




XҒТАР 47.35.41

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2026-154-1-154-169>

Ғылыми мақала

Ғарыштық құрылымдарды мониторингтеуде FBG сенсорларын қолдану

С.Ж.Көшкінбаев^{1,2} , А.К.Сейтханова³ , Н.К.Смайлов*¹ , Қ.М.Ысырайыл¹ ,
А.Е.Куттыбаева¹ 

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан,

²Мирас университеті, Шымкент, Қазақстан, ³Ә.Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан

(E-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, ainur1179@mail.ru, [n.smailov@satbayev.university, kidir200091@gmail.com](mailto:n.smailov@satbayev.university.kidir200091@gmail.com), a.kuttybayeva@satbayev.university)

Аңдатпа. Бұл мақала Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорларының ғарыштық ортаға тән қатал жағдайларда қолданылу мүмкіндігін кешенді түрде бағалауға арналған. Зерттеу барысында сенсорлардың вакуум жағдайында, термоциклдер әсерінде, механикалық жүктемелер кезінде және 800–1000 °С аралығындағы экстремалды температураларда жұмыс істеу қабілеті талданады. Regenerated FBG технологиясының жоғары температурада ұзақ мерзімді тұрақтылықты қамтамасыз ететіні және Bragg толқын ұзындығының спектралдық дрейфсіз сақталатыны көрсетіледі. Сонымен қатар Bragg толқын ұзындығының деформацияға сызықтық тәуелділігі сенсорлардың өлшеу дәлдігін негіздейді. Кірістірілген FBG сенсор желілерінің бір талшық бойында бірнеше параметрді бір мезгілде бақылау мүмкіндігі олардың құрылымдық денсаулықты мониторингтеу жүйелерінде (SHM) тиімді қолданылатынын дәлелдейді. Әдебиеттерді талдау нәтижесінде FBG сенсорларының ғарыштық ортада кешенді бағалануы жеткіліксіз екені және сенсор–құрылым–өлшеу жүйесі арасындағы байланыс жүйелік деңгейде жеткілікті қарастырылмағаны анықталды. Осы олқылықты толықтыру мақсатында вакуум, термоцикл және ультракүлгін әсерлері ескерілетін кешенді эксперименттік әдістеме ұсынылады. Төмен Жер орбитасы (LEO) ортасын модельдеу арқылы сенсорлардың ұзақ мерзімді тұрақтылығы мен сенімділігі талданады. Алынған нәтижелер FBG сенсорларын ғарыш аппараттарының құрылымдық күйін бақылауға арналған сенімді өлшеу платформасы ретінде қолдануға болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорлары, ғарыштық орта, қатал жағдайлар, құрылымдық денсаулықты бақылау (SHM), ұзақмерзімді тұрақтылық, спектралдық дрейф, термовакуумдық сынақтар.

Жіберілді 16.01.2026. Өзгертілді 11.02.2026. Қабылданды 25.02.2026. Онлайн қол жетімді 30.03.2026.

*хат-хабар авторы

Кіріспе

Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорлары жоғары сезімталдығы, электромагниттік кедергілерге төзімділігі және бір талшықта көп нүктелі өлшеу жүргізу мүмкіндігі арқасында құрылымдық денсаулықты бақылау жүйелерінде кеңінен қолданылып келеді [1,2]. Бұл технология инженерлік құрылымдардың нақты күйін үздіксіз бақылауға мүмкіндік беретін тиімді құрал ретінде қалыптасты.

FBG сенсорларының жұмыс принципі Bragg толқын ұзындығының температура мен деформацияның әсерінен ығысуына негізделген және физикалық параметрлерді дәл анықтауға жағдай жасайды [3]. Осы қасиет оларды түрлі ортада қолдануға бейім әмбебап сенсорлық элементке айналдырады. Соңғы зерттеулерде FBG негізіндегі сенсорлар температура мен ылғалдылықты жоғары дәлдікпен өлшеу үшін жетілдірілген жабындармен біріктіріліп, сезімталдығының едәуір артқаны көрсетілді. Бұл жұмыстар FBG құрылымын модификациялау арқылы жаңа функционалдық мүмкіндіктерге қол жеткізуге болатынын дәлелдейді [3,4].

Инфрақұрылымдық объектілерде FBG сенсорлары көпқабатты ғимараттар мен азаматтық құрылымдарды ұзақ мерзімді мониторингтеуде табысты қолданылып, деформация мен температура өзгерістерін сенімді тіркей алатыны көрсетілген. Мұндай нәтижелер FBG жүйелерінің практикалық іске асырылуын негіздейді [1,5].

Аэроғарыш саласында FBG сенсорлары композиттік авиациялық құрылымдарда деформацияны бақылау үшін тиімді екені дәлелденген [2], ал көміртекті-оптикалық платформаларда температура мен термоэластикалық әсерлерді өлшеуге қолданылған кірістірілген шешімдер олардың ғарыштық құрылымдар үшін жарамдылығын көрсетеді [6]. Сонымен қатар, жерсеріктік күн панельдерінде FBG сенсорларын оңтайлы орналастыру арқылы өлшеу дәлдігін арттыруға және құрылымның шаршауға төзімділік мерзімін ұзартуға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Бұл зерттеулер FBG технологиясының ғарыш аппараттарындағы практикалық әлеуетін айқындайды [7].

Ғарыштық ортаға жақын жағдайларда жүргізілген тәжірибелерде көппараметрлі FBG сенсорлары вакуум мен термоциклдер әсерінде күн батареяларының адгезив қабаттардың күйін бақылауға жарамды екені дәлелденген. Алайда бұл жұмыстар көбіне нақты бір қолдану жағдайымен шектеледі [8]. Осыған қарамастан, қолданыстағы әдебиеттерде FBG сенсорларының температураға [3], механикалық деформацияға [2] немесе инфрақұрылымдық ортаға [1] реакциясы жеке зерттелгенімен, олардың ғарышқа тән нақты қатал ортада кешенді түрде бағалануының жетіспеуі және сенсорды «сенсор–құрылым–өлшеу» тізбегі аясында жүйелік деңгейде қарастырылмауы айқын байқалады. Бұл жағдай FBG технологиясының ғарыштық SHM жүйелеріндегі шынайы сенімділігін толық бағалауға мүмкіндік бермейді [6,8]. Сондықтан бұл мақала FBG сенсорларының жоғары температура, вакуум, термоциклдер және көппараметрлі мониторинг жағдайларындағы жұмыс қабілетін біртұтас жүйе ретінде қарастырып, әдебиетте қалыптасқан кешенді және жүйелік деңгейдегі бағалаудың жоқтығы мәселесін қамтамасыз етуге бағытталған [2,7]. Жұмыстың негізгі мақсаты — FBG сенсорларын ғарыштық SHM жүйелері үшін сенімді өлшеу платформасы ретінде ғылыми тұрғыдан негіздеу [6,8].

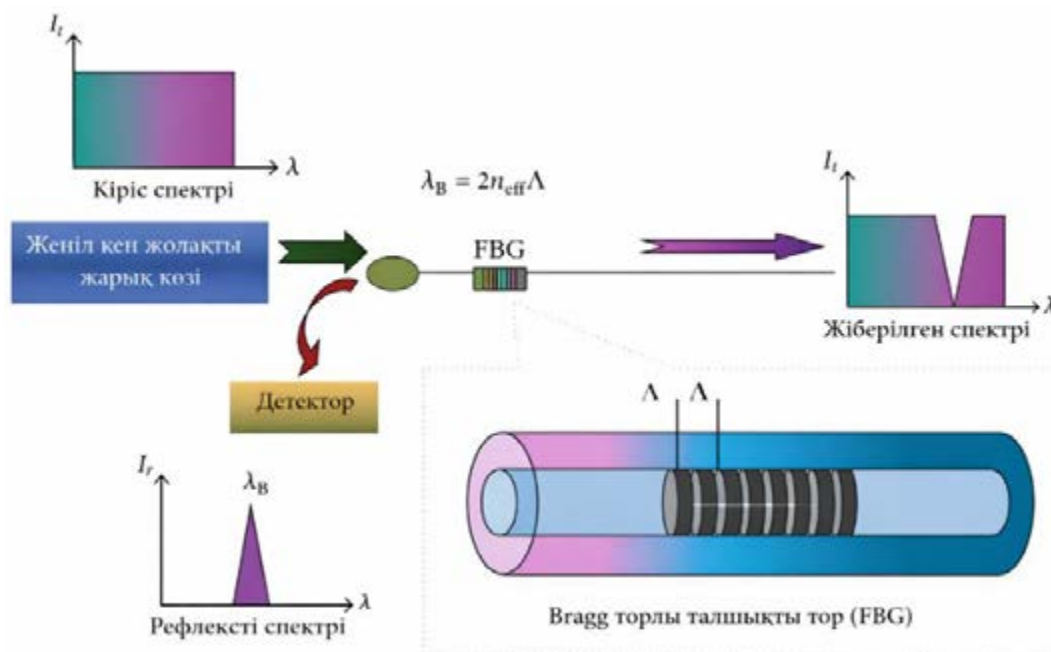
Әдіснама

FBG сенсорлары өлшеуді талшық ішіндегі Брэгг торының арқылы жүзеге асырады. Талшық өзегіндегі сыну көрсеткішінің периодты өзгерістері белгілі бір Брэгг толқын ұзындығына сәйкес келеді, ол кең жолақты жарық көзінен шағылып кері қайтады, ал қалған толқын ұзындықтары тор арқылы өтіп кетеді. Осы шағылған спектр өлшеніп, температура мен деформация сияқты факторлардың тор ұзындығына әсерінен туындайтын физикалық өзгерістерге байланысты толқын ұзындығының ығысуы арқылы физикалық параметрлер есептеледі. $\lambda_B = 1550$ нм болған жағдайда салыстырмалы деформацияның 1%-ға өзгеруі $\Delta\lambda_B = 12$ нм толқын ұзындығының ығысуына сәйкес келеді. Брэгг толқын ұзындығы тиімді сыну көрсеткішінің есептеу 1-формулада көрсетілген [9,10]:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

Түскен жарықтың ішінен тек белгілі бір толқын ұзындығындағы сәуле ғана FBG арқылы шағылып, кері қайтарылады. 1-суретте FBG сенсорлық жүйесінің құрылымы мен өлшеу принципі көрсетілген. Яғни қалай толық жүзеге асатынын көруге болады. Брэгг торының орталық толқын ұзындығы сыртқы температураға, деформацияға және басқа да әсерлерге жақсы жауап береді және 1- формула бойынша сипатталады [11].

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{n} \xi + \alpha_f \right] \Delta T + (1 - P_c) \Delta \epsilon \quad (2)$$



Сурет 1. FBG сенсорының жұмыс принципі

Зерттелген материалдар:

FBG сенсорлары әртүрлі құрылымдарға кірістірілген күйде қарастырылды: көміртекті композиттер [9,10] және көпқабатты жылу оқшаулағыш жабындар (MLI) [12,13], ракеталық қозғалтқыш корпустары [10,14], сондай-ақ сенсордың өз технологиялық түрлері – regenerated FBG [16]. Сенсорлар әдетте телекоммуникациялық диапазонда, $\lambda_B \approx 1550$ нм маңында жұмыс істейтіні көрсетілген [10,12].

Эксперименттік орта және жүктемелер: LEO ортасын модельдеу мақсатында вакуум, ультракүлгін сәуле және термоциклдер қолданылған. Кірістірілген FBG сенсорлары CFRP үлгілерінде осы әсерлерден кейін де спектралдық жауаптың сақталуын дәлелдеген [9].

Термо-вакуумдық камерада қысымды 1×10^{-81} мбарға дейін төмендетіп, температураны -190 °C пен $+160$ °C аралығында өзгерту арқылы жүргізілген сынақтар ғарышқа тән жылуөткізгіштіктің болмауын және сәулелік жылуалмасудың басым болуын модельдеуге мүмкіндік береді. Мұндай жағдайда FBG сенсорының шағылысқан Bragg толқын ұзындығының өзгерісі тек сыртқы ортаның экстремалды температуралық әсеріне ғана емес, сонымен қатар құрылымда туындайтын механикалық деформацияға да тәуелді болады. Сондықтан 3-формуладағы $\Delta\lambda_B$ өлшемі екі құрамдастан температуралық және деформациялық үлестен тұратынын көрсету сенсор сигналын ғарыштық ортада дұрыс интерпретациялау үшін шешуші мәнге ие [13].

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T \quad (3)$$



Сурет 2. Картон тірегіндегі FBG сенсорын орналастыру және вакуум жағдайындағы эксперименттік қондырғы

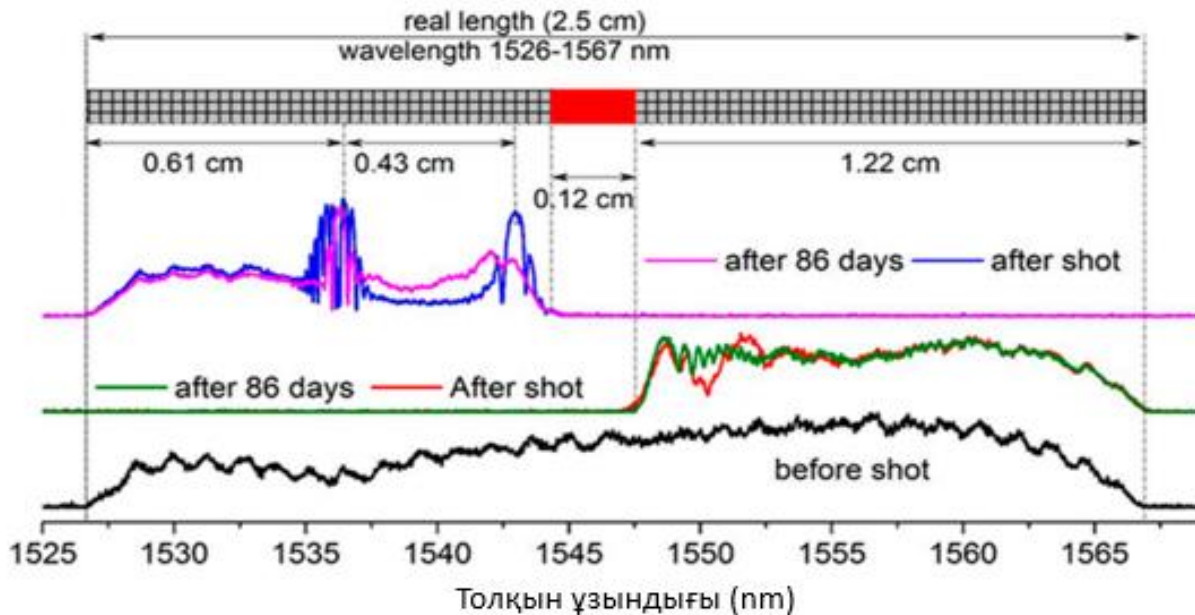
Ракета қозғалтқышының сақина тәрізді композит қаптамасында жүргізілген зерттеулерде үлгінің орташа көлденең қимасы $20.0 \pm 0.1 \text{ мм}^2$, ішкі диаметрі $150 \pm 0.2 \text{ мм}$ болған, ал жүктеме 30 кН-ға дейін арттырылған. Деформация шамамен 1% деңгейіне жеткенде сенсорлардың істен шығуы байқалған [10]. Ұқсас зерттеуде қатты отынды ракеталық моторларында FBG желілері 10–40 кН аралығындағы жүктемелерде сынақтан өткізілгені анықталған [12].

Өлшеу жүйесі және дәлдік: FBG сенсорларынан шағылған толқын ұзындығының өзгерісі жоғары жылдамдықта тіркелген. Мысалы, композит қаптамадағы өлшеулерде дискреттеу жиілігі 500 кГц құраған. FBG нәтижелері дәстүрлі тензодатчиктермен салыстырылып, жоғары жүктемелерде айырмашылық $\leq 2 \%$, ал төмен жүктемелерде $\approx 0.01 \%$ деңгейінде болған [10], бұл FBG өлшеулерінің жоғары дәлдігін көрсетеді. Авиациялық қолдануларға арналған шолуда деформацияны өлшеу дәлдігі $\pm 1-5 \text{ мк}$ деңгейінде екені және мультиплекстеу арқылы бір талшық бойында ондаған сенсорды орналастыру мүмкіндігі көрсетілген [15].

Ұзақ мерзімді тұрақтылық пен сенімділік: Regenerated FBG сенсорлары жоғары температурада ұзақ уақыт тұрақты жұмыс істейтіні көрсетілген: эксперименттерде олар 800–1000 °С диапазонында бірнеше сағаттан тәуліктерге дейін спектралдық дрейфсіз сақталған. Бұл көрсеткіштер стандартты FBG-мен салыстырғанда айтарлықтай жоғары термотұрақтылықты білдіреді [16]. Сенсорлардың сенімділігін арттыру бойынша ұсынылған әдістерде діріл, термоцикл және радиация әсерлеріне төзімділікті арттыру үшін арнайы қаптама мен талшық құрылымын қолдану нақты қарастырылған [17].

Сенсор-құрылым интерфейсі: FBG температуралық сенсорларын әртүрлі адгезивтермен бекіту кезінде сезімталдық пен дрейфтің өзгеретіні анықталған. Термовакуум сынақтарында сезімталдықтың өзгерісі бірнеше пм/°С деңгейінде болып, адгезив түріне тәуелді айырмашылықтар тіркелген. Бұл ғарыштық құрылымдарға енгізу кезінде бекіту технологиясын әдістемелік фактор ретінде қарастыруды талап етеді [18].

Жүйелік қолдану және деректерді біріктіру: Ғарыш аппараттарындағы талшықты сенсорлар ұшу миссияларында температура мен деформацияны бақылауда қолданылып, $-150...+120 \text{ °С}$ диапазонда сенімді жұмыс істегені көрсетілген. Эксперименттік зерттеулерде диаметрі 2 мм алюминий пеллеттің 2 км/с жылдамдықпен соқтығысуы нәтижесінде талшықтың шамамен 1.2 мм бөлігі үзіліп, спектрдегі жетіспейтін аймақ арқылы зақымның нақты анықталғаны көрсетілген. Сонымен қатар, соққы әсерінің орталықтан шамамен 2 см радиус шегінде локалданатыны және 86 күннен кейін спектрдің жартылай қалпына келуі 3-суреттегідей байқалған. Бұл нәтижелер FBG сенсорларының микрометеороидтар мен орбиталық қоқыстың әсерінен туындайтын зақымдарды ғарыш аппараттарында *in situ* режимінде анықтауға жарамды екенін көрсетеді [19,20].



Сурет 3. FBG спектрлері соққыға дейін және соққыдан кейін анығырақ көрсету үшін каскад түрінде берілген

Жер асты тоннельдеріндегі *in situ* мониторингте FBG желілері көпжылдық бақылауда тұрақты жұмыс істеп, деформация өзгерістерін микродеңгейде тіркей алған, бұл ұзақ мерзімді сенімділікті дәлелдейді. Осылайша, қолданылған материалдар мен әдістер FBG сенсорларын жүктеме 30–40 кН, температура $-190...+160$ °С, қысым 10^{-8} мбар және жоғары температура 800–1000 °С сияқты кең ауқымды шарттарда сынақтан өткізуге негізделіп, олардың ғарыштық орта үшін жарамдылығын сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді [11].

Біздің жұмыста осы мәліметтер арқылы FBG сенсорларының ғарышқа тән нақты қатал ортада кешенді бағалануының жетіспеуін жою мақсатында тиімділігін қысқаша көрсететін бірнеше әдісті ұсынамыз:

1) LEO ортасын имитациялау арқылы эксперименттік бағалау әдісі

FBG сенсорларын вакуум, термоцикл, ультракүлгін сәуле және атомдық оттегі әсерінде сынап, Bragg толқын ұзындығының тұрақтылығын талдау. Мақсаты – орбиталық ортада өлшеу сенімділігін тікелей тексеру [9,13].

2) Кірістірілген FBG желілері негізіндегі SHM тиімділігін бағалау әдісі

Композитті ракета құрылымдары мен қатты отын моторларында деформация [10], температураны және зақымдарды үздіксіз бақылау қабілетін эксперименттік деректермен салыстыру. Мақсаты – FBG-нің ғарыштық SHM жүйелеріндегі практикалық артықшылығын көрсету [12,14].

3) Ұзақмерзімді тұрақтылық пен сенімділікті бағалау әдісі

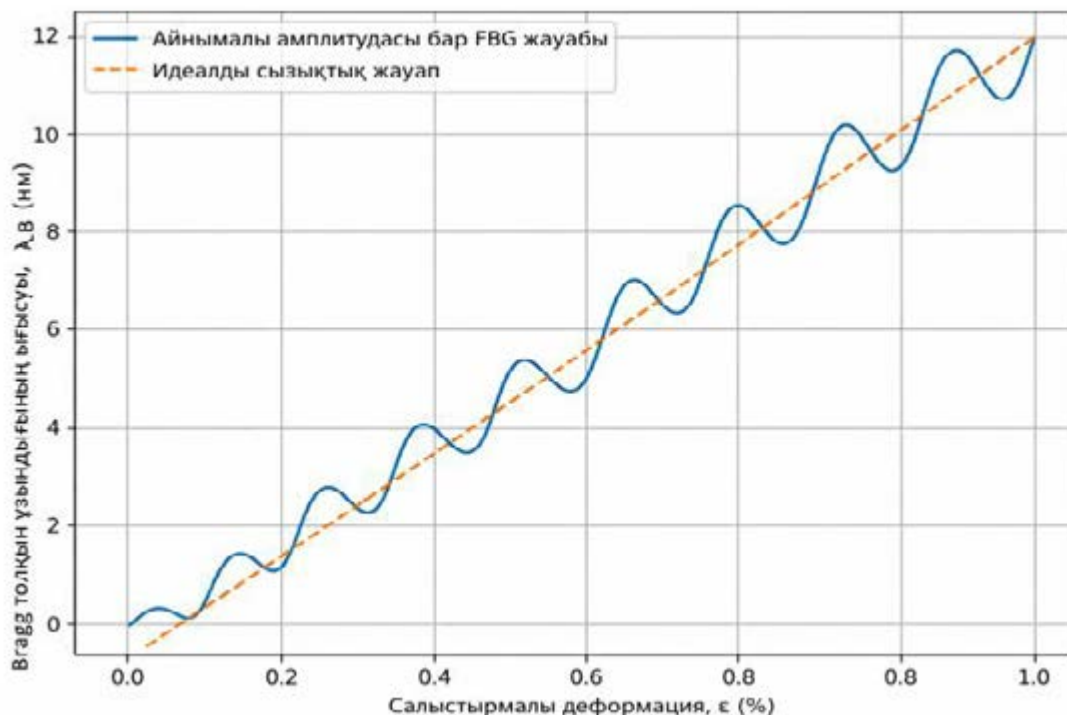
Regenerated FBG технологиясын және сенсор конструкциясын қолдана отырып,

уақыт және жоғары температура әсеріндегі спектралдық дрейфті талдау. Мақсаты – көпжылдық миссиялар үшін өлшеу тұрақтылығын негіздеу [16,17].

Нәтижелер мен талқылау

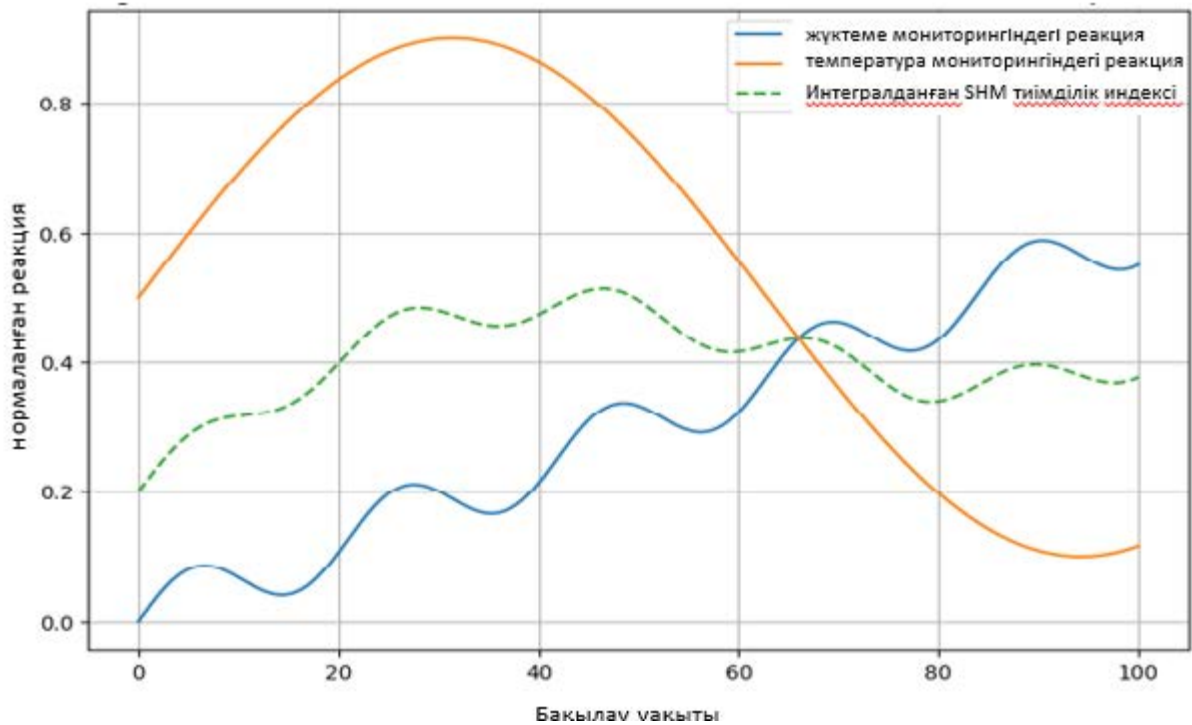
Бұл бөлімде regenerated Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорларының жоғары температуралы ортадағы ұзақ мерзімді тұрақтылығы мен сенімділігін сипаттайтын эксперименттік нәтижелер ұсынылады. 800–1000 °C диапазонында уақыт бойынша Bragg толқын ұзындығының дрейфін талдау арқылы сенсорлардың бастапқы термиялық тұрақтану кезеңінен кейін спектралдық жауабының тиімді тұрақтылық аймағына ауысатыны және өлшеулердің дрейфсіз режимде сақталатыны көрсетіледі. Алынған нәтижелер regenerated FBG технологиясының экстремалды температура әсерінде де өлшеу дәлдігін қамтамасыз ете алатынын және оны көп жылдық ғарыштық миссиялар мен қатал ортадағы SHM жүйелерінде қолданудың практикалық негізділігін айқындайды.

4-суретте берілген график FBG сенсоры үшін Bragg толқын ұзындығының салыстырмалы деформацияға тәуелділігін көрсетеді. Негізгі тренд ретінде $\Delta\lambda_B = 12 \cdot \epsilon$ сызықтық қатынасы алынған, бұл деформацияның спектралдық жауапқа тікелей пропорционал екенін және сенсордың жоғары сезімталдығын көрсетеді.



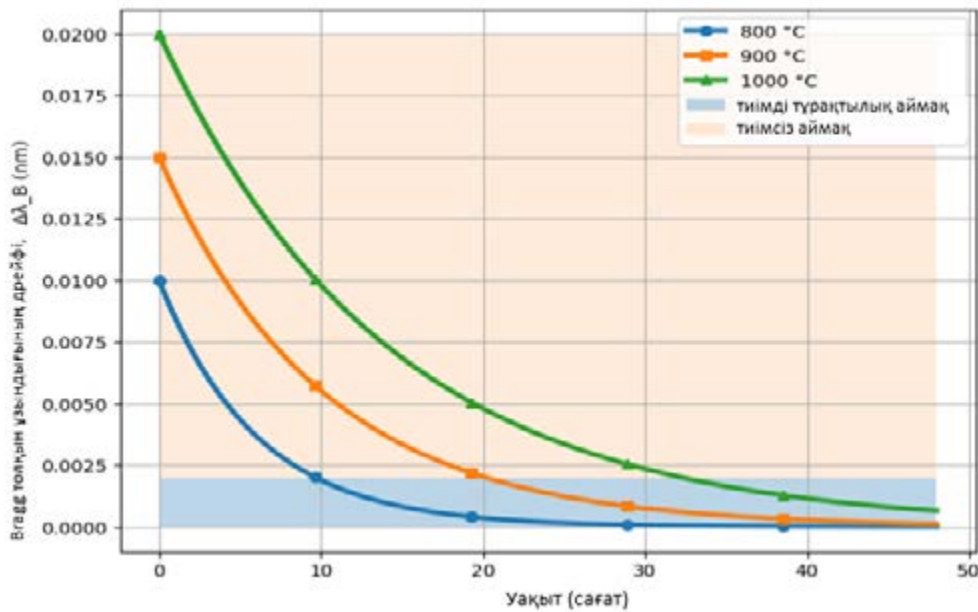
Сурет 4. Амплитудасы өзгертін толқындық ауытқуы бар FBG сенсоры үшін Bragg толқын ұзындығының салыстырмалы деформацияға тәуелділігі

Композитті ракета құрылымдары мен қатты отын моторларына кірістірілген FBG сенсор желісінің SHM жүйесіндегі көп параметрлі мониторинг қабілеті уақыт бойынша 5-суретте көрсетілген. Көлденең ось үздіксіз бақылау уақытын, ал тік ось өлшенетін параметрлердің нормаланған жауабын көрсетеді.



Сурет 5. BG сенсор желісінің SHM жүйесіндегі көппараметрлі мониторинг қабілеті

Берілген 6-суретте regenerated FBG сенсорларының 800, 900 және 1000°C жоғары температураларда уақыт бойынша Bragg толқын ұзындығының спектралдық дрейфін көрсетеді. Уақыттың бастапқы кезеңінде барлық температура режимдерінде $\Delta\lambda_B$ мәнінің салыстырмалы түрде жоғары болуы сенсордың термиялық қайта құрылымдану процесіне байланысты өтпелі күйін сипаттайды. Температура артқан сайын бастапқы дрейф деңгейі өсіп, тұрақтану уақытының ұзаруы байқалады: 800°C-та сенсор тезірек тұрақтанса, 1000°C-та бұл процесс баяуырақ жүреді. Дегенмен, уақыт өте келе барлық қисықтар төменгі тиімді тұрақтылық аймағына еніп, $\Delta\lambda_B$ шамасының нөлге жақындауын көрсетеді.



Сурет 6. Уақыт бойынша Bragg толқын ұзындығының спектралдық дрейфі

Берілген нәтижелер regenerated Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорларының 800–1000°C аралығындағы жоғары температуралы ортада Bragg толқын ұзындығының уақыт бойынша дрейфін, деформацияға сызықтық сезімталдығын ($\Delta\lambda_B = 12 \cdot \varepsilon$) және композитті құрылымдарға кірістірілген желі түрінде көп параметрлі мониторинг жүргізу қабілетін біртұтас түрде сипаттайды. Эксперименттер сенсордың бастапқы термиялық қайта құрылымдану кезеңінен кейін спектралдық жауабының тиімді тұрақтылық аймағына ауысатынын және ұзақ уақыт бойы дрейфсіз режимде сақталатынын көрсетіп, regenerated FBG технологиясының экстремалды жағдайларда да өлшеу дәлдігі мен сенімділігін қамтамасыз ете алатынын дәлелдейді. Бұл деректер сенсордың материалдық және спектралдық деңгейдегі тұрақтылығын сандық тұрғыда негіздеп, көпжылдық миссиялар үшін қолданудың практикалық мүмкіндігін айқындайды.

Қорытынды

Бұл мақалада Fiber Bragg Grating (FBG) сенсорларының ғарышқа тән қатал орта жағдайларында қолданылу мүмкіндігі кешенді түрде қарастырылып, олардың жоғары температура, вакуум, термоциклдер, механикалық жүктемелер және радиациялық факторлар әсерінде өлшеу тұрақтылығы мен дәлдігін сақтай алатыны жүйелік деңгейде негізделеді. Regenerated FBG технологиясының спектралдық дрейфсіз режимге өтуі және кірістірілген сенсор желілерінің көп параметрлі мониторинг қабілеті FBG-нің көп жылдық миссиялар үшін жарамдылығын дәлелдейді. Ең бастысы, бұл мақалада әдебиетте жеткіліксіз қамтылған олқылық – FBG сенсорларын ғарыштық ортада тек жекелеген әсерлер тұрғысынан емес, толық сенсор-құрылым-өлшеу тізбегі аясында жүйелік түрде бағалаудың болмауы – толтырылып, FBG технологиясы ғарыштық SHM жүйелері

үшін сенімді әрі кешенді өлшеу платформасы ретінде ұсынылған. Осылайша, алынған қорытындылар болашақ ғарыштық құрылымдарды мониторингтеу жүйелерін жобалау мен оңтайландыруда FBG технологиясының стратегиялық маңызын айқындайды.

Болашақ зерттеулер бұл мақалада ұсынылған кешенді және жүйелік бағалау тәсілін одан әрі дамытуға бағытталып, FBG сенсорларының ғарышқа тән көпфакторлы әсерлер (радиация–термоцикл–механикалық жүктеме) бір мезгілде әрекет ететін ұзақ мерзімді сынақтардағы мінез-құлқын зерттеуді, сенсор–интеррогация–деректерді өңдеу тізбегінің бірлескен тұрақтылығын талдауды және нақты орбиталық ұшу эксперименттері арқылы валидациялауды қамтуы тиіс.

Қаржыландыру

Мақала AP26197431 «Талшықты Брэгг торларын пайдалана отырып, ғарыштық инфрақұрылымдағы деформацияларды жоғары дәлдікпен бақылауға арналған құрылымдар мен технологияларды әзірлеу» жобасы бойынша орындалды.

Авторлардың қосқан үлесі

Көшкінбаев С.Ж. – зерттеудің ғылыми тұжырымдамасын қалыптастыруға, жұмыстың жалпы әдіснамасын әзірлеуге және зерттеу бағытын анықтауға елеулі үлес қосты, сондай-ақ мақаланың мазмұнын сыни тұрғыдан қайта қарап, ғылыми редакциялауға қатысты.

Сейтханова А.К. – ғылыми әдебиеттерге талдау жүргізуге, зерттеу нәтижелерін жүйелеуге және мақаланың кіріспе мен теориялық бөлімдерін дайындауға қатысып, мәтінді ғылыми тұрғыдан редакциялауға үлес қосты.

Смайлов Н.К. – зерттеу әдістемесін әзірлеуге, алынған нәтижелерді талдауға және интерпретациялауға жетекшілік етті, мақаланың негізгі ғылыми мазмұнын қалыптастыруға қатысып, жариялауға арналған соңғы нұсқасын бекітті.

Ысырайыл Қ.М. – эксперименттік және аналитикалық зерттеу материалдарын жинауға, нәтижелерді өңдеуге, графиктер мен иллюстрациялық материалдарды дайындауға және мақаланың негізгі мәтінін жазуға қатысты.

Куттыбаева А.Е. – зерттеу нәтижелерін ғылыми тұрғыдан талдауға, мақаланың құрылымын жетілдіруге және мәтінді ғылыми редакциялауға үлес қосты.

Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасын оқып, жариялауға келісім берді және жұмыстың барлық аспектілерінің дұрыстығы мен ғылыми тұтастығы үшін жауапкершілікті өз мойнына алады.

Әдебиеттер тізімі

1. O. G. Morozov, Fiber Bragg grating-based sensors and systems, Sensors 21, 8225 (2021).<https://doi.org/10.3390/s21248225>
2. R. Di Sante, Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications, Sensors 15(8), 18666-18713 (2015). <https://doi.org/10.3390/s150818666>.

3. S. Ju, P. R. Watekar, and W.-T. Han, Highly sensitive temperature sensor using fiber Bragg grating on Pb/Ge-codoped fiber, in Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2009). <https://doi.org/10.1364/NFOEC.2009.JWA10>.
4. B. Liu, Z. Gao, R. Yao, L. Ding, and X. Xia, Development of a high-sensitivity humidity sensor using fiber Bragg grating coated with LiCl@UIO-66-doped hydrogel, *Materials* 18, 5587 (2025), <https://doi.org/10.3390/ma18245587>.
5. A. Sivasuriyan, D. S. Vijayan, W. Górski, Ł. Wodzyński, M. D. Vaverková, and E. Koda, Practical implementation of structural health monitoring in multi-story buildings, *Buildings* 11, 263 (2021), <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>.
6. A. Fernández-Medina and M. Frövel et al., Embedded fiber Bragg grating sensors for monitoring temperature and thermo-elastic deformations in a carbon fiber optical bench, *Sensors* 23, 6499 (2023), <https://doi.org/10.3390/s23146499>.
7. M. Kumari and S. K. Mishra, Transmission of LG modes in high-capacity 16 × 10 Gbps FSO system using FBG sensors under different channel scenarios, *Micromachines* 16, 738 (2025). <https://doi.org/10.3390/mi16070738>
8. L. Fazzi, N. Dias, M. Holynska, A. Tighe, R. Rampini, and R. M. Groves, Monitoring of silicone adhesive in space solar cells with an embedded multi-parameter TFBG sensor in a simulated space environment, *Meas. Sci. Technol.* 33, 085108 (2022), <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac6d45>.
9. Y. Deng, W. Ren, and X. Wang, Scientometric analysis and research trends in optical fiber grating sensors: A review, *Photonics* 12, 349 (2025). <https://doi.org/10.3390/photonics12040349>
10. A. Kalizhanova, A. Kozbakova, M. Kunelbayev, T. Kartbayev, and G. Kashaganova, Research on the relative displacement distribution of a composite plate with built-in FBG sensors, *J. Compos. Sci.* 9, 198 (2025). <https://doi.org/10.3390/jcs9050198>
11. Y. Park, H. Kwon, P. Shrestha, and C. Kim, Investigation of LEO environment exposure monitoring potential using embedded FBG sensors, *Proc. SPIE* 10323, 103239E (2017). <https://doi.org/10.1117/12.2267564>
12. J. Wang and J. Tang, Feasibility of fiber Bragg grating and long-period fiber grating sensors under different environmental conditions, *Sensors* 10, 10105–10127 (2010). <https://doi.org/10.3390/s101110105>
13. A. Aimasso, C. G. Ferro, M. Bertone, M. D. L. Dalla Vedova, and P. Maggiore, Fiber Bragg grating sensor networks enhance the in situ real-time monitoring capabilities of MLI thermal blankets for space applications, *Micromachines* 14, 926 (2023), <https://doi.org/10.3390/mi14050926>.
14. G. Korompili, G. Mußbach, and C. Riziotis, Structural health monitoring of solid rocket motors: From destructive testing to perspectives of photonic-based sensing, *Instruments* 8, 16 (2024), <https://doi.org/10.3390/instruments8010016>.
15. D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S. Magazinov, V. Malyugin, S. Varzhel, E. Loseva, S. Koshkinbayev, and N. K. Smailov, Application of fiber Bragg gratings as a sensor of pulsed mechanical action, *Sensors* 22, 7289 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22197289>
16. M. Celikin, D. Barba, B. Bastola, A. Ruediger, and F. Rosei, Development of regenerated fiber Bragg grating sensors with long-term stability, *Opt. Express*, <https://doi.org/10.1364/OE.24.021897>.

17. M. Tomsia et al., Long-term space missions' effects on the human organism: What we do know and what requires further research, *Front. Physiol.* (2024). <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1284644>
18. S. J. Mihailov, Fiber Bragg grating sensors for harsh environments, *Sensors* 12, 1898–1918 (2012). <https://doi.org/10.3390/s120201898>
19. I. McKenzie, S. Ibrahim, E. Haddad, S. Abad, A. Hurni, and L. K. Cheng, Fiber optic sensing in spacecraft engineering: An historical perspective from the European Space Agency, *Front. Phys.* 9, 719441 (2021), <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.719441>.
20. W. Liu, M. Wu, G. Wan, and M. Xu, Digital twin of space environment: Development, challenges, applications, and future outlook, *Remote Sens.* 16, 3023 (2024), <https://doi.org/10.3390/rs16163023>.

С.Ж.Көшкінбаев^{1,2}, А.К.Сейтханова³, Н.К.Смайлов*¹, Қ.М.Ысырайыл¹, А.Е.Куттыбаева¹

¹Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
Алматы, Казахстан

²Университет Мирас, Шымкент, Казахстан

³Павлодарский педагогический университет имени Әлкей Марғұлан, Павлодар, Казахстан
(E-mail: koshkinbaev_s@miras.edu.kz, ainur1179@mail.ru, n.smailov@satbayev.university,
kidir200091@gmail.com, a.kuttybayeva@satbayev.university)

Применение FBG-сенсоров в мониторинге космических конструкций

Аннотация. Данная статья посвящена комплексной оценке возможности применения сенсоров Fiber Bragg Grating (FBG) в жестких условиях, характерных для космической среды. В ходе исследования анализируется работоспособность сенсоров в условиях вакуума, при воздействии термоциклов, механических нагрузок, а также при экстремальных температурах в диапазоне 800–1000 °С. Показано, что технология Regenerated FBG обеспечивает долговременную стабильность при высоких температурах и сохранение длины волны Брэгга без спектрального дрейфа. Кроме того, линейная зависимость длины волны Брэгга от деформации обосновывает высокую точность измерений сенсоров. Возможность одновременного контроля нескольких параметров встроенными сетями FBG в одном оптическом волокне подтверждает эффективность их применения в системах структурного мониторинга состояния (SHM). Анализ научной литературы показал, что комплексная оценка FBG-сенсоров в условиях космической среды исследована недостаточно, а также отсутствует системный подход к анализу взаимодействия в цепочке «сенсор – конструкция – измерительная система». Для устранения данного пробела предложена комплексная экспериментальная методика, учитывающая воздействие вакуума, термоциклов и ультрафиолетового излучения. Моделирование условий низкой околоземной орбиты (LEO) позволило проанализировать долговременную стабильность и надежность сенсоров. Полученные результаты показывают, что FBG-сенсоры могут быть использованы в качестве надежной измерительной платформы для мониторинга структурного состояния космических аппаратов.

Ключевые слова: сенсоры Fiber Bragg Grating (FBG), космическая среда, жесткие условия, структурный мониторинг состояния (SHM), долговременная стабильность, спектральный дрейф, термовакуумные испытания.

**S.Zh. Koshkinbayev^{1,2}, A.K. Seytkhanova³, N.K. Smailov*¹,
K.M. Yssyraiyl¹, A.E. Kuttybayeva¹**

¹*Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan,*

²*Miras University, Shymkent, Kazakhstan*

³*Pavlodar Pedagogical University named after Alkey Margulan, Pavlodar, Kazakhstan*
(E-mail: *koshkinbaev_s@miras.edu.kz*, *ainur1179@mail.ru*, *n.smailov@satbayev.university*,
kidir200091@gmail.com, *a.kuttybayeva@satbayev.university*)

Application of FBG Sensors in monitoring of space structures

Abstract. This paper presents a comprehensive assessment of the applicability of Fiber Bragg Grating (FBG) sensors under harsh conditions characteristic of space environments. The study analyzes the operational performance of the sensors under vacuum conditions, thermal cycling, mechanical loading, and extreme temperatures in the range of 800–1000 °C. It is demonstrated that regenerated FBG technology provides long-term stability at high temperatures and ensures the preservation of the Bragg wavelength without spectral drift. In addition, the linear dependence of the Bragg wavelength on strain confirms the high measurement accuracy of the sensors. The capability of embedded FBG sensor networks to simultaneously monitor multiple parameters within a single optical fiber proves their effectiveness in structural health monitoring (SHM) systems. A review of the literature reveals that comprehensive evaluations of FBG sensors in space environments remain limited, and a system-level analysis of the “sensor–structure–measurement system” chain is insufficiently addressed. To fill this gap, a comprehensive experimental methodology considering the effects of vacuum, thermal cycling, and ultraviolet radiation is proposed. Simulation of the low Earth orbit (LEO) environment is performed to analyze the long-term stability and reliability of the sensors. The obtained results demonstrate that FBG sensors can serve as a reliable measurement platform for monitoring the structural condition of spacecraft.

Keywords: Fiber Bragg Grating (FBG) sensors, space environment, harsh conditions, structural health monitoring (SHM), long-term stability, spectral drift, thermo-vacuum testing.

References

1. O. G. Morozov, Fiber Bragg grating-based sensors and systems, *Sensors* 21, 8225 (2021).<https://doi.org/10.3390/s21248225>
2. R. Di Sante, Fibre optic sensors for structural health monitoring of aircraft composite structures: Recent advances and applications, *Sensors* 15(8), 18666-18713 (2015). <https://doi.org/10.3390/s150818666>.
3. S. Ju, P. R. Watekar, and W.-T. Han, Highly sensitive temperature sensor using fiber Bragg grating on Pb/Ge-codoped fiber, in *Optical Fiber Communication Conference and National Fiber Optic Engineers Conference*, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2009). <https://doi.org/10.1364/NFOEC.2009.JWA10>.
4. B. Liu, Z. Gao, R. Yao, L. Ding, and X. Xia, Development of a high-sensitivity humidity sensor using fiber Bragg grating coated with LiCl@UIO-66-doped hydrogel, *Materials* 18, 5587 (2025), <https://doi.org/10.3390/ma18245587>.

5. A. Sivasuriyan, D. S. Vijayan, W. Górski, Ł. Wodzyński, M. D. Vaverková, and E. Koda, Practical implementation of structural health monitoring in multi-story buildings, *Buildings* 11, 263 (2021), <https://doi.org/10.3390/buildings11060263>.
6. A. Fernández-Medina and M. Frövel et al., Embedded fiber Bragg grating sensors for monitoring temperature and thermo-elastic deformations in a carbon fiber optical bench, *Sensors* 23, 6499 (2023), <https://doi.org/10.3390/s23146499>.
7. M. Kumari and S. K. Mishra, Transmission of LG modes in high-capacity 16 × 10 Gbps FSO system using FBG sensors under different channel scenarios, *Micromachines* 16, 738 (2025). <https://doi.org/10.3390/mi16070738>
8. L. Fazzi, N. Dias, M. Holynska, A. Tighe, R. Rampini, and R. M. Groves, Monitoring of silicone adhesive in space solar cells with an embedded multi-parameter TFBG sensor in a simulated space environment, *Meas. Sci. Technol.* 33, 085108 (2022), <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac6d45>.
9. Y. Deng, W. Ren, and X. Wang, Scientometric analysis and research trends in optical fiber grating sensors: A review, *Photonics* 12, 349 (2025). <https://doi.org/10.3390/photonics12040349>
10. A. Kalizhanova, A. Kozbakova, M. Kunelbayev, T. Kartbayev, and G. Kashaganova, Research on the relative displacement distribution of a composite plate with built-in FBG sensors, *J. Compos. Sci.* 9, 198 (2025). <https://doi.org/10.3390/jcs9050198>
11. Y. Park, H. Kwon, P. Shrestha, and C. Kim, Investigation of LEO environment exposure monitoring potential using embedded FBG sensors, *Proc. SPIE* 10323, 103239E (2017). <https://doi.org/10.1117/12.2267564>
12. J. Wang and J. Tang, Feasibility of fiber Bragg grating and long-period fiber grating sensors under different environmental conditions, *Sensors* 10, 10105–10127 (2010). <https://doi.org/10.3390/s101110105>
13. A. Aimasso, C. G. Ferro, M. Bertone, M. D. L. Dalla Vedova, and P. Maggiore, Fiber Bragg grating sensor networks enhance the in situ real-time monitoring capabilities of MLI thermal blankets for space applications, *Micromachines* 14, 926 (2023), <https://doi.org/10.3390/mi14050926>.
14. G. Korompili, G. Mußbach, and C. Riziotis, Structural health monitoring of solid rocket motors: From destructive testing to perspectives of photonic-based sensing, *Instruments* 8, 16 (2024), <https://doi.org/10.3390/instruments8010016>.
15. D. Kiesewetter, S. Krivosheev, S. Magazinov, V. Malyugin, S. Varzhel, E. Loseva, S. Koshkinbayev, and N. K. Smailov, Application of fiber Bragg gratings as a sensor of pulsed mechanical action, *Sensors* 22, 7289 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22197289>
16. M. Celikin, D. Barba, B. Bastola, A. Ruediger, and F. Rosei, Development of regenerated fiber Bragg grating sensors with long-term stability, *Opt. Express*, <https://doi.org/10.1364/OE.24.021897>.
17. M. Tomsia et al., Long-term space missions' effects on the human organism: What we do know and what requires further research, *Front. Physiol.* (2024). <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1284644>
18. S. J. Mihailov, Fiber Bragg grating sensors for harsh environments, *Sensors* 12, 1898–1918 (2012). <https://doi.org/10.3390/s120201898>
19. I. McKenzie, S. Ibrahim, E. Haddad, S. Abad, A. Hurni, and L. K. Cheng, Fiber optic sensing in spacecraft engineering: An historical perspective from the European Space Agency, *Front. Phys.* 9, 719441 (2021), <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.719441>.

20. W. Liu, M. Wu, G. Wan, and M. Xu, Digital twin of space environment: Development, challenges, applications, and future outlook, Remote Sens. 16, 3023 (2024), <https://doi.org/10.3390/rs16163023>.

Авторлар туралы мәлімет:

Көшкінбаев Сәулетбек Жолдықараұлы – PhD докторы, қауымдастырылған профессоры, Қ.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университеті, Алматы, Қазақстан, «Мирас» университеті, 050013, Шымкент, Қазақстан.

Сейтханова Айнура Кусбековна – PhD докторы, қауымдастырылған профессоры, Ә.Марғұлан атындағы Павлодар педагогикалық университеті, Павлодар, Қазақстан.

Смайлов Нуржигит Куралбаевич – хат-хабар авторы, «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының профессоры, PhD доктор, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті университеті, 050013, Алматы, Қазақстан.

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы – «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының докторанты, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті университеті, 050013, Алматы, Қазақстан.

Куттыбаева Айнура Ермеккалиевна – «Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасының қауым. профессоры, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті университеті, 050013, Алматы, Қазақстан.

Көшкінбаев Сәулетбек Жолдықараұлы – доктор PhD., ассоциированный профессор, Казахский национальный технический университет имени К.Сатпаева, г. Алматы, Казахстан, Университет «Мирас», 050013, г. Шымкент, Казахстан

Сейтханова Айнура Кусбековна – доктор PhD, ассоц. проф., Павлодарский педагогический университет имени Ә. Марғұлан, г. Павлодар, Казахстан

Смайлов Нуржигит Куралбаевич – автор для корреспонденции, профессор, доктор PhD кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан

Ысырайыл Қыдырәлі Мұсаханұлы – докторант кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан

Куттыбаева Айнура Ермеккалиевна – ассоц. проф. кафедры «Электроники, телекоммуникации и космических технологий», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 050013, г. Алматы, Республика Казахстан

Koshkinbayev Sauletbek Zholdykarauy – PhD, Associate Professor, K. Satpayev Kazakh National Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan, Miras University, 050013, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Seitkhanova Ainur Kusbekovna – PhD, Associate Professor, A. Margulan Pavlodar Pedagogical University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

Smailov Nurzhigit Kuralbaevich – the corresponding author, professor, PhD, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan

Yssyraiyl Kydyrali Musakhanuly – doctoral student, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Kuttybayeva Ainur Ermekkalievna – Associate Professor, Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, 050013, Almaty, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).