

Геотехникалық жағдайды мониторингтеудің талшықты-оптикалық жүйесін құру негіздері

^{1*}НЕШИНА Елена Геннадьевна, т.ғ.к., кафедра меңгерушісі м.а., 1_neg@mail.ru,

²МЕХТИЕВ Али Джаванширович, т.ғ.к., доцент, barton.kz@mail.ru,

¹КАЛИАСКАРОВ Нурбол Балтабаевич, PhD, кафедра меңгерушісі м.а., 90nurbol@mail.ru,

¹АЛЬКИНА Алия Даулетхановна, аға оқушысы, alika_1308@mail.ru,

¹ЮГАЙ Вячеслав Викторович, PhD, кафедра меңгерушісі м.а., slawa_v@mail.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

²«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Нұр-Сұлтан, Жеңіс даңғылы, 62,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Тәжірибелік және теориялық зерттеулердің нәтижелері ұсынылды, бұл зерттеулер карьерлердің апаттық жағдайын алдын-ала ескертетін талшықты-оптикалық мониторингтеу жүйелерін дамытуда маңызды орнын алады. Өз бағытын дамытудың арқасында авторлар талшықты-оптикалық датчиктердің өзіндік құрылымын ұсынады және бұл датчиктер квазиүйлестірілген мониторингтеу жүйесіне кіреді. Қолданыстағы жүйелер мен олардың кемшіліктері қарастырылған. Классикалық геометриялық және толқындық оптиканың әдістерін қолдана отырып, жүйелерді құрастырудың физикалық негіздері келтірілген. Сезімтал сенсор ретінде G.652.D стандарттағы SMF түріндегі Corning фирмасының бірмодальдық оптикалық талшығы қолданылды. Оптикалық жоғалулардың датчиктің ығысу шамасынан тәуелділігі алынды. Талшықты-оптикалық датчиктің үлгісі жоғары сызықтық пен дәлдікті көрсетті.

Кілт сөздер: мониторингтеу жүйесі, массивтің тұрақтылығы, талшықты-оптикалық датчик, құралдық-бағдарламалық кешен, үздіксіз бақылау, ығысу датчигі, массивтің тұрақтылығы, карьер, оптикалық талшық, геотехникалық жағдай.

Кіріспе. Пайдалы қазбаларды өндіру және өңдеу саласындағы өнеркәсіпті дамыту жұмыстары апатты жағдайларды болдырмауға, азайтуға, өндірістің тиімділігін арттыруға және өндірістік жұмыстардың қауіпсіздігін ұйымдастыруға бағытталған. Тау-кен қазбаларының геотехникалық жағдайдың үздіксіз мониторингі және сенімді ақпаратты жинауы тау-кен кәсіпорындарының апатсыз жұмыс режимін қамтамасыз ете алады. Геотехникалық радарды пайдалануға негізделген қолданыстағы автоматтандырылған мониторинг жүйелері карьердің массив маңының орын ауыстырудың бақылау функцияларын сапалы әрі тиімді орындайды, бірақ олардың көптеген кемшіліктері болады. Кемшіліктердің ең маңыздыларының біріне – қолданылып жатқан жабдықтың жоғары бағасы мен олардың қолданысына жұмсалатын көптеген шығындар жатады. Сонымен қатар оларды қолданылуында да белгілі бір шектеулер бар. Осыған байланысты қаржылық шығындар аз болатын тау-кен жұмыстарын қауіпсіз жүргізе алатын жаңа автоматтандырылған мониторинг жүйесін іздеу және құрастыру өзекті мәселе болып табылады. Ашық

тәсілмен пайдалы қазбаларды өндіруді жүзеге асыратын Қазақстан Республикасының тау-кен өндіру кәсіпорындарында карьерлердің ернеулері мен үйінділердің орнықтылығын бақылау және мониторингтеу толық көлемде шешілмеген өзекті ғылыми және қолданбалы мәселе болып табылады. [1-4] жұмыстарды талдау кезінде бұл мәселе күрделі екендігіне және толықтай шешілмегеніне көз жеткізуге болады. Бұл жұмыстарда ернеу маңындағы массивтің тұрақтылығын бақылауға мүмкіндік беретін әртүрлі әдістерді қолдануға негізделген кешенді шешім қалыптастыру идеясы айтылған. Шетелдік авторлардың еңбектерінде құрылымдық жағдайды бақылау үшін талшықты-оптикалық технологияның дамуы мен таралуына қатысты тау-кен жұмыстарының қауіпсіздігін қамтамасыз ету және ұзақ мерзімді жоспарлау үшін тау-кен массивінің тұрақтылығы туралы ақпарат бар. Жұмыста талшықты-оптикалық технологияларды, атап айтқанда аппараттық-бағдарламалық кешенге кіретін талшықты-оптикалық датчикті (ТОД) пайдаланумен байланысты ғылымның жаңа жетістіктерін пайдалану есебінен еңбек қауіпсіздігін арттыру ұсыны-

лады [5-6].

Жұмыстың өзектілігі. Өндіру тиімділігін арттыру бағыттарының бірі карьерлер мен тіліктер ернеулерінің табиғи еңіс бұрышын ұлғайтуға бағытталған ғылымды қажетсінетін түрлі әдістерді әзірлеу болып табылады, бұл бірқатар проблемаларды ішінара шешуге мүмкіндік береді, бірақ бұл ретте ернеулердің тұрақтылығымен байланысты мәселе туындайды.

Бұл мәселенің бірқатар шешімдері геотехникалық радарларды, лазерлік 3D сканерлерді, электрлік ығысу датчиктерін қолдануға дейін азаяды, бірақ бұл құралдар тиімді немесе қымбат емес, өйткені бір өлшеу нүктесінің құны жоғары болады (1-сурет). Талшықты-оптикалық технологиялардың дамуы ОТ өндірісінің құнын едәуір төмендетіп, оның қасиеттерін арттырды. ОТ көмегімен сіз белгілі бір типтегі ТОД құра аласыз, бұл бір

өлшеу нүктесінің құнын едәуір төмендетеді және пайдалану шығындарын азайтады [7-8].

Өлшеулерді жүргізу әдістері. 2-суретте дамыған талшықты-оптикалық датчик (ТОД) көрсетілген. ТОД негізінде қосымша жоғалуларды бақылайтын белгілі әдіс бар, оларға механикалық әдістер әсер еткенде ОТ ішінде пайда болады. Сезімтал сенсор ретінде G.652.D стандарттағы SMF түріндегі Corning фирмасының бірмодальдық оптикалық талшығы қолданылды [9-10].

3-суретте тәжірибелік сынақтың схемасы көрсетілген.

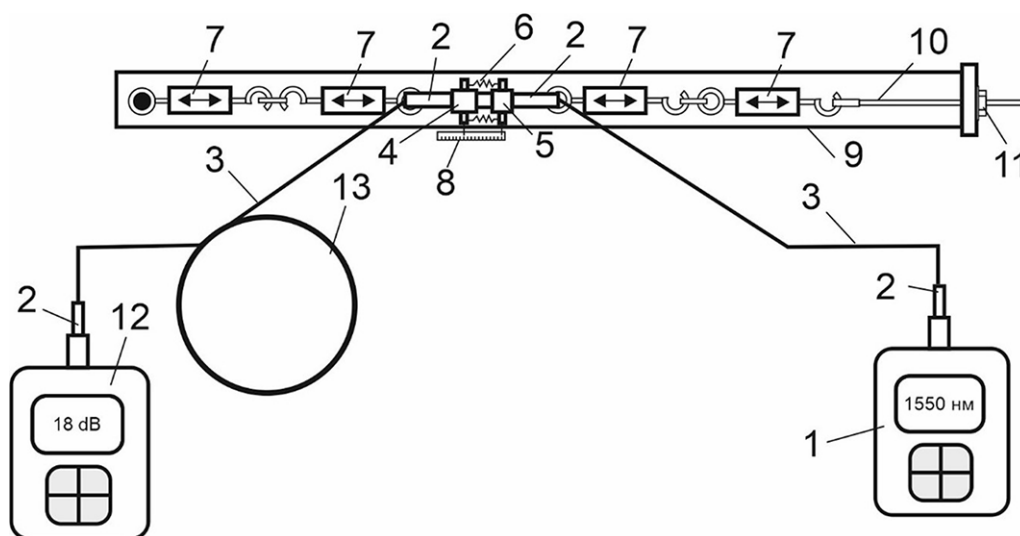
Ұсынылған схемаға сәйкес, өсіп келе жатқан жарықтар пайда болады, бұл 5 сенсордың бекітілген бөлігіне қатысты 4 қозғалмалы бөлігінің қозғалысына әкеледі, нәтижесінде пайда болатын қосымша шығындардың өзгеруін түзетуге мүмкіндік береді, олар кейіннен орын ауыстыру бір-



1-сурет – «Молодежный» разрезінде орнатылған мониторинг жүйесінің үлгісі



2-сурет – Талшықты-оптикалық датчик



1 – 1550 нм толқын ұзындығы бар көрінетін сәуленің көзі (жартылай өткізгішті лазер), 2 – SC оптикалық конвектор, 3 – оптикалық патч-корд, 4 – талшықты-оптикалық сенсордың бекітілген бөлігі, 5 – талшықты-оптикалық ығысу датчигінің жылжымалы бөлігі, 6 – серіппелі теледидар матрицасы, 7 – керме мұфтасы, 8 – есеп шкаласы, 9 – негіз, 10 – керме түйреуіш, 11 – кернеу гайкасы USB кабелі, 12 – оптикалық қуат өлшеуіш, 13 – талшықты-оптикалық ілмек

3-сурет – Тәжірибелік сынақты жүргізу схемасы

ліктеріне айналады. 4 және 5 бөліктері бір-бірінен алыстаған сайын, оптикалық қуаттың жоғалуы соғұрлым көп болады.

Жүйені құрастырудың физикалық негіздері. Осы жұмыс аясында классикалық геометриялық және толқындық оптика әдістері қолданылды, бұл зерттеу кезеңінде оптикалық талшықты элемент пен жарық толқыны әсерлесуіне байланысты микроскопиялық механизмдер қарастырылмады.

ОТ-тағы қосымша шығындар мен оптикалық сыну көрсеткіштерінің мәні механикалық әсер мен температураға байланысты:

$$\frac{\Delta q}{q} = \frac{1}{q \left(\frac{dq}{dT} \right) k \Delta T} + \frac{\delta q}{q},$$

мұндағы q – қосымша оптикалық талшықты жоғалтулар;

 Δq – қосымша жоғалулардың өзгеруі;

$\left(\frac{dq}{dT}\right)k$ – оптикалық талшықтағы ысыраптардың температуралық тәуелділігінің жартылай туындысы, дБ;

δq – фотосерпімділік есебінен қосымша шығындар көрсеткішінің өзгеруі, дБ;

ΔT – температуралық әсер, °C.

Бекіту нүктелері арасындағы ΔL қашықтықты шамаға өзгертуге байланысты физикалық негіздері ОТ сенсордағы тіректің және ұзартудың бірлескен орын ауыстыруын тудырады. Ригельдің ұзаруынан туындаған F_R күшіне ұшырауы мен массивтің деформациясы мен жарықтың ашылуына байланысты оның қозғалысынан ОТ F_F кернеу күші және серіппелі кернеу күші пайда болады: $F_P: F_R = E_F + F_P$.

ОТ кернеу күші келесі формула бойынша

анықталады:

$$F_F = 2n \cdot kF \cdot l_s,$$

мұндағы n – ОТ орам саны;

kF – ОТ серпимділік коэффициенті, Н/м;

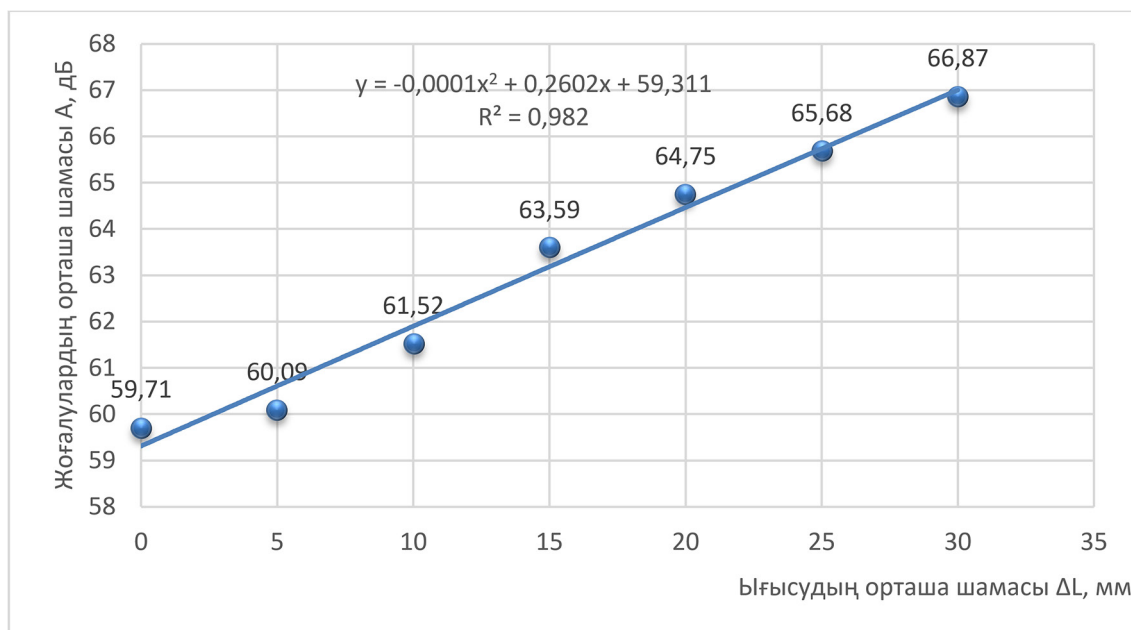
 l_s – ОТ созылуу, м.

Оптикалық сәулелену қуатының жоғалуын өлшеу үшін VIAVI (JDSU) smartpocket OLP-38 оптикалық қуат өлшегіші қолданылды, ол – 60-тан 26 дБ-ға дейінгі динамикалық диапазонда жұмыс істейді, ал толқын ұзындығы 1550 нм тең болады. Оптикалық сәулелену көзі ретінде SmartPocket OLS-34/35/36 пайдаланылды. ОТ қосылымы 2,5 мм әмбебап адаптер және SC түріндегі оптикалық қосқыштар арқылы жүзеге асырылды. Эксперименттердің нәтижелері 4-суретте көрсетілген.

Жуықтау жүргізгендегі критерийлердің шамалары кестеде көрсетілген.

Эксперименттердің нәтижелері Акаике ақпараттық критерийінің ең аз мәнін ескере отырып өңделеді, екінші дәрежелі жуықтаудың ең жақсы нұсқасы таңдалады, онда анықтау коэффициенті $R^2=0,982$ құрайды. ОТ ұштарының алшақтықтары кезінде пайда болатын қосымша шығындарды бақылауға негізделген ТОД зертханалық үлгісі өлшеу кезінде жоғары сызықтық пен дәлдікті көрсетті және оны карьерлер мен кеніштердің бүйірлерінің деформациясын бақылау үшін пайдалануға болады.

Қорытынды. Карьер мен қима ернеулерінің құлауына әкелетін геотехникалық параметрлердің өзгеруі туралы алдын-ала хабарлау үшін нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін карьерлер мен разрездердің тау-кен қазбаларының геотехникалық жай-күйін мониторингілеудің зияткерлік талшықты-оптикалық жүйесін құру тау-кен



4-сурет – Өлшеулер нәтижесі

Жуықтау нәтижелері

Жуықтау критерийі	AIC	BIC	R ²	Adjusted R ²
quartic	−100,704	−98,3164	0,999263	0,999263
cubic	−97,2166	−95,2271	0,998959	0,998959
quadratic	−89,4635	−87,872	0,982000	0,99779

жұмыстарын жүргізу қауіпсіздігінің деңгейін арттыруға және құлау салдарын жоюға арналған экономикалық шығындарды қысқартуға мүмкіндік береді. Жүйенің негізгі айырмашылығы-ква-

зиүйлестірілген ығысуды бақылайтын жүйесін қолдану арқылы геотехникалық күйді жоғары сезімталдықпен сәйкестендіруді үздіксіз бақылау әдісін қолдану.

Бұл ғылыми жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылым комитетімен гранттық қаржыландыру шеңберінде «Карьерлер мен разрездердің тау-кен қазбаларының геотехникалық жай-күйі мониторингінің зияткерлік талшықты-оптикалық жүйесін әзірлеу» ЖТН № AP14869145 жобасын іске асыру барысында алынған нәтиже болып табылады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- Smirnov N.A., Prostov S.M. Prediction of the parameters of the slopes of quarries sides according to the geophysical monitoring data. Vestnik KuzGTU = Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2012. No. 1. pp. 3-7.
- Чотчаев, Х.О. Контроль напряженно-деформированного состояния горного массива звукометрическими и геофизическими методами / Х.О. Чотчаев // Геология и геофизика юга России. – 2016. – № 3. – Б. 129-140.
- Saponero M.A. Special Issue «Fibre Optic Sensors for Structural and Geotechnical Monitoring». URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2415> (дата обращения: 01.08.2020). DOI: 10.3390/s20082415
- Lanciano C., Salvini R. Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/1924/htm> (дата обращения: 01.08.2020). DOI: 10.3390/s20071924
- Ding, M. Basics of Optical Fiber Measurements / M. Ding, D. Fan, W. Wang, Y. Luo, G.-D. Peng // Handbook of Optical Fibers. – 2018. – 39 p.
- Kim, S.T. A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces / S.T. Kim, Y.-H. Park, S.Y. Park, K. Cho, J.-R. Cho // Sensors. – 2015. – Vol.15, no. 1. – pp. 1060-1070.
- Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers/ A.D. Mekhtiyev, A.V. Yurchenko, Y.G. Neshina et al. // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. – Vol. 56. – Iss.

2. – pp. 179-190.
8. Mekhtiyev A.D., Soldatov A.I., Neshina Y.G., Alkina A.D., Madi P.Sh. The working roof rock massif displacement control system. N E W S of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Volume 5, Number 449 (2021), 68-76. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.100>
9. Mekhtiyev A.D., Neshina Y.G., Madi P., Gorokhov D.A. Automated fiber-optic system for monitoring the stability of the pit quarry mass and dumps. Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti, Vol. 4, 2021. – pp. 19-26. DOI:10.24000/0409-2961-2021-4-19-26 <https://www.btpnadzor.ru/archive/avtomatizirovannaya-volokonno-opticheskaya-sistema-monitoringa-ustoychivosti-pribortovogo-massiva-karera-i-otvalov>
10. Yugay V., Mekhtiyev A., Neshina Y., Madi P., Alkina A., Gazizov F., Afanaseva O., Ilyashenko S. Fiber-Optic System for Monitoring Pressure Changes on Mine Support Elements. Sensors 2022, 22(5), 1735. pp. 1-6.

Основы создания волоконно-оптической системы мониторинга геотехнического состояния

¹***НЕШИНА Елена Геннадьевна**, к.т.н., и.о. зав. кафедрой, 1_neg@mail.ru,

²**МЕХТИЕВ Али Джаванширович**, к.т.н., доцент, barton.kz@mail.ru,

¹**КАЛИАСКАРОВ Нурбол Балтабаевич**, PhD, и.о. зав. кафедрой, 90nurbol@mail.ru,

¹**АЛЬКИНА Алия Даулетхановна**, старший преподаватель, alika_1308@mail.ru,

¹**ЮГАЙ Вячеслав Викторович**, PhD, и.о. зав. кафедрой, slawa_v@mail.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

²НАО «Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина», Казахстан, Нур-Султан, пр. Женис, 62,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, имеющих важное значение для развития волоконно-оптических систем мониторинга предупреждения обрушения карьеров. Развивая свое направление, авторы предлагают собственную конструкцию волоконно-оптических датчиков, входящих в квазираспределенную систему мониторинга. Рассмотрены существующие системы и их недостатки. Приведены физические основы создания системы с применением методов классической геометрической и волновой оптики. В качестве чувствительного сенсора использовано одномодовое оптическое волокно фирмы Corning типа SMF стандарта G.652.D. Получены зависимости оптических потерь от значения смещения датчика. Образец волоконно-оптического датчика показал высокую линейность и точность.

Ключевые слова: система мониторинга, волоконно-оптический датчик, аппаратно-программный комплекс, непрерывный контроль, датчик смещения, устойчивость массива, карьер, оптическое волокно, геотехническое состояние.

Fundamentals of Creating a Fiber-Optic System for Monitoring the Geotechnical State

¹***NESHINA Yelena**, Cand. of Tech. Sci., Acting Head of Department, 1_neg@mail.ru,

²**MEKHTIYEV Ali**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, barton.kz@mail.ru,

¹**KALIASKAROV Nurbol**, PhD, Acting Head of Department, 90nurbol@mail.ru,

¹**ALKINA Aliya**, Senior Lecturer, alika_1308@mail.ru,

¹**YUGAY Vyacheslav**, PhD, Acting Head of Department, slawa_v@mail.ru,

¹NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

²NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University», Kazakhstan, Nur-Sultan, Zhenis Avenue, 62,

*corresponding author.

Abstract. Present the results of experimental and theoretical studies that are important for the development of fiber-optic monitoring systems to prevent the collapse of quarries. Developing their direction, the authors propose their own design of fiber-optic sensors included in a quasi-distributed monitoring system. The existing systems and their disadvantages are considered. The physical foundations of creating a system using the methods of classical geometric and wave optics are given. A single-mode optical fiber of Corning type SMF standard G.652.D is used as a sensitive sensor. The dependences of optical losses on the value of the sensor offset are obtained. The sample of the fiber-optic sensor showed high linearity and accuracy.

Keywords: monitoring system, fiber-optic sensor, hardware and software complex, continuous monitoring, displacement sensor, array stability, quarry, optical fiber, geotechnical condition.

REFERENCES

1. Smirnov N.A., Prostov S.M. Prediction of the parameters of the slopes of quarries sides according to the geophysical monitoring data. *Vestnik KuzGTU = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2012. No. 1. pp. 3-7.
2. Chotchaev, H. O. Kontrol' naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija gornogo massiva zvukometricheskimi i geofizicheskimi metodam / H.O. Chotchaev // *Geologija i geofizika juga Rossii*. – 2016. – No. 3. – pp. 129-140.
3. Caponero M.A. Special Issue «Fibre Optic Sensors for Structural and Geotechnical Monitoring». URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2415> (дата обращения: 01.08.2020). DOI: 10.3390/s20082415
4. Lanciano C., Salvini R. Monitoring of Strain and Temperature in an Open Pit Using Brillouin Distributed Optical Fiber Sensors. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/1924/htm> (дата обращения: 01.08.2020). DOI: 10.3390/s20071924
5. Ding, M. Basics of Optical Fiber Measurements / M. Ding, D. Fan, W. Wang, Y. Luo, G.-D. Peng // *Handbook of Optical Fibers*. – 2018. – 39 p.
6. Kim, S.T. A Sensor-Type PC Strand with an Embedded FBG Sensor for Monitoring Prestress Forces / S.T. Kim, Y.-H. Park, S.Y. Park, K. Cho, J.-R. Cho // *Sensors*. – 2015. – Vol.15, no.1. – pp. 1060-1070.
7. Nondestructive Testing for Defects and Damage to Structures in Reinforced Concrete Foundations Using Standard G.652 Optical Fibers/ A.D. Mekhtiyev, A.V. Yurchenko, Y.G. Neshina et al. // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. – 2020. – Vol. 56. – Iss. 2. – pp. 179-190.
8. Mekhtiyev A.D., Soldatov A.I., Neshina Y.G., Alkina A.D., Madi P.Sh. The working roof rock massif displacement control system. *N E W S of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, Volume 5, Number 449 (2021), 68-76. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.100>
9. Mekhtiyev A.D., Neshina Y.G., Madi P., Gorokhov D.A. Automated fiber-optic system for monitoring the stability of the pit quarry mass and dumps. *Bezopasnost' Truda v Promyshlennosti*, Vol. 4, 2021. – pp. 19-26. DOI:10.24000/0409-2961-2021-4-19-26 <https://www.btpnadzor.ru/archive/avtomatizirovannaya-volokonno-opticheskaya-sistema-monitoringa-ustoychivosti-pribortovogo-massiva-karera-i-otvalov>
10. Yugay V., Mekhtiyev A., Neshina Y., Madi P., Alkina A., Gazizov F., Afanaseva O., Ilyashenko S. Fiber-Optic System for Monitoring Pressure Changes on Mine Support Elements. *Sensors* 2022, 22(5), 1735. pp. 1-6.