УДК 504.054:621.371

DOI: 10.33730/2310-4678.1.2026.359906

МОНІТОРИНГ ТА АНАЛІЗ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

О. М. Тихенко
доктор технічних наук, професор
Державний університет "Київський авіаційний інститут" (м. Київ, Україна)
e-mail: oksana.tykhenko@npp.kai.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6459-6497

А. О. Коновалов
здобувач ступеня доктора філософії
Державний університет "Київський авіаційний інститут" (м. Київ, Україна)
e-mail: 9029317@stud.kai.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-3137-0051

Унаслідок урбанізації та стрімкого розвитку технологій електромагнітне випромінювання призводить до негативного впливу на здоров'я людей і природні екосистеми. Проведено моніторинг та аналіз рівнів електромагнітного випромінювання в урбанізованому середовищі. Установлено, що рівні електромагнітного поля суттєво відрізняються на різних локаціях, тобто просторове поширення електромагнітного випромінювання в урбанізованому середовищі є нерівномірним і динамічним. На більшості локацій рівні електромагнітного випромінювання відповідають нормативним вимогам. Потребують додаткових досліджень території, де зафіксовано перевищення рівнів. При цьому необхідно враховувати технічні характеристики джерел випромінювання та просторове поширення електромагнітних хвиль в урбанізованому середовищі. Електромагнітна хвиля може відбиватися від стін будівель, вікон, металевих конструкцій, транспорту й навіть від землі, унаслідок чого рівень поля може істотно відрізнятися на невеликих відстанях, а його моделювання потребує складних математичних алгоритмів, що враховують усі перешкоди й джерела.

Ключові слова: *електромагнітне випромінювання, електромагнітна обстановка, екологічна безпека, електромагнітна хвиля, напруженість поля, щільність потоку енергії.*

ВСТУП

Зростання рівня урбанізації та бурхливий розвиток технологій, зокрема систем бездротового зв'язку, телекомунікацій та енергетичної інфраструктури, призвели до значного збільшення інтенсивності електромагнітного поля (ЕМП) у довкіллі. Це явище, відоме як електромагнітне забруднення, стало одним із актуальних екологічних факторів, що впливають на здоров'я людини й стан екосистем. Електромагнітне випромінювання (ЕМВ) техногенного походження створює додаткове навантаження на біологічні об'єкти, що може мати непередбачувані довгострокові наслідки [1–3].

Проблема впливу ЕМП на довкілля та організм людини набула офіційного статусу на міжнародному рівні ще у 1995 році, коли Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ) офіційно запровадила термін "глобальне електромагнітне забруднення навколишнього середовища". Це рішення стало визнанням підвищеної актуальності цієї проблеми, яку ВООЗ включила до переліку пріоритетних проблем людства. У відповідь на зростання стурбованості громадськості щодо потенційних ризиків для здоров'я від впливу ЕМП ВООЗ у 1996 році створила Міжнародний проєкт з ЕМП (англ. *International EMF Project*) [4]. Метою цього проєкту було оцінити наявні наукові дані про потенційний вплив ЕМП на здоров'я людини в діапазоні частот від 0 до 300 ГГц. За результатами встановлено, що єдиним доведеним біологічним ефектом високоінтенсивних ЕМП є нагрів тканин.

ВООЗ вимагає максимального зниження рівнів полів до чіткого з'ясування меж допустимого впливу ЕМП залежно від частот та амплітуд. Тобто на цей фізичний фактор поширюється принцип ALARA (*As Low As Reasonably Achievable* — "настільки низько, наскільки це розумно досяжно") — підхід, що застосовується до фізичних факторів, зокрема електромагнітного випромінювання. У розвинених країнах він часто використовується в ширшому значенні — ALARP ("настільки низько, наскільки це розумно практично"). Саме на цьому принципі ґрунтуються сучасні норми безпеки, зокрема рекомендації ICNIRP (Міжнародної комісії із захисту від неіонізуючого випромінювання). Ця концепція передбачає встановлення мінімально можливого рівня небезпеки з урахуванням практичних і соціальних аспектів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасне електромагнітне середовище за останні десятиліття зазнало фундаментальних змін: домінування потужних віддалених джерел (лінії електропередач, радіовежі) змінилося поширенням численних малопотужних випромінювачів, що функціонують у безпосередній близькості до людини. До цих джерел належать смартфони, переносні пристрої, точки доступу Wi-Fi і смартпристрої (наприклад, гаджети, датчики температури (світла, руху), фітнес-трекери, промислові датчики, система Smart Home). Ця трансформація потребує перегляду традиційних методів оцінки електромагнітного впливу. Проведення систематичного моніторингу та всебічного аналізу рівнів ЕМП в урбанізованому середовищі є надзвичайно важливим завданням для забезпечення екологічної безпеки.

Метою дослідження є комплексний моніторинг та аналіз рівнів електромагнітного забруднення в урбанізованому середовищі міста Вишневе Київської області для оцінки поточного екологічного стану й прогнозування можливих змін.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вимірювання напруженості електромагнітного поля здійснювали широкосмуговим вимірювачем ТМ-190 згідно з інструкцією з експлуатації. Вимірювач ТМ-190 є зручним інструментом для швидкої оцінки електромагнітного фону в побутових умовах і призначений для оцінки рівня електромагнітного фону від трьох основних джерел: радіочастотного випромінювання (RF) (смартфони, Wi-Fi-роутери, базові станції мобільного зв'язку, побутові прилади тощо); магнітного поля (MF) (лінії електропередач, побутові прилади, трансформатори); електричного поля (EF) (випромінювання від електричних мереж і приладів, але вимірюється як окрема компонента). На кожній локації було проведено три серії вимірювань на різних відстанях від джерела. Усі заміри проводили на відкритому повітрі, у світлий час доби, за сухих погодних умов, з дотриманням однакової методології фіксації просторового положення та висоти встановлення приладу (2 м над поверхнею землі). Оброблення результатів вимірювань здійснювали за стандартною методикою статистичного оброблення даних повторних вимірювань. Отримані значення порівнювали з допустимими нормами, установленими в Україні [5; 6], і міжнародними стандартами [7].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Рівень електромагнітного забруднення зростає експоненційно, збільшуючись у 10–15 разів кожні десять років [8; 9]. Це стрімке зростання зумовлене активним упровадженням нових джерел ЕМП, особливо систем бездротового зв'язку, функціональними елементами яких є базові станції. Аналіз кількісних даних підтверджує цей тренд (*табл. 1*).

З метою оцінки рівня електромагнітного забруднення в урбанізованому середовищі були проведені натурні вимірювання рівнів електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні від 50 МГц до 3,5 ГГц на 12 попередньо визначених геопросторових локаціях на території міста Вишневе Київської області (*табл. 2*, *рис. 1*). Для підвищення надійності й достовірності отриманих даних на кожній локації виконано три незалежні серії вимірювань, що дало змогу врахувати потенційну варіативність показників у межах одного середовища.

Результати, наведені в *табл. 2* і на *рис. 1*, свідчать, що рівні електромагнітного поля суттєво відрізняються на різних локаціях, що вказує на локалізацію джерел випромінювання або залежність їхньої інтенсивності від конкретного місця. Загальні тенденції за трьома серіями вимірювань є подібними, але не ідентичними. Це може свідчити про динамічність джерел випромінювання або про вплив тимчасових факторів (наприклад, погодних умов, активності пристроїв). Найвищі показники зафіксовано

Таблиця 1.

Динаміка розвитку бездротових технологій

Глобальні ключові показники	2023 р.	2024 р.	Прогноз на 2030 р.
Кількість абонентів мобільного зв'язку, млн	8 510	8 660	9 430
Кількість абонентів 5G, млн	1 620	2 300	6 290
Точки доступу Wi-Fi, млн	542	549	—
Кількість абонентів мобільного зв'язку на 100 осіб, за даними Світового банку	109,4	112,1	—

Джерело: [8; 9].

Рис. 1. Рівні електромагнітного випромінювання у м. Вишневе Київської області
Джерело: розроблено за результатами натурних вимірювань.

на локаціях 7 і 12. Це може вказувати на наявність потужних джерел електромагнітного випромінювання поблизу цих точок (наприклад, веж стільникового зв'язку, трансформаторних підстанцій, промислового обладнання). Дані, представлені в *табл. 2*, підтверджують, що рівень ЕМП в урбанізованому середовищі не є однорідним.

Це свідчить про локалізований характер джерел випромінювання, а їхня інтенсивність безпосередньо залежить від конкретного місця. Найвищі показники, що суттєво перевищують середні значення, були зафіксовані на локаціях 7 і 12. Це може бути пов'язано з безпосередньою близькістю до потужних стаціонарних джерел, таких як базові станції мобільного зв'язку, телевізійні чи радіовежі або інше промислове обладнання.

Відповідно до національних нормативів допустимі рівні ЕМВ не повинні бути вищими за 100 мкВт/см^2 [5]. Рекомендації [7] встановлюють гранично допустимі рівні випромінювання,

Таблиця 2.

Результати вимірювання рівня електромагнітного випромінювання

Локація	1-ша серія вимірювань, мкВт/см^2	2-га серія вимірювань, мкВт/см^2	3-тя серія вимірювань, мкВт/см^2	Середнє значення, мкВт/см^2
1	78	85	44	69
2	14	17	174	68
3	20	14	14	16
4	310	210	500	340
5	155	190	134	160
6	1	2	25	9
7	1 580	574	944	1 033
8	344	334	236	305
9	538	264	400	401
10	39	48	35	41
11	84	98	66	83
12	1 900	1 996	1 744	1 880

Джерело: сформовано за результатами натурних вимірювань.

які значно вищі за українські. Наприклад, для діапазону мобільного зв'язку (900–2100 МГц) норми ICNIRP становлять 1 000 мкВт/см^2 (10 Вт/м^2).

Аналіз даних незалежних серій вимірювань на кожній локації показав, що, попри загальну тенденцію, показники можуть суттєво відрізнятися. Наприклад, на локації 2, де середня інтенсивність становить 68 мкВт/см^2, третя серія вимірювань показала досить високе значення — 174 мкВт/см^2. Це вказує на динамічність електромагнітного середовища й можливий вплив тимчасових факторів. До таких факторів можуть належати інтенсивність використання бездротових мереж у певний час доби (наприклад, пікові години), запуск чи вимкнення певних пристроїв або інші змінні, що не були враховані. Високі показники на окремих локаціях (особливо на локації 12, де середнє значення становить 1880 мкВт/см^2) потребують подальшого вивчення та оцінки потенційних ризиків для здоров'я.

Загалом просторове поширення ЕМП в урбанізованому середовищі є нерівномірним і динамічним. Електромагнітна хвиля відбивається від стін будівель, вікон, металевих конструкцій, транспорту та від землі, унаслідок чого рівень поля може істотно відрізнятися навіть на невеликих відстанях, а його моделювання потребує складних математичних алгоритмів, що враховують усі перешкоди й джерела. Зокрема, для базових станцій мобільного зв'язку, які є основними джерелами ЕМП в урбанізованому середовищі, і для інших джерел поля суттєвим є відбиття та перевідбиття електромагнітних хвиль, що необхідно враховувати під час оцінки впливу на здоров'я. У багатьох випадках джерелами падаючих хвиль є кілька відбитих від інших поверхонь хвиль (*рис. 2*).

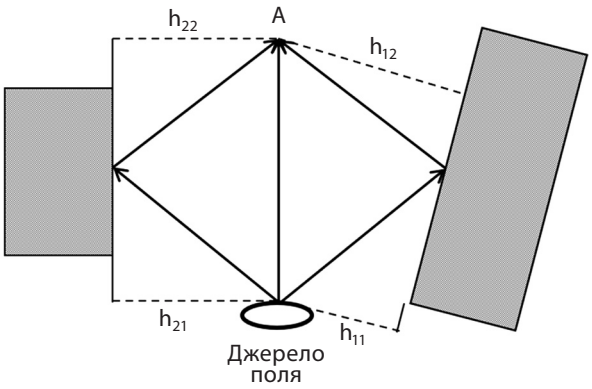

Рис. 2. Вплив відбиття (перевідбиття) електромагнітних хвиль на електромагнітну обстановку в точці А

Джерело: [10].

В усіх випадках потрібно враховувати коефіцієнт підсилення антени передавальних пристроїв мобільного зв'язку. Цей коефіцієнт є паспортною величиною, яка показує, наскільки ефективно антена фокусує енергію в певному напрямку, а не випромінює її рівномірно в усі боки. Тоді щільність потоку енергії від джерела становитиме:

$$W = \frac{p_{ср} G}{4\pi R^2}, \qquad (1)$$

де $p_{ср}$ — потужність випромінювання джерела, Вт; G — коефіцієнт підсилення потужності антени; R — відстань від джерела випромінювання до розрахункової точки, м.

Будь-яка відбивальна поверхня певним чином спотворює хвилю та знижує її потужність. При цьому коефіцієнт послаблення становитиме:

$$F = \sqrt{1 + 2K\cos\left(\theta + \frac{4\pi h_{11} h_{12}}{\lambda R}\right) + K^2}, \qquad (2)$$

де K — коефіцієнт відбиття від поверхні; θ — кут зміни фази відбитого променя; λ — довжина хвилі.

З урахуванням цього виразу щільність потоку енергії за умови відбиття становить:

$$W = \frac{PG}{4\pi R^2} F^2. \qquad (3)$$

При визначенні інтегральних значень щодо напрямів і кутів падіння таких хвиль у точку захисту слід враховувати кожну з критичних відбивальних поверхонь. Досвід свідчить, що в умовах наявності нерівних відбивальних поверхонь (дифузне відбиття) коефіцієнт послаблення можна взагалі не враховувати, тоді:

$$W = \frac{PG}{4\pi R^2}. \qquad (4)$$

Водночас за великих кутів ковзання (великих кутів падіння) і $R \le \frac{4h_{11}h_{12}}{\lambda}$:

$$W = \frac{PG}{\pi R^2}(1+K)^2. \qquad (5)$$

За малих кутів ковзання та за умови, що $R \le \frac{4h_{11}h_{12}}{\lambda}$:

$$W = \frac{PG}{\pi R^2}. \qquad (6)$$

Слід зазначити, що коефіцієнти ослаблення для всіх радіотехнічних засобів відомі. Водночас коефіцієнти відбиття ($K_в$) усіх критичних поверхонь потрібно з'ясовувати в реальних умовах [10].

Отже, врахування ефекту багатопроменевого поширення є критично важливим для

точної оцінки електромагнітної обстановки середовища. Без моделювання поширення ЕМП в місті буде значно відрізнятися від реальних вимірювань.

ВИСНОВКИ

У результаті дослідження встановлено, що рівень електромагнітного забруднення в урбанізованому середовищі є нерівномірним. Виявлено локації, де рівень випромінювання значно перевищує фонові показники, що свідчить про наявність поблизу потужних джерел. Це потребує проведення подальших досліджень щодо ідентифікації джерел ЕМП, їхньої оцінки згідно з чинними санітарними нормами й моделювання поширення електромагнітних хвиль у просторі.

Різниця в показниках між трьома серіями вимірювань вказує на те, що інтенсивність ЕМП є динамічною та залежить від тимчасових факторів, таких як активність джерел випромінювання. Це потребує проведення постійного моніторингу. Отримані дані можуть стати основою для розробки та впровадження ефективних заходів екологічного управління з метою зниження ризиків, пов'язаних з електромагнітним забрудненням урбанізованого середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hu, C., Zuo, H., & Li, Y. (2021). Effects of radiofrequency electromagnetic radiation on neurotransmitters in the brain. *Frontiers in Public Health, 9*, 691880. doi: 10.3389/fpubh.2021.691880
2. Roy, B., Niture, S., & Wu, M. H. (2021). Biological effects of low power nonionizing radiation: A narrative review. *Journal of Radiation Research, 1*(1), 1–23. doi: 10.46439/radiation.1.001
3. Liu, L., Huang, B., Lu, Y., Zhao, Y., Tang, X., & Shi, Y. (2024). Interactions between electromagnetic radiation and biological systems. *iScience, 27*(3), 109201. doi: 10.1016/j.isci.2024.109201
4. World Health Organization. (n.d.). *The International EMF Project*. Retrieved from https://www.who.int/initiatives/the-international-emf-project
5. Міністерство охорони здоров'я України. (1996). *Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань (ДСН 239-96)* [з останніми змінами, внесеними наказом від 05.09.2023 № 1577]. Взято з https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96#Text
6. Міністерство охорони здоров'я України. (2002). *Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів (ДСНіП 3.3.6.096-2002).* Взято з https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text
7. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (2025). Gaps in knowledge relevant to the "ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)". *Health Physics, 128*(2), 190–202. doi: 10.1097/HP.0000000000001944
8. Ericsson. (n.d.). *Mobility report: Key figures*. Retrieved from https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/key-figures
9. Federal Reserve Bank of St. Louis. (n.d.). *Mobile cellular subscriptions in world*. FRED. Retrieved from https://fred.stlouisfed.org/series/ITCELSETSP2WLD
10. Тихенко, О. М. (2021). *Методологічні та технологічні засади захисту працюючих від впливу електромагнітних полів металевими та композиційними екрануючими матеріалами* (Дис. д-ра тех. наук, Національний авіаційний університет). Взято з https://science.donntu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/09/dis_Tykhenko.pdf

MONITORING AND ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC POLLUTION LEVELS IN AN URBANIZED ENVIRONMENT

Tykhenko O.
Doctor of Technical Sciences, Professor
State University "Kyiv Aviation Institute" (Kyiv, Ukraine)
e-mail: oksana.tykhenko@npp.kai.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6459-6497

Konovalov A.
Postgraduate Student
State University "Kyiv Aviation Institute" (Kyiv, Ukraine)
e-mail: 9029317@stud.kai.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-3137-0051

As a result of urbanization and rapid development of technologies, electromagnetic radiation has a negative impact on human health and natural ecosystems. Monitoring and analysis of electromagnetic radiation levels in an urban environment were carried out. It was found that electromagnetic field levels differ significantly across different locations, i.e. the spatial distribution of electromagnetic radiation in an urban environment is uneven and dynamic. In most locations, electromagnetic radiation levels meet regulatory requirements. Additional research is needed in the areas where levels are exceeded. In this case, it is necessary to take into account the technical characteristics of radiation sources and the spatial distribution of electromagnetic waves in an urban environment. An electromagnetic wave can be reflected from the walls of buildings, windows, metal structures,

transport, and even from the ground, as a result, the field level can vary greatly even at short distances, and its modeling requires complex mathematical algorithms that take into account all obstacles and sources.

Keywords: *electromagnetic radiation, electromagnetic environment, environmental safety, electromagnetic wave, field strength, energy flux density.*

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ТИХЕНКО Оксана Миколаївна — доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, Державний університет "Київський авіаційний інститут" (пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058; e-mail: oksana.tykhenko@npp.kai.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6459-6497).

КОНОВАЛОВ Андрій Олександрович — здобувач ступеня доктора філософії, Державний університет "Київський авіаційний інститут" (пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058; e-mail: 9029317@stud.kai.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0009-0008-3137-0051).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

Аномальна погода в Чорнобильському заповіднику – випробування для дикої фауни. За даними метеостанції "Чорнобиль", перша декада січня 2026 року виявилася аномальною: кількість опадів значно перевищила кліматичну норму, температура різко коливалася — відлиги з дощами швидко змінювалися сильними морозами. "*Саме така нестійка погода спричинила утворення льодової кірки на рослинності та щільного насту на поверхні снігу. Вплив цих погодних умов на дику фауну безпосередній і відчутний: ускладнюється пересування, наст ріже лапи, заважає тікати від хижаків, утруднює пошук їжі й суттєво підвищує енерговитрати*", — наголошують у заповіднику. За словами дослідників, виживання тварин в таких умовах залежить від витривалості, адаптаційних механізмів і мінімального людського втручання.