

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.395

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/06>

**Блаженний Н.В.**

Державний університет телекомунікацій

### ВПЛИВ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ (КОСМІЧНОЇ РАДІАЦІЇ) НА ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ: ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ

*Активне зростання мереж при одночасному збільшенні довжини ділянок, а також розширення спектру застосування оптоволокна призвели до того, що виникла необхідність вивчати низку факторів, які впливають на якість роботи оптичних компонентів у різних умовах їх експлуатації. Відомо, що будь-який електронний або фотонний компонент може постраждати від дії ядерного випромінювання. У разі виникнення щонайменшої несправності системи, яка базується на роботі фотонних компонентів, це суттєво вплине на якість робіт і вартість усього обладнання. Ремонт оптичних компонентів або систем у радіаційному середовищі просто немислимий через надвисокий рівень радіації. Також майже неможливо відремонтувати бортове обладнання після виведення супутника на орбіту чи старт ракетно-космічного комплексу. Саме тому важливо забезпечити справність усіх компонентів і систем ще до початку виконання їх місії: визначити проблеми й уникнути їх. Для забезпечення цього варто ретельно дослідити, як іонізоване випромінювання впливає на роботу й надійність низки оптичних компонентів, над чим сьогодні працює низка науковців. Метою статті є дослідження інформаційно-джерельного забезпечення проблеми впливу сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичне волокно; створення інформаційної бази статей і матеріалів, на які можна опиратися в ході подальших досліджень у питанні зміни параметрів компонентів волоконно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіаційного опромінення. У статті всебічно досліджується інформаційно-джерельне забезпечення наукової проблеми впливу сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичне волокно. На основі огляду матеріалів українських і зарубіжних авторів створено інформаційну базу статей і матеріалів, на які можна опиратися в ході подальших досліджень у питанні зміни параметрів компонентів волоконно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіаційного опромінення.*

**Ключові слова:** оптичне волокно, волоконно-оптична лінія зв'язку, радіаційне опромінення, радіаційно-стійке оптоволокно, іонізуюче випромінювання, ефект заміщення, іонізаційні ефекти, шуми, згасання.

**Постановка проблеми.** Значний прогрес в електроніці, оптиці, квантовій та оптоелектронній технології особливо на початку XXI століття уможливив використання оптоволокна як середовища для передачі великих об'ємів інформації на значні відстані, підвищивши швидкість систем передавання даних з 40 до 80 Гбіт/с і розширивши їх смугу пропускання до близько 100 ГГц. Нині смуга пропускання середовища передачі оптичних кабелів стала нараховувати десятки ТГц, а обсяг переданої інформації з одного волокна у волоконно-оптичних лініях зв'язку збільшився в рази. Завдяки цьому дальність передавання сигналів зросла до декількох сотень кілометрів, а поліпшення параметрів систем передачі даних покращило якість уже наявних послуг зв'язку й Internet, створення нових видів інформаційних мереж і систем. Однаково

активно оптичне волокно сьогодні застосовується в нафтовій, атомно-енергетичній, авіакосмічній галузях. Так, воно стало сировиною для датчиків, якими вимірюють напругу, температуру, тиск та інші параметри. Наприклад, оптоволоконні датчики для зняття показників у нафтових свердловинах для вимірювання температури й тиску, – такі пристрої гарно себе проявляють у середовищі високих температур, а завдяки невеликому розміру й майже відсутності потреби споживання електричної енергії мають переважаючі характеристики перед звичними електронними. Широко використовується оптичне волокно в гідрофонах для сейсмічних або гідролокаційних приладів; системах із гідроновим датчиком – у нафтовидобувній промисловості; у лазерному гіроскопі – для навігації кораблів і літаків. Також оптоволокно застосовується

для передачі інформації на особливо важливих об'єктах, наприклад, військових базах, атомних станціях. Реальними є й перспективи використання в космічному просторі. Так, уже в другій половині цього року американська компанія «Laser Light Communications» планує запуск глобальної програмно-керованої волоконно-супутникової платформи, яка в перспективі буде розширена скупченням 12 супутників навколоземної орбіти, що використовуватимуть лазерні промені замість радіохвиль [4]. Нині оптичне волокно вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передавання інформації, а також найперспективнішим середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані. Кількість пристроїв, підключених до Інтернету, зростає настільки швидко, що вже зараз існує потреба повного переходу на оптичний зв'язок. Активне зростання мереж при одночасному збільшенні довжини ділянок, а також розширення спектру застосування оптоволоконна призвели до того, що виникла необхідність вивчити низку факторів, які впливають на якість роботи оптичних компонентів у різних умовах їх експлуатації. Питання впливу радіаційного випромінювання на оптичне волокно набуло актуальності з потребою прокладання волоконно-оптичних кабелів зв'язку в агресивних середовищах, як-от: в активних зонах атомних станцій, для військових потреб, а також для використання в умовах космічної радіації, що є дуже перспективним і затребуваним сьогодні напрямом досліджень і для вітчизняних наукових досліджень. Але, на жаль, ця тема в українському науковому полі висвітлена незначною мірою.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Аналізуючи інформаційно-джерельну базу забезпечення окресленої наукової проблематики, варто відмітити, що в українському науковому середовищі питання впливу космічної радіації (радіоактивного опромінення) на оптичні системи й компоненти висвітлено надзвичайно недостатньо.

Попри те що існує перелік навчальних посібників і підручників (більш давніх і новітніх), які викладають загальні відомості про волоконну оптику, волоконно-оптичні кабелі та системи передачі даних, сучасні технології цифрових оптоволоконних мереж, серед наукових розвідок є зовсім мало досліджень, присвячених питанню радіаційної стійкості оптичного волокна; дослідження параметрів впливу іонізованого опромінювання на оптоволоконно й компонентів оптичних кабелів і систем. Дещо наближеними до теми окресленого нами наукового питання є дві публі-

кації колективу маже однакового складу авторів: «Підвищення ефективності оптоволоконних каналів зв'язку» [30] і «Підвищення працездатності оптоволоконних структур в умовах високих рівнів потужності іонізуючого випромінювання». У цих статтях науковці розглядають фактори, що впливають на втрати енергії при генерації й ввіді випромінювання джерела в оптичне волокно. У першій роботі автори доходять висновку, що точність розташування сполучної площини в пристроях узгодження та взаємного розміщення випромінювачів та оптичного волокна дає можливість знизити втрати при з'єднанні й передавати інформацію з більшою надійністю без регенерації, зберігши працездатність оптоволоконної системи в умовах впливу радіаційних факторів. Друга праця поглиблює першу та пропонує розробку пристрою узгодження між джерелом та одномодовим волокном, що дає змогу компенсувати втрати потужності в лініях передач і контрольно-вимірювальних приладах під впливом радіоактивності. Досягти цього вони планують шляхом підвищення ефективності вводу випромінювання високопотужних джерел в оптичне волокно при високих рівнях затухання потужності електромагнітної хвилі. Однак зазначимо, що ці статті мають вузькоспеціалізований і вузькоприкладний характер, де вплив власне іонізованого випромінювання розглядається дуже опосередковано поряд із іншими факторами впливу. Провівши вольтамперну характеристику діодних структур із р-n-переходом, світлодіодів, лазерних діодів, фотодіодів фотоприймачів і лавинних фотодіодів під впливом штучного опромінення, автори виявили, що вплив радіації виявляється в зменшенні інтенсивності світла, що випромінюється світлодіодом, і в зниженні чутливості фотоприймача, який приймає світловий сигнал. Дослідники стверджують, що обидва ефекти викликають суттєве зниження якості сигналу, що передається по оптоволоконній лінії, зазначаючи, що при збільшенні нейтронних потоків до  $\sim 5 \times 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> оптичні компоненти й лінія зв'язку виходять повністю з ладу. Це нині все, що пропонують вітчизняні дослідники. Як бачимо, ця проблематика в українському полі досліджень є досить скупою на розробки як теоретичного, так і практичного характеру. За відсутності достатньої кількості вітчизняних наукових досліджень і в умовах розширення спектра використання оптичних волокон ми бачимо перспективи подальшого вивчення впливу радіаційного випромінювання на оптоволоконно, що спонукало нас проаналізувати повне інформаційно-джерельне забезпечення

визначеної наукової проблеми в площині світового досвіду.

**Постановка проблеми.** Відомо, що будь-який електронний або фотонний компонент може постраждати від дії ядерного випромінювання. У разі виникнення щонайменшої несправності системи, яка базується на роботі фотонних компонентів, це суттєво вплине на якість робіт і вартість усього обладнання. Ремонт оптичних компонентів або систем у радіаційному середовищі просто немислимий через надвисокий рівень радіації. Також майже неможливо відремонтувати бортове обладнання після виведення супутника на орбіту чи старт ракетно-космічного комплексу. Саме тому важливо забезпечити справність усіх компонентів і систем ще до початку виконання їх місії: визначити проблеми й уникнути їх. Для забезпечення цього варто ретельно дослідити, як іонізоване випромінювання впливає на роботу й надійність низки оптичних компонентів, над чим сьогодні працює низка науковців.

**Метою статті** є дослідження інформаційно-джерельного забезпечення проблеми впливу сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичне волокно; створення інформаційної бази статей і матеріалів, на які можна опиратися в ході подальших досліджень у питанні зміни параметрів компонентів волоконно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіаційного опромінення. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати низку науково-пошукових і науково-дослідних завдань, а саме: зібрати базу загальнотеоретичних і практичних матеріалів у полі окресленої наукової тематики; проаналізувати цю базу, визначити найбільш цікаві та перспективні дослідження; ознайомитися з ними й узагальнити отримані дані для подальших шляхів проведення досліджень у полі окресленої проблематики.

**Виклад основного матеріалу.** Варто зазначити, що за більше ніж 20 років студювання розвитку оптоволоконних технологій учені пройшли чималий поступ, а науковий доробок зарубіжних науковців в окресленій проблематиці є значно більший. Сьогодні однозначно відомо, що дія іонізуючого випромінювання на оптичне волокно має багатофакторний характер. Учені розрізняють корпускулярні й електромагнітні іонізуючі випромінювання. Корпускулярні випромінювання представляють вплив нейтронів, протонів, електронів, альфа- й бета-частинок, а також осколків розділення ядер. До електромагнітних іонізуючих випромінювань відносять рентгенівські й гамма-випромінювання. Вплив іонізуючого опромінення

полягає в тому, що, діючи на речовину, залежно від енергії частинок викликає зміщення атомів решітки та іонізацію. Ефект зміщення полягає в змінненні з нормального положення атомів у кристалічних решітках. При цьому в структурі решітки утворюються дефекти: вакансії, міжвузлові проникнення додаткових атомів, дислокації. Ці дефекти можуть виявляти нестійкий характер, і після припинення дії радіації решітка може відновитися. Більш складні дефекти утворюються в результаті об'єднання атомів. Особливо шкідливими є поєднання дефектів з уже наявними в матеріалі домішками або з вже наявними дефектами решіток. Іонізаційні ефекти спостерігаються у вигляді змінних явищ, пов'язаних з утворенням електронно-іонних пар. Зростання числа вільних електронів та іонізованих атомів змінює електричні характеристики матеріалу. Основними джерелами енергетичних частинок, які викликають занепокоєння науковців, є такі: 1. Протони й електрони, що потрапили в радіаційні пояси Ван Аллена. 2. Важкі іони, що потрапили в магнітосферу. 3. Протони космічних променів і важкі іони. 4. Протони й важкі іони із сонячних спалахів. На рівень усіх цих джерел випромінювання впливає сонячна активність, потужність енергії якої коливається від кеВ до ГеВ і більше [28]. Тривають проекти, які вивчають радіаційні пояси Землі та зовнішній простір довкола нашої планети.

Ученими підсумовано, що довготривалі іонізуючі пошкодження через протони й електрони можуть спричинити зміну порогових показників пристроїв, збільшення споживання пристроєм енергії, зміщення часових проміжків на виконання завдань, зниження ефективності й функціональності обладнання, оптичні втрати тощо. Вони резюмують, що сьогодні вкрай важливо забезпечити справність усіх компонентів і систем, які використовуються в обладнанні, аби уникнути небезпеки поломок, недоліків роботи, необхідності подальшого ремонту, адже оптичні компоненти вже активно застосовуються в космічних апаратах різного призначення, як-от світлодіоди та фотодіоди – в оптронах [24]. У космічній галузі також використовують волоконно-оптичні гіроскопи для навігації космічних кораблів [10]. Як зондування на борту розглядалися фібро-бреггівські решітки, наприклад, у ядерних та інтелектуальних космічних силових установках [8; 25] і для космічних волоконно-оптичних систем зв'язку [15]. Різні типи оптичних волокон вивчалися для використання в космічних системах оптичного зв'язку та лазерних далекомірних системах.

У недалекій перспективі – використання бездротового оптичного зв'язку у внутрішньо супутниковому вільному просторі [23]. Атомно-енергетична промисловість також залучила різноманітні можливості застосування оптичних волокон: як для потреб зв'язку, так і для зондування [30]. Оптиковолоконні датчики вже сьогодні застосовуються для контролю температури й розподіленого температурного зондування в експериментальних реакторах і навколо них [7]. Бачимо два шляхи застосування оптичних компонентів у середовищі використання термоядерного синтезу. Перший – це оптична діагностика, що планується в роботі майбутнього Міжнародного термоядерного експериментального реактора, де запропоновано використання волоконно-оптичної спектроскопії та інфрачервоної термографії. Другий – це програма передачі даних, де волоконно-оптичні лінії пропонуються для зв'язку між віддаленими маніпуляторами та диспетчерською під час операцій з технічного обслуговування реактора ITER [20]. Знайшли своє застосування й оптичні компоненти в системах передачі даних для виконання експериментів з термоядерної фізики [17]. Так, у новому поколінні досліджень – проекти Compact Muon Solenoid (CMS) та ATLAS, що розробляються для роботи у Великому адронному колайдері, планують використовувати оптичні зв'язки з їх позитивними характеристиками високої пропускної здатності, низької потужності та стійкості до шуму [6; 19]. Вплив ядерного випромінювання на оптичне волокно, конкретніше, на діоксин кремнію, вивчається щонайменше впродовж останніх тридцяти років [30]. Від початку спостережень відомо, що оптичне волокно може бути дуже чутливим до впливу радіаційного випромінювання [16]. Так, експериментальне дослідження «Космічна радіаційна чутливість скла: перші результати у створенні всебічної бази даних коефіцієнтів доз», вивчаючи вплив гамма- та протонного випромінювання на пропускання й показники заломлення, сформувало одну з перших баз даних, яку почали використовувати для прогнозування впливу космічного випромінювання на різні оптичні системи [12]. Науковий звіт колективу дослідників «База даних дослідження впливу радіаційного впливу на оптичне волокно» підсумував масштабне дослідження впливу радіації на компоненти оптично-волоконного кабелю. Уже тоді їх експериментальні випробування вимірювали показники як стійкої реакції оптичних волокон і кабелів, що піддавалися постійному випромінюванню, так і перехідної реакції оптичних

волокон і кабелів, що зазнавали дії імпульсного випромінювання. Випробуване ними волокно сьогодні вже активно використовують [5]. Ученими встановлено, що навіть за низьких загальних доз опромінення оптичне ослаблення волокна може значно збільшитися, а його загасання значно зростає [2]. Так, у багатомодовому оптичному волокні при типовій дозі 104 Рад загасання зростає на 70 дБ/км на довжині хвилі 1300 нм, що може призвести до виходу з ладу всієї лінії зв'язку. Наслідком радіаційного опромінювання оптичного волокна також може бути поява шумів, утворення яких пов'язане зі зміною в часі рівнів загасання волокна в різних його ділянках. Ці шуми стають причиною порушення зв'язку незалежно від кінцевого рівня підвищення загасання. Експерименти показують, що в результаті іонізованого опромінення змінюються первинні оптичні параметри самого матеріалу, причому найбільших змін зазнає коефіцієнт загасання. Такий ефект зміни величини згасання називається внесеним згасанням. Досліджуючи ці параметри, група вчених розробила методику прогнозування згасання, індукованого радіацією, у низці оптичних волокон. За їхніми дослідженнями, довгострокове згасання можна спрогнозувати з точністю близько 15% за рівня гамма-променів 60 Со для потужностей доз від 100 Гр/год до 3 Гр/год [30]. Сьогодні їхніми розрахунками та їхніми результатами керуються такі дослідники. Наприклад, для випробування випромінювань оптичних волокон і систем в Інституті Фраунгофера. Перші підсумки радіаційних випробувань цього наукового підрозділу, який досліджував вплив іонізуючого випромінювання на електронні, оптоелектронні та фотонні компоненти й системи, лягли сьогодні в роботу Nuclear Effects in Electronics and Optics (NEO) у Fraunhofer INT [27]. Знання, отримані за понад 40-річний досвід у галузі, дають змогу їм нині консультувати інші компанії щодо кваліфікації випромінювання та зміцнення компонентів і систем, а також для розробки нових систем датчиків випромінювання. Ученими досліджено механізм виникнення внесеного загасання: при впливі іонізованого випромінювання в матеріалі скловолокна виникають процеси зміщення, що створюють описані вище дефекти решітки. Крім того, у вихідному матеріалі вже можуть існувати такі дефекти. Під впливом випромінювання на цих дефектах створюються електрони провідності й дірки, комбінації яких із вакансіями утворюють так звані центри фарбування, формування яких суттєво погіршують оптичні властивості



оптоволокна [9]. Через те що центри фарбування можуть поглинати фотони, які несуть інформацію на певних довжинах хвиль і можуть зникати в результаті теплових або оптичних процесів, з'являється додаткове загасання. Явище додаткового загасання називають унесеним загасанням. Установлено, що внесене загасання зменшується за більшої довжини оптичних хвиль. Так, на основі спричиненого гамма-випромінюванням загасання в Р-легованих волокнах відзначено чотири піки поглинання у видимій ділянці (470, 502, 540 і 600 нм) (інтегральна доза <math><2,0\text{ Гр}</math>). Науковцями відмічено, що індуковані радіацією втрати при 470 і 600 нм сильно залежать від потужності дози. При потужності дози 0,2 та 0,5 Гр/хв індукована втрата виявляє нелінійне відношення до загальної дози, при високій потужності дози (1,0 Гр/хв) і низькій дозі (0,1 Гр/хв), схоже, існує лінійна залежність від загальної дози [29]. Тобто величина внесеного загасання залежить від потужності дози опромінення. Розглядаючи загасання як функцію загальної дози, потужності дози, потужності світла й температури, учені дослідили явище загасання в дванадцяти одномодових оптичних волокнах при 1310 нм і 1550 нм. Серед зразків, що піддалися дії гамма-променів  $^{60}\text{Co}$  та дії поля високоенергетичного випромінювання, F-леговане стійке до випромінювання волокно SM від компанії Fujikura Ltd. продемонструвало надзвичайну толерантність – низьке загасання при 1310 нм, яке не перевищує 5 дБ/км навіть після загальної дози 1 МГр. У результаті цього експерименту виробником виготовлено 2500 км цього типу волокна. Учені ж заявили, що виконані вимірювання ще не дають повного розуміння основних механізмів загасання, але експериментально доведено, що концентрація легуючих речовин є одними з ключових факторів. Зменшення в часі й розмірі внесеного загасання говорить про процес відновлення загасання. Так, вимірюючи загальний ступінь залежності концентрацій радіаційно-індукованих центрів дефектів від дози опромінення, автори дослідження «Дефекти скла, індуковані радіацією: походження ступеню залежності концентрації від дози» при тестуванні діоксин-кремнієвого оптоволокна, легovanого германієм, детально спрогнозували криві пострадіаційного відновлення загасання [14]. Розвідка «Стійкість специфічних оптичних волокон до випромінювання, що зазнають дії іонізуючого випромінювання 650 кГр (Si)» виявила чіткі докази того, що після закінчення опромінення є очевидне відновлення загасання, але підтвердила, що майже відразу при повторному опроміненні з'являються

нові пошкодження. З порівнянь опромінення двох зразків одного й того ж багатомодового волокна, виконаного в однакових умовах, крім рівнів освітленості, вони дійшли висновку, що існують чіткі докази фотовідбілювання [1]. Унесене загасання, а також ступінь його відновлення характеризують радіаційну стійкість волокна. Питання розробки й випробування радіаційно-стійкого волокна цікаве й актуальне донині. Так, на шляху до розробки стійких до випромінювання хвилеводів із чистого діоксиду кремнію, а також легovanних науковці провели низку спостережень процесів пошкодження оптичних матеріалів радіоактивним випромінюванням [9]. Дослідження «Радіаційна стійкість наявних оптичних волокон» [16] установило співвідношення рівня втрат, спричиненого іонізованим випромінюванням, залежно від типу волокна, довжини хвилі, температури, потужності світла, потужності дози й типу випромінювання. Результати цих випробувань вразили. На основі опромінення гамма-променями та нейтронами одномодового (SM), багатомодового (MM SI) і полімерних оптичних волокон (POF) установлено таке: 1. Безперервне  $^{60}\text{Co}$  гамма-опромінення SM волокон з дозовою потужністю близько 1,5 Гр/с до кінцевої дози 106 Гр призводить до індукованих радіацією втрат лише від 0,85 до 1,3 дБ/10 м при довжині хвилі 1300 нм і температурі близько 30 °C. 2. Волокна GI мали втрати від 1,3 до 2 дБ/10 м за таких же умов. 3. Волокна MM SI з чистим сердечником  $\text{SiO}_2$  з високим умістом OH – близько 0,15 дБ/10 м, приблизно 850 нм і близько 0,1 дБ/10 м, близько 1060 нм (106 Гр, 30°C) продемонстрували найнижчі втрати. 4. POF із серцевиною з поліметилметакрилату також виявили збільшення втрат <math><EQ 0,1\text{ дБ/10 м}</math> (670 нм, кімнатна температура), але лише до значень гамма дози <math><EQ 800\text{ Гр}</math>. Проведено вивчення ролі легуючих елементів фтору (F) та германію (Ge) на радіаційну чутливість скла на основі кремнезему – «Ефекти випромінювання на заготовки на основі діоксиду кремнію та оптичні волокна» [13]. Результати іншого дослідження показали, що найкращу радіаційну стійкість має леговане фтором і термооброблене оптичне волокно (радіаційні втрати становлять близько 20 дБ/м у видимому діапазоні після опромінення нейтронами  $1\times 10^{23}\text{ н/м}^2$ ) [38]. Дані цього дослідження свідчать про те, що такі волокна можуть використовуватися дуже наближено до палаючої плазми для її діагностики та дистанційного зондування. Стаття «Радіаційна стійкість специфічних багатомодових та одномодових оптичних волокон при -25°C

перевищує повну дозу SLHC до дози 500 кГр (Si) виявила, що з низки потенційних одномодових і багатомодових оптичних волокон одномодове волокно DrakaElite Super RadHard та одномодові волокна Fibre X показують себе дуже добре, інші ж волокна дуже швидко показують високий рівень поглинання [18]. Сьогодні визначено такі параметри, які впливають на реакцію оптичного волокна на іонізуюче випромінювання: 1. Склад волокна та спосіб виготовлення. 2. Тип опромінення, потужність дози, загальна доза. 3. Температура, діаметр обгортки волокном. 4. Його термічна обробка й історія опромінення. 5. Довжина та потужність оптичної хвилі. 7. Час, що минув між експозицією та вимірюванням.

Таким чином, розглядаючи параметри внесеного згасання в оптичних волокнах, першочергово треба чітко визначити: який тип волокна та склад скла задіяні; які умови середовища й на якій довжині хвилі вимірюються значення. Залежність унесеного загасання та його часової характеристики від дози випромінювання, типу впливу випромінювання для різних видів волокон є досить різноманітною і становить чималий інтерес для наступних досліджень. У цьому сьогодні полягає перспектива подальших досліджень тестування різних видів оптоволокон. Так, у полі зору новітніх досліджень – вивчення оптичних волокон із новими типами конструкцій серцевин, стійких до випромінювання. Говориться про те, що нині вибір радіаційно-стійких волокон варто розглядати разом з іншими параметрами, такими як траса волокна в середовищі з високим випромінюванням, робоча довжина хвилі та потужність, а також продуктивність інших електронних компонентів у мережі для оптимізації загальної продуктивності мережі в середовищах із високим випромінюванням. Так, роботи японських учених «Техніка зондування з використанням оптичних волокон під високою дозою радіації» [21] та «Розробка методики дистанційного зондування з використанням радіаційно-стійких оптичних волокон в умовах високої радіації» [22] піддають випробуванням стійке до випромінювання оптичне волокно, що вже використовується для дослідження внутрішніх приміщень посудин під тиском реактора й резервуарів для первинного утримання на АЕС Фукусіма-Даїчі. Радіаційну

стійкість оптичного волокна покращено за рахунок збільшення кількості гідроксилу до 1000 ppm у чистому кремнеземному волокні.

**Висновки.** Зібрана база загальнотеоретичних і практичних матеріалів у полі окресленої наукової тематики та її аналіз дали змогу нам визначити найбільш цікаві й перспективні дослідження. Ознайомившись із ними й узагальнивши отримані дані, ми дійшли таких висновків:

1. Оптичні волоконні кабелі, розміщені на атомних електростанціях та інших середовищах із високим випромінюванням, таких як космічне середовище, фізичне середовище високих енергій і військові програми, повинні мати можливість підтримувати свою функціональність навіть при високому рівні кумулятивного радіаційного опромінення, адже стандартні оптичні волокна під час опромінення можуть зазнати непоправних фізичних змін, що призведуть до істотного їх ослаблення навіть при незначних дозах опромінення.

2. Щоб забезпечити надійну волоконно-оптичну мережу в середовищах із високим випромінюванням, необхідно проводити подальші випробування, аби переконатися, що зміни оптичних волокон або кабельних матеріалів не збільшують ослаблення та що функціональність мережі не порушується.

3. Правильний підбір оптичних волокон і кабелів для розгортання в середовищах із високим випромінюванням вимагає врахування багатьох змінних. Вплив ослаблення, спричиненого випромінюванням, на продуктивність волокна необхідно враховувати та визначати кількісно з урахуванням передбачуваної дози, потужності дози, довжини хвилі й інших умов навколишнього середовища, що існують для волокна.

4. На додаток до впливу ослаблення, спричиненого випромінюванням, волокна, які будуть розгортатися в середовищах із високим випромінюванням, також повинні характеризуватися за іншими критеріями оптичної продуктивності, такими як сумісність сплайсингу та пропускна здатність, а також міцність волокна.

5. Дослідження радіаційно-стійкого волокна має подальші перспективи, ураховуючи розширення шляхів і можливостей його подальшого застосування.

#### Список літератури:

1. The radiation tolerance of specific optical fibres exposed to 650 kGy (Si) of ionizing radiation / B. Arvidsson, K. Dunn, C. Issever, B.T. Huffman, M. Jones, J. Kierstead, G. Kuyt, T. Liu, A. Povey, E. Regnier, A.R. Weidberg, A. Xiangf, J. Yef. *Journal of Instrumentation*. 2009. Vol. 4. P. 07010. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/4/07/P07010/pdf> (дата звернення: 01.06.2021).

2. Trends in Optical Fibre Metrology and Standards / F. Berghmans, O. Deparis, S. Coenen, M. Decréton, P. Jucker ; Ed. by Soares O. D. D. NATO ASI Series. E. : Applied Sciences, 1995. № 285. P. 131–156.
3. Brichard B., Fernandez A.F. Conference RADECS 2005, Short Course Notebook – New challenges for Radiation Tolerance Assessment / Ed. by Fernandez A. F. Cap d'Agde, 2005. P. 95–137.
4. Burkitt-Gray A. SDN fibre/satellite carrier plans to start services in first half of 2021. *Capacity*. 21 July 2020. URL: <https://www.capacitymedia.com/articles/3825997/sdn-fibre-satellite-carrier-plans-to-start-services-in-first-half-of-2021> (дата звернення: 01.06.2021).
5. Fiber Optic Data Bus Radiation Effects Study / A.B. Campbell, E.J. Frieble, P.W. Marshall, G.P. Summers, Y.J. Chen. Naval Research Laboratory : Washington, 1992. 91 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235060324\\_Fiber\\_Optic\\_Data\\_Bus\\_Radiation\\_Effects\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/235060324_Fiber_Optic_Data_Bus_Radiation_Effects_Study) (дата звернення: 01.06.2021).
6. CMS Outreach. URL: <http://cmsinfo.cern.ch/outreach/> (дата звернення: 01.06.2021).
7. Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors / A.F. Fernandez, A.I. Gusarov, B. Brichard, S. Bodart, K. Lammens, F. Berghmans, M.C. Decreton, P. Megret, M. Blondel, A. Delchambre. *Optical Engineering*. 2002. № 41. P. 1246–1254.
8. Fielder R.S., Klemer D., Stinson-Bagby K.L. High neutron fluence survivability testing of advanced fiber Bragg grating sensors. *AIP Conference Proceedings*. 2004. № 699. P. 650–657. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1649627> (дата звернення: 01.06.2021).
9. Overview Of Radiation Effects In Fiber Optics / E.J. Friebele, K.J. Long, C.G. Askina, M.E. Gingerich, M.J. Marrone, D.L. Griacom. *SPIE Proceedings*. 1985. Vol. 0541. URL: <https://doi.org/10.1117/12.975360> (дата звернення: 01.06.2021).
10. Friebele E.J., Wasserman L.R. Development of Radiation-Hard Fiber for IFOGs. *18th International Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, ME2. Washington DC, 2006.
11. Overview Of Radiation Effects In Fiber Optics / E.J. Friebele, K.J. Long, C.G. Askina, M.E. Gingerich, M.J. Marrone, D.L. Griacom. *SPIE Proceedings*. 1985. Vol. 0541. URL: <https://doi.org/10.1117/12.975360> (дата звернення: 01.06.2021).
12. Space radiation sensitivity of glasses: first results toward a comprehensive dose coefficients database / M. Fruit, A.I. Gusarov, D.B. Doyle, G.J. Ulbrich, A. Hermanne. *SPIE Proceedings*. 2000. Vol. 4134.
13. Radiation Effects on Silica-Based Preforms and Optical Fibers-I: Experimental Study With Canonical Samples / S. Girard, Y. Ouerdane, G. Origlio, C. Marcandella, A. Boukenter, N. Richard, J. Baggio, P. Paillet, M. Cannas, J. Bisutti, J.P. Meunier, R. Boscaino. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2008. № 55. P. 3473–3482.
14. Griscom D.L., Gingerich M.E., Friebele E.J. Radiation-induced defects in glasses: Origin of power-law dependence of concentration on dose. *Physical Review Letters*. 1993. № 71. P. 1019–1022. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.1019> (дата звернення: 01.06.2021).
15. Fiber Bragg gratings as a candidate technology for satellite optical communication payloads: radiation-induced spectral effects / A.I. Gusarov, D.B. Doyle, N. Karafolas, F. Berghmans. *SPIE Proceedings*. 2000. Vol. 4134. P. 253–260.
16. Henschel H. Radiation hardness of present optical fibers. *SPIE Proceedings*. 1994. Vol. 2425. P. 21–31. URL: <https://doi.org/10.1117/12.198638> (дата звернення: 01.06.2021).
17. Fibre optic radiation sensor systems for particle accelerators / H. Henschel, M. Körfer, J. Kuhnenn, U. Weinand, F. Wulf. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2004. № 526. P. 537–550 (дата звернення: 01.06.2021).
18. The radiation hardness of specific multi-mode and single-mode optical fibres at -25°C beyond a full SLHC dose to a dose of 500 kGy(Si) / B.T. Huffman, C. Issever, N.C. Ryder, A.R. Weidberg. *Journal of Instrumentation*. 2010. № 5. P. 11023. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/5/11/C11023> (дата звернення: 01.06.2021).
19. Development of a displacement sensor for the CERN-LHC superconducting cryodipoles / D. Inaudi, B. Glisic, S. Fakra, J. Billan, S. Redaelli, J.G. Perez, W. Scandale. *Measurement Science and Technology*. 2001. № 12. P. 887–896.
20. ITER. URL: <http://www.iter.org> (дата звернення: 01.06.2021).
21. Ito Chikara, Naito Hiroyuki, Ishikawa Takashi, Ito Keisuke and oth. Development of Remote Sensing Technique Using Radiation Resistant Optical Fibers under High-Radiation Environment Conference. *Proceedings of the Second International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses*. 2018.
22. Ito Chikara, Naito Hiroyuki, Ohba Hironori, Saeki Morihisa and oth. In-Vessel Inspection Probing Technique Using Optical Fibers Under High Radiation Dose. *22nd International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech Republic*. July, 2014.
23. Proton radiation effects in high power LEDs and IREDs for optical wireless links for intra-satellite communications / J.J. Jimenez, M.T. Alvarez, R. Tamayo, J.M. Oter, J.A. Dominguez, I. Arruego, J. Sanchez-Paramo, H. Guerrero. *IEEE Radiation Effects Data Workshop*. Workshop Record. IEEE, 2006. P. 77–84.

24. Johnston A.H., Rax B.G. Proton damage in linear and digital optocouplers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2000. № 47 (3). P. 675–681.
25. Juergens J., Adamovsky G. Performance Evaluation of Fiber Bragg Gratings at Elevated Temperatures. *SPIE Proceedings*. 2004. Vol. 5272.
26. Application of a Raman distributed temperature sensor to the experimental fast reactor joyo with correction techniques / A. Kimura, E. Takada, K. Fujita, M. Nakazawa, H. Takahashi, S. Ichige. *Measurement Science and Technology*. 2001. № 12. P. 966–973.
27. Kuhnhenh J., Metzger S., Henschel H. Radiation testing of optical fibres and systems at Fraunhofer Institute. *ESA-NASA working meeting on Optoelectronics*. 2005. № 10.
28. Lauenstein J.-M., Barth J.L. Radiation Belt Modeling for Spacecraft Design: Model Comparisons for Common Orbits. GSFC.NASA.GOV. URL: [https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec05\\_w16.pdf](https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec05_w16.pdf) (дата звернення: 02.06.2021).
29. Gamma ray radiation induced visible light absorption in P-doped silica fibers at low dose level / P. Lu, X. Bao, N. Kulkarni, K. Brown. *Radiation Measurements*. 1999. № 30. P. 725–733. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350448799002334> (дата звернення: 02.06.2021).
30. Підвищення ефективності оптоволоконних каналів зв'язку / I. Nevlyudov, V. Malik, O. Tokareva, V. Nevlyudova. *Системи управління, навігації та зв'язку* : збірник наукових праць. Полтава : ПНТУ, 2020. Т. 1 (59). С. 151–154. URL: [doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151](https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151) (дата звернення: 02.06.2021).

### Blazhennyi N.V. INFLUENCE OF SOLAR RADIATION (COSMIC RADIATION) ON OPTICAL COMMUNICATION LINE: SOURCES' REVIEW

*The active growth of networks with the simultaneous increase in the length of sections, as well as the expansion of the spectrum of fiber optic applications, has led to the need to study a number of factors affecting the quality of optical components under various conditions of their operation. It's known that any electronic or photonic component can be affected by nuclear radiation. In the case of the slightest failure of a system based on the operation of photonic components, it will significantly affect the quality of work and the cost of the entire equipment. Repairing optical components or systems in a radiation environment is simply unthinkable through ultra-high levels of radiation. It's also almost impossible to repair onboard equipment after a satellite is put into orbit or a rocket and space complex is launched. This is why it's important to ensure that all components and systems are in good working condition before their mission begins – to identify problems and avoid them. To ensure this, the way ionized radiation affects the performance and reliability of a number of optical components should be thoroughly investigated, and number of scientists are working on today on this. The purpose of this article is to study the information and background support of the problem of the influence of solar radiation (cosmic radiation) on optical fiber; the creation of an information base of articles and materials, which can be relied on in further research in the issue of changes in the parameters of components of fiber-optic communication lines under conditions of radiation irradiation. The article comprehensively studies the information and background support of the scientific problem of the influence of solar radiation (cosmic radiation) on optical fiber. Based on review of materials of Ukrainian and foreign authors, the information base of articles and materials is created, which can be relied on in the course of further research in the issue of changing the parameters of components of fiber-optic communication lines under conditions of radiation irradiation.*

**Key words:** optical fiber, fiber-optic communication line, radiation exposure, radiation-resistant optical fiber, ionizing radiation, substitution effect, ionization effects, noise, extinction.