимації експоненціальною функцією, а кружки – апроксимації їх середнім.

Отримані дані практично не відрізняються від наведених в [9], що дозволяє скоротити чис-

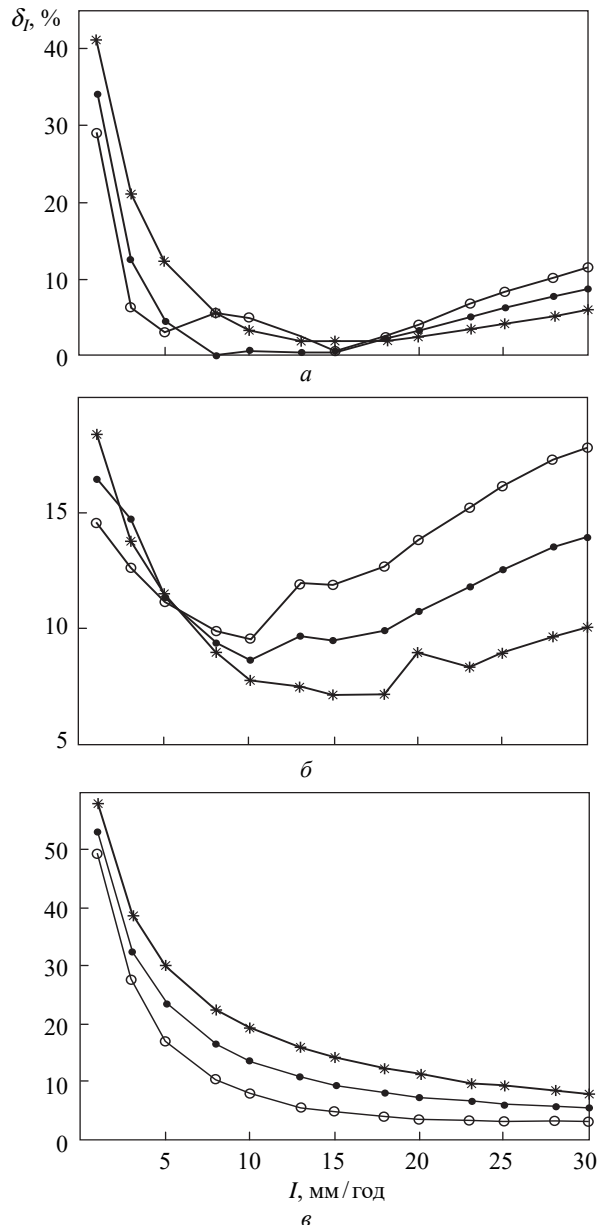


Рис. 1. Помилка відновлення інтенсивності при фіксованому M : а – гамма-розподіл крапель за розмірами; б – логнормальний розподіл; в – розподіл Маршала-Пальмера

ло змінних і тим самим спростити розв'язання оберненої задачі (3).

3. Вплив помилки розрахунку питомої ЕПР на результати відновлення інтенсивності дощу. Величина питомої ЕПР на двох довжинах хвиль обчислюється за результатами радіолокаційних вимірювань відповідно до виразу (2) як

$$\sigma_0^r(R_i, \lambda) = \frac{P(R_i, \lambda) R_i^4}{C_r(\lambda) V_{ef}(R_i, \lambda) K(R_i, \lambda)}. \quad (7)$$

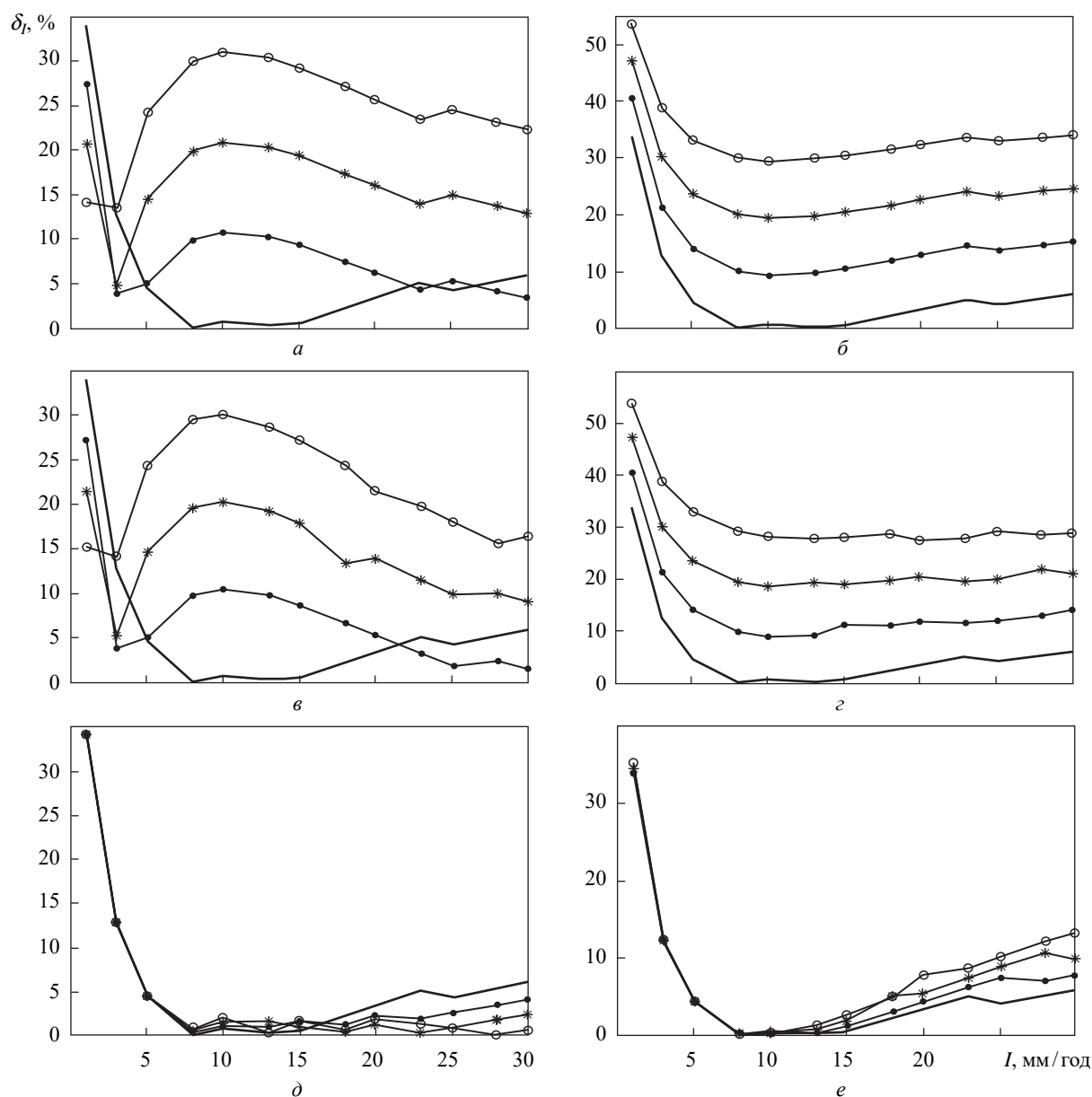


Рис. 2. Помилка відновлення інтенсивності для різних значень помилок вимірювання питомої ЕПР: гладка крива – немає помилок, крива з точками – помилки 10 %, крива з зірочками – 20 %, крива з кружками – 30 %

В основному, на розмір помилки розрахунку питомої ЕПР впливають похибки вимірювання прийнятої потужності, а також оцінки величини ослаблення сигналів при поширенні на трасі.

Розглянемо вплив помилки розрахунку питомої ЕПР на результати відновлення інтенсивності дощу без конкретизації, яка саме складова вносить цю помилку.

На рис. 2 наведено залежність помилки відновлення інтенсивності для різних значень помилок вимірювання питомої ЕПР (розглядається випадок гамма-розподілу крапель за розмі-

рами). Результати на рис. 2, а відповідають випадку, коли помилки вимірювання питомої ЕПР для двох довжин хвиль однакові і додатні, на рис. 2, б – помилки вимірювання питомої ЕПР для двох довжин хвиль однакові і від’ємні. На рис. 2, в присутня тільки помилка вимірювання питомої ЕПР для меншої довжини хвилі, і вона додатна. На рис. 2, г присутня тільки помилка вимірювання питомої ЕПР для меншої довжини хвилі, і вона від’ємна. На рис. 2, д має місце тільки помилка вимірювання питомої ЕПР для більшої довжини хвилі, і вона додатна. На

рис. 2, е присутня тільки помилка вимірювання питомої ЕПР для більшої довжини хвилі, і вона від'ємна.

Отримані результати показують, що більший вплив на помилку відновлення інтенсивності надає помилка у вимірі ЕПР меншої довжини хвилі. Помилка відновлення інтенсивності більша, якщо похибка вимірювань занижує справжнє значення ЕПР на двох довжинах хвиль (помилка від'ємна). Крім цього, додатна помилка для меншої довжини хвилі призводить до стрибка помилки відновлення інтенсивності в області 10 мм/год (рис. 2, в). Як і слід було очікувати, помилка обчислення питомої ЕПР на більшій довжині хвилі (3,2 см) практично не впливає в разі дощів з інтенсивністю менше 15 мм/год (рис. 2, д, е), оскільки в цьому випадку маємо релеєвське розсіювання і сигнал не так сильно ослаблюється на трасі розповсю-

дження. Для більш сильних дощів вплив також незначний (не більше 5 %), причому додатна помилка навіть занижує помилку відновлення інтенсивності в порівнянні з випадком відсутності помилки (рис. 2, д).

Висновки. Результати комп'ютерного моделювання розв'язання оберненої задачі двочастотного зондування дощу показують, таке:

- помилка відновлення інтенсивності має слабку залежність від M за умови $M \geq 25$ в обраному діапазоні зміни параметра регуляризації ($\alpha_r = 10^{-15} \dots 10^{-5}$). Це дозволяє зафіксувати значення параметра M при розв'язанні оберненої задачі і тим самим спростити її рішення;
- помилка відновлення інтенсивності залишається в прийнятних межах, якщо помилка вимірювання питомої ЕПР на меншій довжині хвилі не перевищує 10...15 %, при цьому для більшої довжини хвилі вона може доходити до 30 %.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. *Meteo. Агрометеорологія*. 2021. URL: <https://meteo.ua/agro>
2. Лосев А.П., Журина Л.Л. *Агрометеорологія*. Москва: Колос, 2001. 297 с.
3. Забрійко П.П., Кошелев А.И., Красносельский М.А., Михлин С.Г., Раковщик Л.С., Стеценко В.Я. *Интегральные уравнения*. Москва: Наука, 1968. 448 с.
4. Абшаев М.Т., Дадали Ю.А. О возможностях микроструктурных исследований облаков и осадков радиолокационными методами. *Тр. Высокотгорного геофизического ин-та*. 1966. Вып. 5. С. 71–85.
5. Линкова А.М., Хлопов Г.И. Использование метода перебора микроструктурных параметров жидких осадков для решения обратных задач восстановления их интенсивности. *Труды УкрНИИММ*. 2016. Вып. 269. С. 41–48.
6. Haddad Z.S., Meagher J.P., Durden S.L., Smith E.A., Im E. Drop size ambiguities in the retrieval of precipitation profiles from dual-frequency radar measurements. *J. Atmos. Sci.* 2006. Vol. 63, Iss. 1. P. 204–217.
7. Rose C.R., Chandrasekar V. A GPM Dual-Frequency Retrieval Algorithm: DSD Profile-Optimization Method. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2006. Vol. 23, Iss. 10. P. 1372–1383.
8. Линкова А.М. Восстановление интенсивности дождя путем решения интегрального уравнения рассеяния при двухчастотном зондировании. *Радиофизика и электроника*. 2017. Т. 22, № 3. С. 23–32.
9. Linkova A., Schuenemann K., Dormidontov A. Double Frequency Retrieval of Rain Intensity Using Solution of the Integral Equation of Scattering. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. (21–25 Sept. 2020, Kharkiv, Ukraine). Kharkiv: IEEE. P. 958–963. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252620.
10. Westwater E., Cohen A. Application of Backus-Gilbert inversion technique to determination of aerosol size distribution from optical scattering measurements. *Appl. Opt.* 1973. Vol. 12, Iss. 6. P. 1340–1348.
11. Морозов В.А. *Регулярные методы решения некорректно поставленных задач*. Москва: Наука, 1987.
12. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. *Методы решения некорректных задач*. 2-е изд. Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 285 с.
13. Степаненко В.Д. *Радиолокация в метеорологии*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 344 с.
14. Яновський Ф.Й. *Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден*. Київ: МОН України. Національний авіаційний університет, 2003.
15. Mardiana R., Iguchi T., Takahashi N. A dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004. Vol. 42, Iss. 10. P. 2214–2225.
16. Meneghini R., Kumagai H., Wang J.R., Iguchi T., Kozu T. Microphysical retrievals over stratiform rain using measurements from an airborne dual-wavelength radar radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997. Vol. 35, Iss. 3. P. 487–506.
17. Войтович О.А., Линкова А.М., Хлопов Г.И. Двухчастотное профилирование параметров дождя. *Радиофизика и электроника*. 2011. Т. 2(16), № 3. С. 51–60.
18. Лаврентьев М.М., Романов В.Г., Шишатский С.П. *Некорректные задачи математической физики и анализа*. Москва: Наука, 1980. 285 с.

Стаття надійшла 21.12.2020

REFERENCES

1. *Meteo. Agrometeorology* (in Russian). 2021. Available from: <https://meteo.ua/agro>
2. Losev, A.P., Zhurina, L.L., 2001. *Agrometeorology*. Moscow: Kolos Publ. (in Russian).
3. Zabreiko, P.P., Koshelev, A.I., Krasnoselsky, M.A., Mikhlín, S.G., Rakovshchik, L.S., Stetsenko, V.Ya., 1968. *Integral equations*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
4. Abshaev, M.T., Dadali, Yu.A., 1966. About the possibilities of microstructural studies of clouds and precipitation by radar methods. *Trudy Vysokogornogo geofisicheskogo Instituta*, 5, pp. 71–85 (in Russian).
5. Linkova, A.M., Khlopov, G.I., 2016. Use of the exhaustive search of microstructure parameters of liquid precipitation for solving the inverse problems of recovering their intensity. *Naukovi praci Ukrai'ns'kogo gidrometeorologichnogo instytutu*, 269, pp. 41–48 (in Russian).
6. Haddad, Z.S., Meagher, J.P., Durden, S.L., Smith, E.A., Im, E., 2006. Drop size ambiguities in the retrieval of precipitation profiles from dual-frequency radar measurements. *J. Atmos. Sci.*, **63**(1), pp. 204–217.
7. Rose, C.R., Chandrasekar, V., 2006. A GPM Dual-Frequency Retrieval Algorithm: DSD Profile-Optimization Method. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **23**(10), pp. 1372–1383.
8. Linkova, A.M., 2017. Reconstruction of rain intensity by solving the integral scattering equation for two-frequency sounding. *Radiofiz. elektron.*, **22**(3), pp. 23–32 (in Russian).
9. Linkova, A., Schuenemann, K., Dormidontov, A., 2020. Double Frequency Retrieval of Rain Intensity Using Solution of the Integral Equation of Scattering. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020, pp. 958–963. Kharkiv: IEEE. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252620.
10. Westwater, E., Cohen, A., 1973. Application of Backus-Gilbert inversion technique to determination of aerosol size distribution from optical scattering measurements. *Appl. Opt.*, **12**(6), pp. 1340–1348.
11. Morozov, V.A., 1987. *Regular methods for solving the ill-posed problems*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
12. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya., 1979. *Methods for solving the ill-posed problems*. 2nd ed. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
13. Stepanenko, V.D., 1973. *Radiolocation in meteorology*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
14. Yanovsky, F.I., 2003. *Radar systems for meteorological navigation of aircraft*. Kyiv: Ministry of Education and Science of Ukraine. National Aviation University Publ. (in Ukrainian).
15. Mardiana, R., Iguchi, T., Takahashi, N., 2004. A dual-frequency rain profiling method without the use of a surface reference technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **42**(10), pp. 2214–2225.
16. Meneghini, R., Kumagai, H., Wang, J.R., Iguchi, T., Kozu, T., 1997. Microphysical retrievals over stratiform rain using measurements from an airborne dual-wavelength radar radiometer. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **35**(3), pp. 487–506.
17. Voitovych, O.A., Linkova, A.M., Khlopov, G.I., 2011. Double frequency profiling of rain parameters. *Radiofiz. elektron.*, **2**(16)(3), pp. 51–60 (in Russian).
18. Lavrentiev, M.M., Romanov, V.G., Shishatskiy, S.P., 1980. *Ill-posed problems of mathematical physics and analysis*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).

Received 21.12.2020

A.M. Linkova

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of NASU
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

THE INFLUENCE OF A FALLACY IN SPECIFIC EFFECTIVE
SCATTERING SURFACE EVALUATION ON THE RESULT OF DOUBLE-FREQUENCY
RETRIEVAL OF RAIN INTENSITY

Subject and Purpose. The amount of precipitation is important information for the agro-climatic justification of agro-technical and reclamation actions directly controlling crop yields. The inverse problem of rain intensity retrieval from the remote sensing data is an incorrect mathematical physical problem described by a nonlinear integral equation. The purpose of this work is to analyze how errors in the specific effective scattering surface evaluation affect the results of double-frequency retrieval of the rain intensity obtained through the inverse problem solution by the previously proposed method.

Methods and Methodology. Numerical simulation by using an approach based on regularization techniques and intended for the integral scattering equation solution is carried out for double-frequency sensing in the microwave range

Results. Numerical simulations of the rain intensity retrieval have been performed at the operating wavelengths 0.82 and 3.2 cm in the range 1...30 mm/h and for different values of received power errors. It has been shown that an error in the specific effective scattering surface evaluation has a greater effect on the reliability of the intensity retrieval in the shorter wavelength case. And it exerts practically no effect (not exceeding 5 %) at the longer wavelength and at the rain intensity below 15 mm/h, which, however, is true for heavier rains, too.

Conclusion. The analysis of the results has shown that the error of the rain intensity retrieval remains within acceptable limits (below 20 %) provided that the error in the specific effective scattering surface evaluation does not exceed 15 % at the shorter wavelength. At the longer wavelength, it can reach 30 %.

Key words: inverse problem, integral equation, rain intensity.