

УДК 537.87: 621.371: 621.376

ПРОГНОЗУВАННЯ КУМУЛЯТИВНОГО РОЗПОДІЛУ ТРОПОСФЕРНОГО ОСЛАБЛЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ЗА ДАНИМИ БАГАТОРІЧНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ



[А.О. МЕРЗЛІКІН](#), [І.Є. АНТИПОВ](#), [Л.Ф. САЙКІВСЬКА](#), [О.М. БІТЧЕНКО](#)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Abstract – The article investigates in detail the effect of rainfall on the attenuation of radio waves at millimetre-wave frequencies, a critical factor for ensuring the reliability and stability of fifth-generation (5G) communication systems. An important aspect is the analysis of tropospheric attenuation, which occurs when electromagnetic signals interact with atmospheric phenomena, particularly raindrops. This phenomenon significantly complicates data transmission at high frequencies, especially in urban environments with high traffic density, requiring careful consideration in network design. The study considers three main approaches to determining rainfall intensity dependence for the city of Kharkiv: the use of local meteorological measurements, analysis of data from various sources, and recommendations of the International Telecommunication Union (ITU). Particular attention is paid to comparing the accuracy of these sources, which can differ significantly in terms of relevance, observation duration, geographical coverage, collection methodology, and level of generalisation. Given the possibility that local measurements may not be available, it is recommended to use ITU aggregated data, which is one of the most authoritative sources for engineering calculations. This provides sufficient accuracy for network design, enabling consideration of real atmospheric conditions. The results obtained allow us to select radio equipment parameters reasonably and determine the optimal frequency range, route length, and acceptable attenuation levels, which are important steps in creating modern wireless telecommunications systems. Such systems can operate under variable atmospheric conditions, increasing their reliability and efficiency. The proposed approach is helpful for engineers, researchers, and developers working to optimise next-generation networks in real-world climatic conditions. It improves design accuracy and reduces the risk of signal loss, ensuring stable, high-quality communication even in challenging weather conditions. Given the rapid development of telecommunications technologies, it is essential to consider atmospheric factors to ensure the safe and reliable operation of networks, especially in urban centres with high population density and traffic intensity. Thus, the study contributes to improving methods for predicting and adapting communication systems to changing atmospheric conditions, which is essential for the development of modern telecommunications infrastructures and for ensuring their long-term stable operation.

Анотація – У роботі детально досліджується вплив дощових опадів на ослаблення радіохвиль у міліметровому діапазоні частот, що є критичним фактором для забезпечення надійності та стабільності систем зв'язку п'ятого покоління (5G). Важливим аспектом є аналіз тропосферного загасання, яке виникає через взаємодію електромагнітних сигналів з атмосферними явищами, зокрема краплями дощу. Це явище суттєво ускладнює передачу даних на високих частотах, особливо в міських умовах із високою щільністю трафіку, що вимагає ретельного врахування при проектуванні мереж. У дослідженні розглядаються три основні підходи до визначення залежності інтенсивності опадів для міста Харків: використання локальних метеорологічних вимірювань, аналіз даних із різних джерел та рекомендацій Міжнародного союзу телекомунікацій (ІТУ). Особливу увагу приділено порівнянню точності цих джерел, які можуть значно відрізнятися за актуальністю, тривалістю спостережень, географічним охопленням, методологією збору та рівнем узагальнення. Враховуючи можливість відсутності локальних вимірювань, рекомендується використовувати узагальнені дані ІТУ, що є одним із найавторитетніших джерел для інженерних розрахунків. Це забезпечує достатню точність для проектування мереж, дозволяючи враховувати реальні атмосферні умови. Отримані результати дозволяють обґрунтовано підбирати параметри радіобладнання, визначати оптимальний частотний діапазон, довжину траси та допустимі рівні загасання, що є важливими етапами у створенні сучасних безпроводових телекомунікаційних систем. Такі системи здатні функціонувати в умовах змінного атмосферного впливу, що підвищує їхню надійність та ефективність. Запропонований підхід є корисним для інженерів, дослідників і розробників, що працюють над оптимізацією мереж нового покоління в реальних кліматичних умовах. Це дозволяє підвищити точність проектування та зменшити ризики втрат сигналу, забезпечуючи стабільність та якість зв'язку навіть у складних погодних умовах. Враховуючи швидкий розвиток телекомунікаційних технологій, важливо враховувати атмосферні фактори для забезпечення безперебійної роботи мереж, що особливо актуально для міських центрів із високою щільністю населення та інтенсивністю трафіку. Таким чином, дослідження сприяє покращенню методів прогнозування та адаптації систем зв'язку до змінних атмосферних умов, що є важливим для розвитку сучасних телекомунікаційних інфраструктур і забезпечення їхньої стабільної роботи в довгостроковій перспективі.

Вступ

У зв'язку з інтенсивним розвитком систем зв'язку п'ятого покоління, підтримкою швидкостей понад 10 Гбіт/с та їхнім використанням для забезпечення безперебійної роботи технологій інтернету речей, потокового мовлення тощо виникає необхідність застосування радіохвиль міліметрового діапазону (30...300 ГГц). Для вирішення перерахованих завдань важливу роль відіграє можливість точного прогнозування величин ослаблення радіохвиль міліметрового діапазону. Особливістю цих радіохвиль є залежність умов їхнього поширення від загасання в хмарах (для вертикальних трас) і в опадах. Особливу увагу слід звернути на дощі, оскільки ослаблення сигналу в них може призводити до повної зупинки роботи ліній зв'язку. Дощ відіграє значну роль у впливі на поширення радіохвиль у міліметровому діапазоні. Дощові краплі мають розміри, порівнянні з довжиною міліметрових хвиль. Це може призвести до сильного поглинання радіохвиль дощем. Що інтенсивніший дощ, то більша ймовірність втрати енергії сигналу через поглинання. Інтенсивні дощі можуть створювати перешкоду для лінії прямої видимості між передавачем і приймачем, що додатково посилює втрати сигналу.

Тому прогнозування частоти та інтенсивності опадів є невід'ємним етапом розгортання систем зв'язку 5G [1]. Але це завдання, як і будь-яке прогнозування, має ймовірнісний характер, а на результат прогнозу істотно впливають вибір вихідних даних. Тому актуальним є завдання обґрунтованого вибору вихідних даних для прогнозування кумулятивного розподілу тропосферного загасання під час проектування мереж зв'язку 5G. У статті розглянуто методи та можливості отримання кумулятивного розподілу тропосферного ослаблення радіохвиль. Отримано результати розрахунків кумулятивного розподілу атмосферного загасання на частоті 38 ГГц з рівнем забезпеченості 0,01%.

Метою роботи є аналіз методів отримання залежності інтенсивності опадів для міліметрового діапазону хвиль у Харкові та оцінка їхньої надійності в контексті прогнозування втрат сигналу. Дослідження спрямоване на визначення оптимального підходу до розрахунку ослаблення радіохвиль з урахуванням наявних кліматичних даних і міжнародних рекомендацій.

I. Основна частина

На даний момент існує кілька моделей, що описують радіохвиль міліметрового (ММ) діапазону хвиль (ДХ) в атмосфері – Жевакіна, Наумова, Вотера, Лііба та інші [2]. Однією з найпопулярніших є напівемпірична модель Лііба, яка ґрунтується на поданні атмосферного загасання, що містить у собі внесок трьох складових

$$\gamma(f) = \gamma_l + \gamma_d + \gamma_c, \quad (1)$$

де γ_l – резонансний внесок 44-х спектральних ліній для молекули O_2 та 30-ти ліній для

молекули H_2O ; γ_d – нерезонансний внесок сухого повітря; γ_c – внесок континууму водяної пари.

Розподіл дощових крапель за розмірами, формою та орієнтацією під час бурі може змінюватися. Спостереження показують, що в середньому розподіл крапель за розмірами відносно стабільний і змінюється здебільшого при зміні інтенсивності дощу. Розподіл крапель за розмірами, запропонований Лоусом і Парсонсом [3], використовували для розроблення конкретної моделі ослаблення в дощі, представленої в Рекомендації ITU-R P.838-3. Розподіл відносних густин маленьких крапель діаметром менше ніж 0,5 мм погано описуються моделлю Лоуса-Парсонса, тому для даного діапазону величин діаметра можна використовувати розподіл Маршалла-Пальмера [4]. Відносна концентрація маленьких крапель може сильно змінюватися, і тому використання якоїсь однієї моделі розподілу може виявитися неефективним.

Співвідношення між погонним ослабленням γ_R (дБ/км) та інтенсивністю дощу R (мм/год), описується степеневим законом

$$\gamma_R = k \cdot R^a, \quad (2)$$

де γ_R – погонне ослаблення (дБ/км);

R – інтенсивність дощу (мм/год);

k і a – коефіцієнти, що залежать від частоти і типу поляризації;

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 (a_j \exp \left[-\left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right]) + m_k \log_{10} f + c_k, \quad (3)$$

$$a = \sum_{j=1}^5 (a_j \exp \left[-\left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right]) + m_a \log_{10} f + c_a, \quad (4)$$

де f – частота сигналу (ГГц);

$\log_{10} f$ – десятковий логарифм частоти;

a_j – амплітуда кожного гаусівського компонента;

b_j середнє значення логарифмічного частотного інтервалу;

c_j – розсіювання (стандартне відхилення) компонента;

m_k – лінійний коефіцієнт для логарифму частоти;

c_k – зсув (константа) для корекції результату;

j – індекс члена суми в апроксимаційній формулі для обчислення коефіцієнтів k та a .

Константа c_k введена як зсувна поправка, що дозволяє узгодити апроксимуючу функцію з емпіричними даними, враховуючи фонові втрати, не охоплені основною структурою моделі. Її значення визначається шляхом оптимізації моделі на основі мінімізації середньоквадратичного відхилення. Значення коефіцієнта для k у випадку горизонтальної поляризації наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти для k у випадку горизонтальної поляризації

j	a_j	b_j	c_j	m_k	c_k
1	-5,33980	-0,10008	1,13098	-0,18961	0,71147
2	-0,35351	1,26970	0,45400	-0,18961	0,71147
3	-0,23789	0,86036	0,15354	-0,18961	0,71147
4	-0,94158	0,64552	0,16817	-0,18961	0,71147

У табл. 2 наведено значення коефіцієнтів a_H .

Таблиця 2. Коефіцієнти для a_H у випадку горизонтальної поляризації

j	a_j	b_j	c_j	m_a	c_a
1	-0,14318	1,82442	-0,55187	0,67849	-1,95537
2	0,29591	0,77564	0,19822	0,67849	-1,95537
3	0,32177	0,63773	0,13164	0,67849	-1,95537
4	-5,37610	-0,96230	1,47828	0,67849	-1,95537
5	16,1721	-3,29980	3,43990	0,67849	-1,95537

Краплі дощу, що падають, деформуються під впливом гравітації та горизонтальних градієнтів вітру, тому, падаючи, краплі можуть вібрувати й осцилювати. Типова форма дощової краплі – сплюснутий сфероїд із близькою до вертикальної віссю симетрії. Горизонтальні сили, зумовлені вертикальними градієнтами вітру, можуть призвести до того, що середня орієнтація крапель відхилиться на кілька градусів від вертикальної осі симетрії. Пруппачер і Піттер [5] виконали моделювання розподілу крапель за формою як функцію розміру краплі, і це прогнозування форми було підтверджено спостереженнями, проведеними в лабораторії Пруппачером і Беардом [6]. Однак результати спостережень в атмосферних умовах зазвичай дають менше відношення осей порівняно з розрахунковими результатами для того самого об'єму крапель.

На рис.1 показано зміну коефіцієнта питомого ослаблення, розрахованого за допомогою методу Мі та представленого у вигляді функції від частоти для різних інтенсивностей дощу за припущень, прийнятих у [7]. Інтенсивність дощу, як правило, виражена в мм/год, є функцією розподілу за розміром крапель і швидкості падіння крапель і може бути описана виразом,

$$R = 6 \times 10^{-6} \pi \int N(D) \cdot D^3 \cdot v(D), \quad (5)$$

де $N(D)$ – функція розподілу крапель за діаметром D (кількість крапель на одиницю об'єму з діаметром D);

D – діаметр краплі;

$v(D)$ – швидкість падіння краплі діаметра D (м/с).

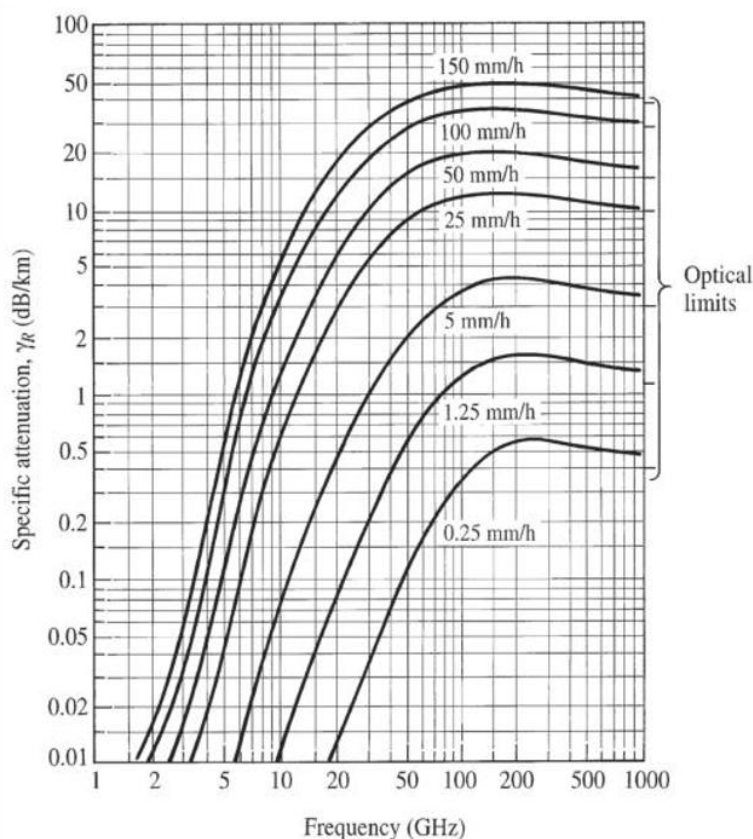


Рис. 1. Залежність питомого ослаблення сигналу від частоти для різних інтенсивностей дощу

Як видно з вище сказаного, під час розроблення ліній зв'язку понад 10 ГГц необхідно враховувати такі види загасання: опади, загасання в хмарах для вертикальних трас, особливу увагу необхідно звернути на загасання сигналу під час дощів, тому що втрати в дощі можуть призвести до повної зупинки роботи лінії зв'язку [8].

II. Отримання залежності інтенсивності опадів для Харкова

Складністю при проектуванні та розгортанні мереж 5G в умовах України і, зокрема, Харкова та Харківської області, є відсутність актуальних даних про частоту та інтенсивність опадів. Є дані /80х років/ [9] та узагальнені рекомендації ІТУ для кліматичної зони, до якої належить Харків [10], так само можна брати інформацію з різних джерел про погоду [11].

У зв'язку з цим для подальшого аналізу пропонується визначити залежність інтенсивності опадів для Харкова з трьох різних джерел і застосувати метод Лііба для розрахунку кумулятивного розподілу.

Основною складовою є визначення інтенсивності дощу, $R_{0,01}$, що перевищується протягом 0,01% часу середнього року (за часу інтегрування 1 хв.). Якщо таку довгострокову статистику не можна почерпнути з місцевих джерел, то оцінку інтенсивності можна отримати за допомогою карт дощових кліматичних зон, наведених у Рекомендації ІТУ-R P.837.

Також необхідно обчислити погонне ослаблення γ_R , для цього використовуємо модифіковану версія базової степеневі моделі, де використовується статистичне значення інтенсивності дощу $R_{0,01}$

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^a. \quad (6)$$

Ефективна довжина траси становить

$$L_E = L_R \vartheta_{0,01} \quad \text{км}, \quad (7)$$

де L_E – ефективна довжина траси (км);

L_R – реальна довжина траси (км);

$\vartheta_{0,01}$ – коефіцієнт врахування кута нахилу траси та статистичної тривалості дощу (0,01% часу).

Прогнозоване значення ослаблення сигналу, яке перевищується протягом 0,01% часу середнього року, розраховується за наступною формулою:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_E. \quad (8)$$

На рис. 2 наведено порівняльні дані щодо частоти та інтенсивності дощу в Харкові, отримані з різних джерел [9–11].

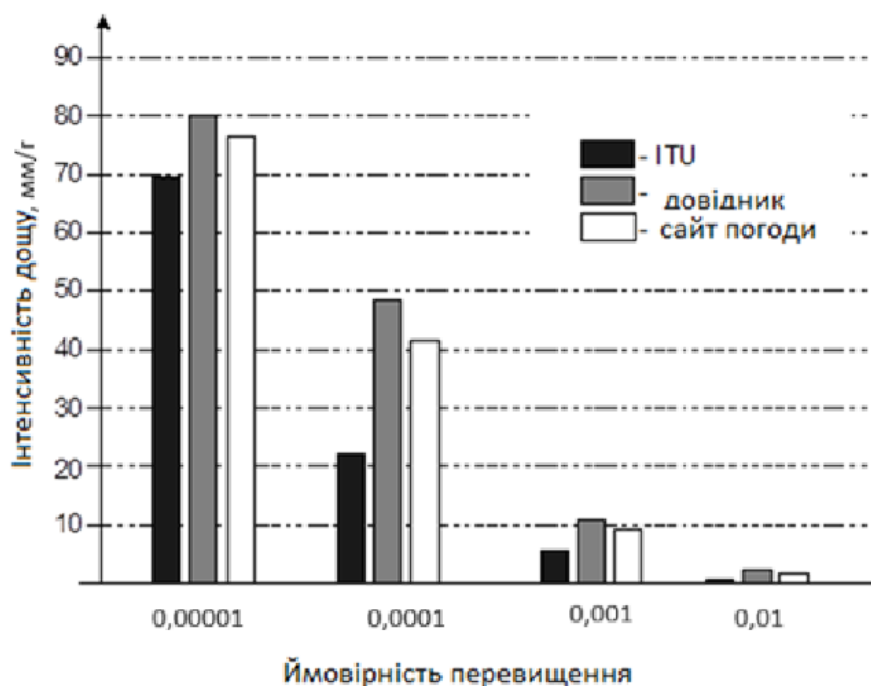


Рис. 2. Залежність інтенсивності опадів для Харкова (мм/год) від їхньої ймовірності за даними різних джерел

На рис. 2 представлено порівняння інтенсивності дощу (в мм/год) залежно від ймовірності перевищення згідно з даними трьох джерел: Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU), довідника та сайту погоди. Ймовірність перевищення вказує, наскільки рідко трапляється певна інтенсивність опадів. Але особливості цього зменшення в різних джерел різняться. Наскільки суттєво ці відмінності впливають на загасання сигналу – покаже подальший розрахунок. Під час розрахунку кумулятивного розподілу враховувалися такі основні параметри, як інтенсивність опадів і частота. Результатом розрахунку стали графічні залежності, показані на рис. 3.



Рис. 3. Кумулятивний розподіл атмосферного ослаблення на частоті 38 ГГц для рівня 0,0001 часу за різними джерелами (38 ГГц)

Порівнюючи отримані результати з результатами роботи [12], слід зазначити, що вони були проведені в найгірший з точки зору поширення радіохвиль ММ діапазону період. Цей період тривав чотири місяці, з червня по вересень, і показаний на рис. 4. Найбільше ці результати співвідносяться з даними ITU, якщо їх привести до середньорічних показників.

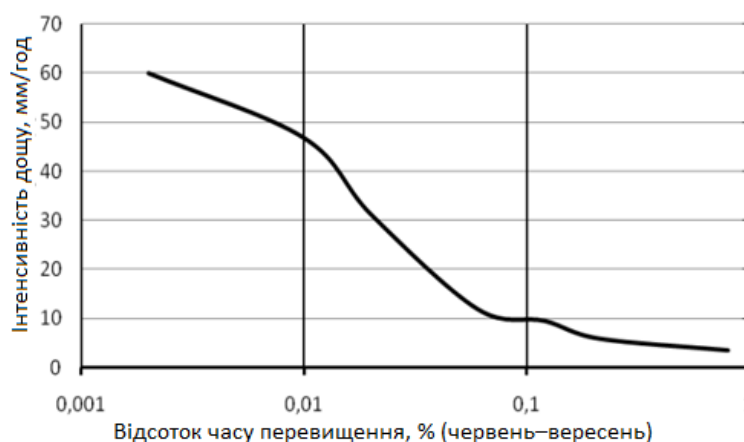


Рис. 4. Кумулятивний розподіл інтенсивності дощу за 4 місяці 2018 року (червень-вересень) у Харкові

Висновки

У статті було проведено детальний аналіз впливу дощових опадів на ослаблення радіохвиль у міліметровому діапазоні частот, що є критичним для сучасних систем зв'язку 5G. Основною метою дослідження було визначення найбільш надійних методів прогнозування інтенсивності опадів та їхнього впливу на якість та стабільність радіосигналів. В результаті було встановлено, що дощові краплі мають значний вплив на поширення радіохвиль, особливо при високих частотах, що може призводити до повної втрати сигналу у разі сильних опадів. Для точного прогнозування ослаблення радіохвиль важливо використовувати дані, отримані з міжнародних рекомендацій, таких як ІТУ, оскільки вони мають високу актуальність і охоплюють широкі географічні регіони. Вибір джерел даних є ключовим фактором для проектування мереж, особливо в умовах відсутності локальних метеорологічних вимірювань. Статистичні моделі, зокрема модель Лімба, показали свою ефективність у розрахунках кумулятивного розподілу атмосферного загасання, що дозволяє більш точно враховувати атмосферні умови при проектуванні систем зв'язку. Важливим аспектом є врахування розподілу крапель за розмірами та формою, що впливає на поглинання радіохвиль дощем. Результати дослідження підтвердили, що врахування атмосферних факторів є необхідним для забезпечення стабільної роботи мереж 5G у міських умовах із високою щільністю населення та інтенсивним трафіком. В цілому, застосування отриманих моделей і рекомендацій дозволяє підвищити точність проектування мереж, зменшити ризики втрат сигналу та забезпечити більш стабільне та надійне функціонування телекомунікаційних систем у складних погодних умовах, що є важливим для розвитку сучасних технологій зв'язку і інфраструктури.

Список літератури

1. ITU-R Recommendation P.530-17 (2017), "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems", available at: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530-17-201712-I/en> (last accessed 20.06.2025).
2. Liebe, H. J. (1989), "MPM – an atmospheric millimeter waves propagation model", International Journal of Infrared and Millimeter Waves, No. 10(6), P. 631–650. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01009565>.
3. Laws, J. O., and Parsons, D. A. (1943), "The relation of raindrop-size to intensity", Eos, Transactions of the American Geophysical Union, No. 24(2), P. 452–460. DOI: <https://doi.org/10.1029/TR024i002p00452>.
4. Marshall, J. S., Palmer, W. McK. (1948), "The distribution of raindrops with size", Journal of Meteorology, No. 5, P. 165–166. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005%3C0165:TDORWS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005%3C0165:TDORWS%3E2.0.CO;2).
5. Pruppacher, H. R., Pitter, R. L. (1971), "A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops", Journal of the Atmospheric Sciences, No. 28(1), P. 86–94. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<0086:ASEDOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<0086:ASEDOT>2.0.CO;2).
6. Pruppacher, H. R., Beard, K. V. (1970), "A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air", Quarterly Journal of the Royal

Meteorological Society, No. 96(408), P. 247–256. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49709640807>.

7. Olson, C. L. (1976), "On choosing a test statistic in multivariate analysis of variance", Psychological Bulletin, No. 83(4), P. 579–586. DOI: <https://doi.org/10.1037/0033-2909.83.4.579>.

8. Elabdin, Z., Islam, M. R., Khalifa, O. O., and Raouf, H. E. A. (2009), "Mathematical model for the prediction of microwave signal attenuation due to duststorm", Progress In Electromagnetics Research M, No. 6, P. 139–153. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERM09021906>.

9. Волошина О. В., Врублевська О. О., Катеруша Г. П., Гончарова Л. Д., Казаков О. Л., Хоменко І. А., Недострелова Л. В. (2014), Режим опадів по регіонах України наприкінці ХХ та на початку ХХІ століть: звіт про НДР (заключний), Одеський державний екологічний університет, 100 с.

10. ITU-R Recommendation P.618-10, (2009), "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems", available at: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.618-10-200910-S!!PDF-E.pdf (last accessed 26.06.2025)

11. Meteopost (2025), "Climate Normals for Kharkiv", available at: <https://meteopost.com/weather/climate-normals/kharkov/> (last accessed 19.08.2025)

12. Odokienko, O., Merzlikin, A., Pavlikov, V., Ruzhentsev, N., Sobkolov, A., Tsopa, O., Salnikov, D., Zhyla, S. (2019), "Cumulative distribution of rain rate and rain attenuation in Ukraine", Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), Lviv, Ukraine, 2–6 July, P. 62–66. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIACT.2019.8847730>.