

УДК 621.396:621.391.82

DOI: 10.31673/2412-9070.2022.060913

В. В. ВИШНІВСЬКИЙ¹, доктор техн. наук, професор;С. В. ОЛЬШЕВСЬКИЙ², доктор техн. наук, доцент,¹ Державний університет телекомунікацій, Київ.² Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

МЕТОДОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ АТМОСФЕРНО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

Розглянуто методологічний підхід до оцінювання впливу іонізуючого випромінювання на ефективність функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку (АОЛЗ), зважаючи на техногенно навантажені території України.

Зазначено, що ефективність функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку доцільно методологічно розглядати через вплив зовнішніх факторів із використанням комплексного підходу, беручи до уваги концепції уранової спадщини в Україні і в Європі.

Доведено, що захищеність приймачів АОЛЗ від гама-випромінювання буде визначатися послаблювальною здатністю елементів їх конструкції і напрямком вектора променистого потоку.

Підтверджено висновки про те, що через добір приймача з необхідним значенням інтегральної чутливості, а також завдяки зменшенню смуги пропускання можна досягти зниження рівня впливу іонізуючого випромінювання на приймач АОЛЗ.

Встановлено залежність середньої енергії гама-випромінювання від кута падіння в точку спостереження.

Зазначено, що вплив іонізуючого випромінювання призводить до зниження відношення сигнал/шум і ефективної чутливості приймача. За деяких обставин іонізуюче випромінювання може спричинити перебої зв'язку через насичення приймача. Водночас крім корисного сигналу, лінза приймача також збирає деякі небажані фонові випромінювання, які можуть складатися з прямого сонячного світла, відбитого сонячного світла або розсіяного сонячного світла від гідрометеорів чи інших об'єктів. Їх ефект можна зменшити за допомогою вузької спектральної смуги пропускання та просторової фільтрації перед фотодетектуванням. Однак незначний фоновий шум може потрапляти в просторовий і частотний діапазони детектора, що може обмежити продуктивність системи, спричинюючи змінне зміщення в перетвореному електричному сигналі.

Ключові слова: випромінювання; виявлювальна здатність; приймач; фактори; атмосферно-оптичні лінії зв'язку.

Вступ

Під методологією досліджень у загальному визначенні розуміються принципи побудови, методи, форми організації та способи наукового пізнання.

У процесі дослідження умов функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку, зважаючи на техногенно навантажені території України, доцільно методологічно розглядати вплив зовнішніх факторів із використанням комплексного підходу.

Комплексний підхід охоплює аналіз і узагальнення світового досвіду та досліджень із питань впливу урановидобування, джерел природної радіації, методів теорії ймовірностей і математичної статистики для оброблення результатів вимірювань та моделювання; комп'ютерні методи оцінювання дозових навантажень та радіаційних ризиків.

Ефективність функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку має розглядатися з огляду на концепції уранової спадщини в Україні і в Європі, що стосується урановидобувних країн і рекльтивації уражених територій. Також потрібно зважати на характеристику природних джерел іонізуючого випромінювання України як території з високим рівнем природної радіоактивності.

Необхідно під час оцінювання впливу іонізуючого випромінювання на функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку проводити аналіз щодо визначення потужності еквівалентної дози гама-опромінення; визначення вмісту радіонуклідів ^{238}U – ^{234}U – ^{230}Th – ^{226}Ra – ^{210}Po – ^{210}Pb , ^{230}Th у компонентах довкілля — ґрунтах, воді, аерозолях; визначення об'ємних концентрацій Rn-222 на територіях виробництв, будівлях промислового призначення, визначення ексхаляції радону Rn-222 на поверхні гірських відвалів, забруднених територіях промислових майданчиків: визначення вмісту супутніх елементів, концентрація яких перевищує фонові для кожного об'єкта, наприклад V, Sc, Cr, As, Ni для територій уранових родовищ альбітитової формації; визначення вмісту радіонуклідів.

Серед факторів потрібно брати до уваги вплив зовнішнього середовища особливо на територіях, де на поверхню землі виходять граніти, гнейси, фосфорити тощо, де вміст урану і торію в них становить до 100 кларків і більше. Більш високі дози опромінення характерні для територій із підвищеною природною радіоактивністю і районів розміщення підприємств, які видобувають і переробляють мінеральну сировину (особливо радіоактивну).

Вміст радону і його продуктів розпаду в повітрі цих районів зазвичай вищий за чинні нормативи. Можна виокремити та узагальнити фактори, які необхідно враховувати під час застосування атмосферно-оптичних ліній зв'язку: природні поклади урану; вміст урану в гірських породах, ґрунтах; потужність та гама-активність порід; потужність дози на висоті 1 м для ідентифікації радононебезпечних зон у межах територій суб'єктів господарювання на локальному рівні.

Аналіз факторів дасть змогу розробити класифікацію потенційних рівнів після проведення комплексного оцінювання радіаційної обстановки і встановлення основних джерел формування доз опромінення.

Основна частина

Іонізуюче випромінювання може погіршити продуктивність каналів атмосферно-оптичних ліній зв'язку. Фактично, крім корисного сигналу, лінза приймача також збирає деякі небажані фонові випромінювання, які можуть складатися з прямого сонячного світла, відбитого сонячного світла або розсіяного сонячного світла від гідрометеорів чи інших об'єктів [1]. Їх ефект можна зменшити за допомогою вузької спектральної смуги пропускання та просторової фільтрації перед фотодетектуванням. Проте незначний фоновий шум може потрапляти в просторовий і частотний діапазони детектора, що може обмежити продуктивність системи, спричинюючи змінне зміщення в перетвореному електричному сигналі. Це, зі свого боку, призводить до зниження відношення сигнал/шум (SNR) [2; 3] і ефективної чутливості приймача [4]. За деяких обставин фонове випромінювання може зумовити перебої зв'язку через насичення приймача [3].

У (теоретичному) випадку приймача з дифракційним обмеженням рівень отриманого фонового шуму не залежить від розміру апертури приймача [5; 7]. На практиці приймач АОЛЗ використовує лінзу та фотодетектор заданого розміру і, отже, має кут огляду, який значно перевищує межу дифракції. У приймачах із фіксованим полем зору потужність фонового шуму пропорційна до площі зіниці приймача [6]. Експериментальні вимірювання показують, що тоді як потужність прийнятого оптичного сигналу зазвичай становить від десятків до сотень мікровоат, потужність фонового випромінювання міститься в діапазоні кількох мікровоат для розсіяного сонячного світла хмарами або туманом близько сотень мікровоат для відбитого сонячного світла та приблизно до 10 мВт для прямого сонячного світла [8]. Однак цей останній випадок може статистично відбуватися менше ніж 1 год на рік.

Фоновий шум може бути статистично змодельований за допомогою випадкового процесу Пуассона [3; 8]. Коли рівень фонового випромінювання є відносно високим, середня кількість відповідних отриманих фотонів є достатньо великою, щоб дозволити апроксимацію розподілу Пуассона методом Гаусса [8]. Оскільки середнє значення фонового шуму відхиляється схемою приймача, пов'язаного зі змінним струмом, середнє значення шуму дорівнює нулю. Крім того, внесками від взаємодії сигналу з фоновим випромінюванням через нелінійну характеристику фотодетектора [2] можна практично знехтувати [10], і можна використувати незалежну від сигналу модель Гаусса.

Технічний стан приймача за умов впливу іонізуючого випромінювання буде визначати загальний технічний стан АОЛЗ. Водночас оцінювання впливу радіоактивного випромінювання на працездатність приймачів АОЛЗ має базуватися на результатах експериментальних досліджень впливу потужності дози і дози радіоактивного випромінювання.

Захищеність приймачів АОЛЗ від гама-випромінювання буде визначатися послаблювальною здатністю елементів їх конструкції і напрямком вектора променистого потоку. З цієї позиції найменш захищеним приймач АОЛЗ буде з боку передньої частини апертури АОЛЗ. Це пояснюється тим, що чутливу площу приймача розташовано в положенні для прийняття максимуму інфрачервоного випромінювання із зазначеного напрямку.

Зазвичай із задньої частини і бокових сторін приймач захищений від гама-випромінювання корпусом, виготовленим, як правило, із щільних матеріалів і металів [6–8].

За віссю приймача з передньої частини приймач відокремлюється від зовнішнього середовища трактом приймання, до складу якого можуть входити різноманітні лінзи та дзеркала, розміщені на металевих підкладках. Приймач захищений від гама-випромінювання оптичним матеріалом і розташованими за ним елементами оптичної системи (дві-три перешкоди із різноманітного матеріалу).

Елементи оптичної системи можуть виготовлятися з різноманітних матеріалів, поданих у таблиці.

Коефіцієнти послаблення для матеріалів, які можуть використовуватися під час виготовлення елементів АОЛЗ

Матеріал	Коефіцієнт
(Al ₂ O ₃)	3,1
(AlK ₃)	3,1
(MgO ₂)	4,95
SiO ₂	4,75
(Ge)	2,3
(AsS ₃)	2,25

З огляду на послаблення гама-випромінювання елементами тракту приймача АОЛЗ, які безпосередньо впливають на приймач, потужність дози і дозу гама-випромінювання визначатимуться так:

$$P_{\gamma}^B = \frac{P_{\gamma}^{\Pi}}{K_{\text{осл}_{\Pi}}^{\gamma}}, \quad (1)$$

$$D_{\gamma}^B = \frac{D_{\gamma}^{\Pi}}{K_{\text{осл}_{\Pi}}^{\gamma}}, \quad (2)$$

де P_{γ}^B — потужність дози; D_{γ}^B — доза гама-випромінювання, яке падає на апертуру приймача АОЛЗ; $K_{\text{осл}_{\Pi}}^{\gamma}$ — коефіцієнт ослаблення гама-випромінювання елементами тракту прийому приймача АОЛЗ.

Захисні властивості елементів тракту прийманя приймача АОЛЗ від будь-якого виду радіаційного випромінювання кількісно оцінюються коефіцієнтом послаблення ($K_{\text{осл}_{\Pi}}^{\gamma}$), який обчислюється за формулою

$$K_{\text{осл}} = \frac{\ln \Phi_0}{\ln \Phi_x \cdot d}, \quad (3)$$

де Φ_0 — густина потоку радіоактивного випромінювання, що падає на перешкоду; Φ_x — густина потоку радіоактивного випромінювання за перешкодою; d — товщина перешкоди.

Потік гама-квантів, що падає на перешкоду, після її проходження набуде такого значення:

$$\Phi_{x\gamma} = B_{\gamma} \Phi_{0\gamma} e^{\left(-\frac{d}{d_{0,5}^{\gamma}}\right)}, \quad (4)$$

де B_{γ} — фактор нагромадження γ -квантів, які проходять через речовину завтовшки d ; $d_{0,5}^{\gamma}$ — шар половинного послаблення гама-випромінювання.

Фактор нагромадження враховує збільшення густину гама-випромінювання в досліджуваному місці простору. При цьому на його значення впливає як розсіювання в матеріалі перешкоди падаючого потоку γ -квантів, так і вторинне випромінювання.

Розсіювання гама-випромінювання в перешкоді зумовлюється широкою формою потоку падаючих на перешкоду γ -квантів, що характерно для випромінювання, створене внаслідок радіоактивного зараження місцевості. Поява вторинного гама-випромінювання в перешкоді відбувається внаслідок ефекту створення пар і Комптон-ефекту.

Значення параметра залежить від товщини перешкоди, при цьому, якщо вона менша або така, що дорівнює $d_{0,5}^{\gamma}$, $B_{\gamma} \cong 1$. У діапазоні енергій γ -квантів, який дорівнює 0,2...1,5 МеВ, величини для оптичних матеріалів тракту прийманя АОЛЗ, а також для деяких металів, які використовуються під час виготовлення корпусу й елементів конструкції АОЛЗ, наведено в таблиці.

Поява незворотних радіаційних ефектів у напівпровідниках залежить як від енергії гама-

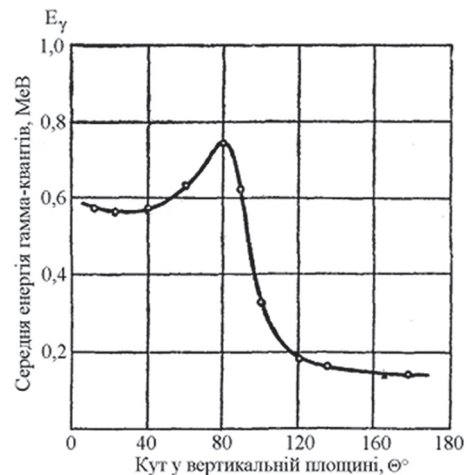
квантів, так і від виду і характеристик їх взаємодії з речовиною, з якої виготовлений приймач АОЛЗ.

Процес перетворення енергії гама-випромінювання в кінетичну енергію руху частинок змінює внутрішню структуру речовини (при енергіях гама-квантів 0,2...1,1 МеВ) і призводить до утворення пар і Комптон-ефекту [6]. Ефект виникнення пар спостерігається при енергії гама-квантів, більшої за 1,02 МеВ, оскільки енергія гама-квантів, які випромінюються уламками ділення ядерного палива, міститься в межах 0,3...0,6 МеВ.

Сутність Комптон-ефекту полягає в іонізації атомів під впливом гама-випромінювання. Ця іонізація супроводжується появою електронів віддачі з власною енергією і залежить від кута зіткнення електронів віддачі з атомом речовини.

Випромінювання, що надходить від верхнього напівпростору, має значно меншу середню енергію (нижчу за 0,2 МеВ). Отже, середня енергія гама-випромінювання продуктів техногенної аварії стає меншою під час випадіння їх на місцевість завдяки розсіянню квантів повітрям та ґрунтом [3].

Залежність середньої енергії гама-квантів від кута падіння в точку спостереження зображено на рисунку. Графік показує, що горизонтальна компонента ($\Theta = 70-90^\circ$) є найбільш жорсткою та має енергію майже 0,7 МеВ.



Залежність середньої енергії гама-випромінювання від кута падіння в точку спостереження

Якщо для атома речовини, в якій під впливом гама-квантів виникає Комптон-ефект, справедлива нерівність

$$E_{dth} < E_{do}, \quad (5)$$

де E_{dth} — порогова для даної речовини енергія зміщення, то в цій речовині в результаті одиничного зіткнення і подальшого зсуву атома з вузла кристалічної решітки виникає точковий дефект, що призводить до порушення структури речовини. Наприклад, в кремнії це буде дефект Френкеля, у разі виникнення якого утворюється пов'язана пара вакансії, зміщеної в міжвузля атома.

Зі збільшенням концентрації точкових дефектів, пов'язаних із ростом поглиненої речовиною дози випромінювання, утворюються комплекси радіаційних дефектів, які з подальшим зростанням величини поглиненої дози можуть утворювати мікроскопічні ділянки з сильно порушеною кристалічною решіткою [2; 3].

У разі виконання умови (5) буде спостерігатися процес відтворення незворотного радіаційного ефекту.

Імовірність появи незворотних радіаційних ефектів у речовині визначається величиною поглиненої дози (D_{γ} , рад) гама-випромінювання.

У полі впливу гама-випромінювання спостерігається збільшення току, що зрештою через функціональну залежність сумарного внутрішнього шуму приводить до зміни виявляльної здатності приймача АОЛЗ. При цьому технічний стан АОЛЗ приймача може змінитися на неробочий стан — стан приймача АОЛЗ, при якому значення хоча б одного його параметра, що характеризує його здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам експлуатаційно-технічної документації; або на граничний стан — стан приймача, при якому його подальше використання за призначенням недопустимо або недоцільно.

Висновки

У статті розглянуто методологічний підхід до оцінювання впливу іонізуючого випромінювання на ефективність функціонування атмосферно-оптичних ліній зв'язку. Зазначений підхід може бути реалізований як рекомендації щодо вдосконалення конструкції та використання АОЛЗ.

Розглянуто порядок врахування потужності дози і дози радіоактивного випромінювання і процедура визначення вихідних даних, необхідних для подальших розрахунків.

Подальшим напрямком досліджень має бути апробація рекомендацій стосовно зниження впливу випромінювання на можливості АОЛЗ для отримання порогових значень випромінювань, а також підтвердженням адекватності рекомендацій через оцінювання збігу здобутих результатів із відомими результатами.

Список використаної літератури

1. Ohshima T., Onodaa S. Radiation Resistance of Semiconductors. In: Kudo H. (eds) Radiation Applications // Advanced Course in Nuclear Engineering, Springer, Singapore, 2018. Vol 07.

2. Підвищення показників якості системи управління послугами мережами майбутнього / В. Б. Толубко, Л. Н. Беркман, Л. П. Крючкова, А. Ю. Ткачов // Наукові записки УНДІЗ. 2018. № 3. С. 5–11. URL:

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzundiz_2018_3_3.

3. Devgan P. A review of optoelectronic oscillators for high speed signal processing applications // ISRN Electron., 2013. Vol. 2013. P. 1–16.

4. Kremenetskaya Y. A., Liskovskiy I. O., Zhukova E. R. Quasi-optical approach to the analysis of the energy model of millimeter wave propagation and antenna characteristics // IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques, Ukraine, Kyiv, 2017. P. 395–398.

6. Koval S. A., Gorzhiy V. A., Pulnev A. S. Analysis of the possibilities of organizing communication in the field area with the help of atmospheric optical communication lines. Technical sciences: traditions and innovations: materials of international correspondence scientific conf., Chelyabinsk, January 2012, edited by G. D. Akhmetova, Chelyabinsk: Two Komsomol Members, 2012. P. 168.

7. Poplavskiy O. A., Poplavskaya A. A., Korotun I. A. Peculiarities of the Organization of Laser Information Transission through the Atmosphere for the Development of Methods and Software and Hardware for Predicting the Characteristics of Signal Images, Fiber-optic Technologies in Information (Internet, Intranet, etc.) and Energy Networks, Vinnytsia, 2014. P. 206–209.

8. Myronenko L., Yudinsev V. Increasing the Radiation Resistance of Integrated Circuits, Constructive Methods Based on Industrial Technology // ELECTRONICS: Science, Technology, Business, 2012, No 8 (00122). P. 74–87.

9. Turovsky O. L. To the question of determining of the activity of the mixture of accidental emissions from a nuclear power plant in case of a common type accident // Works of the Academy 1998. No 6. С. 84–88.

10. Vorobiienko P. P., Nikitiuk L. A., Reznichenko P. I. Telecommunication and Information Networks // SUMMIT-Book Publ., Kyiv, 2010. P. 592.

V. V. Vishnevskiy, S. V. Olshevskiy

METHODOLOGICAL APPROACH TO ASSESSING THE INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF FREE-SPACE OPTICAL COMMUNICATION

The methodological approach to the assessment of the influence of ionizing radiation on the efficiency of functioning of free-space optical communication, taking into account technogenically loaded territories of Ukraine, is considered.

It is indicated that the efficiency of functioning of free-space optical communication (FSO) should be methodologically examined through the influence of external factors using an integrated approach taking into account the concept of uranium heritage in Ukraine and Europe.

It is proved that the protection of FSO transceivers from gamma radiation will be determined by the attenuating ability of their design elements and the direction of the radiant flux vector.

The conclusions that it is possible to reduce the level of ionizing radiation impact on the FSO receiver by selecting a receiver with the required value of integral sensitivity, as well as by reducing the bandwidth, are confirmed.

The dependence of the average energy of gamma radiation on the angle of incidence at the observation point is established.

It is pointed out that the influence of ionizing radiation leads to a decrease in the signal-to-noise ratio and effective sensitivity of the receiver. In some cases, ionizing radiation can cause communication interruptions due to receiver saturation.

In addition to the useful signal, the receiver lens also collects some unwanted background radiation, which may consist of direct sunlight, reflected sunlight or scattered sunlight from hydrometeors or other objects. Their effect can be reduced by using a narrow spectral bandwidth and spatial filtering before photodetection. However, minor background noise can enter the spatial and frequency ranges of the detector, which can limit system performance by causing a variable offset in the converted electrical signal.

Keywords: radiation; detecting ability; transceiver; factors; free-space optical communication.

