

ӨОК 530.1
МРНТИ 29.05.45

СЕЙСМИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІ ЖЕР ҚЫРТЫСЫ АРҚЫЛЫ ӨТІМДІЛІГІ ЖОҒАРЫ ҒАРЫШ НҰРЫНЫҢ ӨТУІНЕ БАЙЛАНЫСТЫ ТУЫНДАЙТЫН АКУСТИКАЛЫҚ СИГНАЛДАР

ЖУКОВ В.В.¹, ИДРИСОВА Т.Қ.², МҰҚАШЕВ Қ.М.³, МҰРАДОВ А.Д.³,
САДЫКОВ Т.Х.², САДУЕВ Н.О.³, УМАРОВ Ф.Ф.⁴, ШЕПЕТОВ А.Л.⁵

¹Ғарыш сәулелерінің Тянь-Шань таулы ғылыми-зерттеу станциясы

²Сәтбаев университеті

³әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жанындағы ЭТФҒЗИ

⁴Қазақстан-Британ техникалық университеті

⁵П.Н. Лебедев атындағы Физика институты, РФА, Москва қ., Ресей

Аңдатпа: Терең кеңістікте орналасқан жер қыртысының сейсмикалық құбылыстарға байланысты бүлінуі кезінде дербес түрдегі дараланған акустикалық сигналдардың пайда болатыны анықталған. Табиғаты осы тектес сигналдармен қосарласа туындаған ғарыш сәулесінің энергиясы жоғары мюондары арасында уақытқа байланысты айтарлықтай статистикалық мағынасы бар корреляцияның қалыптасатыны белгілі болды. Бұл жағдай өтімділігі жоғары мюон бөлшектерінің жер асты тереңдігінде әлсіз ионизация арқылы триггерлік әсерді тудыруы туралы болжамды дәлелдеуінің куәсі болса керек. Нәтижесінде сейсмикалық белсенділігі жоғары жер қыртысының бүлінуімен қатар, оның айналасында қордаланған серпінді энергияның босануына, сол арқылы дербес акустикалық сигналдың таралуына мүмкіндік туады. Егер бұл құбылыстар нақты эксперименттермен толық дәлелденетін болса, оның нәтижелері жер сілкінісі туралы болжамдық мағынадағы пікірлерді шешу жолындағы маңызды және құнды еңбектер қатарына қосылары анық.

Түйінді сөздер: ғарыш сәулесінің мюондары, ауқымды атмосфералық нөсер, сейсмология, жер сілкінісі туралы болжам

АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОХОЖДЕНИЕМ ПРОНИКАЮЩЕГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ СЕЙСМИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННУЮ СРЕДУ

Аннотация: Обнаружены спорадические акустические сигналы, предположительно связанные с процессами сейсмической активности в районе разрушения глубокой земной коры. Была обнаружена статистически значимая временная корреляция между такими сигналами и моментами прохождения мюонов космических лучей высоких энергий. Это обстоятельство подтверждает предположение о возможном триггерном эффекте малой ионизации, создаваемой проникающими частицами глубоко под землей, что может вызвать высвобождение энергии упругой деформации, накопленной на краях сейсмического разлома. В случае подтверждения данный эффект может представлять значительный научный и практический интерес при решении проблем прогноза землетрясения.

Ключевые слова: мюоны космических лучей, широкие атмосферные ливни, сейсмология, прогноз землетрясений

ACOUSTIC SIGNALS ASSOCIATED WITH THE PASSAGE OF PENETRATING COSMIC RADIATION THROUGH A SEISMICALLY STRESSED ENVIRONMENT

Abstract: *We detected the sporadic acoustic pulses presumably connected with the processes of seismic activity in the region of a deep earth's crust fracture near Almaty city. It was found a statistically significant time correlation between such pulses and the passage moments of high energy cosmic ray muons. This observation is in favor of a theoretic supposition about possible trigger effect of small ionization created by penetrative particles deep underground which may provoke releasing the energy of elastic deformation accumulated at the edges of a seismic fault. If confirmed, this effect could be of interest for the earthquake forecast problem.*

Key words: *cosmic rays muons, extensive air shower, seismology, earthquake forecast*

Кіріспе

Сейсмикалық құбылыстарға байланысты жер қыртыстарының өзара ығысуы нәтижесінде туындайтын серпімді деформация литосфералық ортада микрожарықшалардың пайда болуына, соның салдарынан серпімді тербелістердің таралуына негіз болады. Акустикалық эмиссия деп аталатын мұндай вибрациялық қозғалыстар жер қыртысы арқылы дыбыс тербелістері түрінде таралады. Оларды жер бетіне жақын орналасқан микрофон тектес сезімталдығы жоғары датчиктермен тіркеу қиындық туғызбайды [1-3]. Бұл сигналдардың қарқындылығын үздіксіз қадағалау литосфералық тереңдіктегі жер қыртысының күйін дер кезінде анықтауға, сол арқылы жер сілкінісі туралы мағлұматты уақыт оздырмай біліп тұруға мүмкіндік туғызады [4,5]. Сейсмикалық кінаратты аймақта қордаланып қалған энергияны шамалы мөлшердегі сыртқы триггерлік әсер арқылы босатып жіберудің қиыншылығы жоқ. Ресей Ғылым академиясының П.Н. Лебедев атындағы физика институтында (ФИАН) бұған дейін орындалған теориялық зерттеулерде [6,7] өтімділігі жоғары элементар бөлшектердің сол кеңістікте әсерлесуі нәтижесінде орын алатын ионизациялық процестердің литосферада осындай триггерлік әсер туғызуының ықтималдығы дәлелденген еді. Соған сәйкес, [8] жұмыста бірнеше километрлік тереңдікке өту барысында литосфераның затымен әсерлесуге қабілетті мюондарды пайдалану арқылы осы мәселені жүзеге асырудың жолдары мен мүмкіндіктері біршама ойластырылған.

Бұл гипотезаны эксперименталдық жолмен тексеруге қолайлы кеңістік ретінде Алматы қаласының маңында орналасқан, сейсмикалық белсенділігі жоғары, жер қыртысының кінараты жеткілікті Тянь-Шань биік таулы ғарыштық нұрды зерттеу станциясын пайдалануға болады. Бұған дейін [9] жұмыста ғарыш нұрының жоғары энергиялы мюондары өткеннен кейін пайда болатын қысқа мерзімді акустикалық эмиссияның кешігу себебін зерттеу үшін жүргізілген эксперименттердің нәтижелері жарияланған еді. Қазіргі кезеңде станция энергетикалық мюондары бар ауқымды атмосфералық нөсерлерді (ААН) бақылаушы, анықтаушы, тіркеуші және оның тиісті параметрлерін – өлшемін, бастапқы энергиясын, нөсер өсінің координатасына дейін дәл табуға арналған детекторлармен жабдықталған. Акустикалық эмиссия сигналын қадағалау үшін Тянь-Шань станциясының нөсерлер қондырғысының центріне жақын аралыққа, 50 метрлік скважинаға орналастырылған, сезімталдығы өте жоғары микрофон текті датчик қолданылады. Аталмыш кешенді құрылғыны пайдаланып, ААН құбылыстары мен сейсмикалық табиғаты бар кез-келген акустикалық сигналдар арасындағы логикалық байланыстың уақыт ішіндегі статистикалық корреляциясының қаншалықты орынды екенін анықтау жұмыстарын жүргізу арқылы құнды ғылыми нәтижелерге қол жеткізілді. Соған байланысты, жазылып отырған осы жұмыстың мақсаты – 6800 сағаттық уақыт ішінде Тянь-Шань станциясы деңгейінде 2017-2019 жылдар ара-

лығында ААН мен акустикалық сигналды тіркеу үшін үздіксіз жүргізілген эксперименттер нәтижесін корреляциялық тұрғыдан талдау және баяндау.

Зерттеу жұмыстарының эксперименталдық жабдыкталуы

Тянь-Шань тауындағы экспериментте ауқымды атмосфералық нөсерді (ААН), зарядталған бөлшектерді тіркеуге арналған 72 сцинтилляциялық детекторлардан тұратын арнайы жүйе қолданылады. Детекторлар өзара бірдей қашықтықта, 1000 м^2 ауданға орналастырылған, сондықтан «детекторлар кілемі» деп аталады. ААН-дің өткені туралы мағлұмат арнайы құрылған дискриминаторлық схема арқылы өндіріледі. Дискриминатордың міндеті – нөсердің құраушылары барлық детекторлар арқылы өткен кезде тіркелген сцинтилляциялық сигналдың қорытқы мәні алдынала тағайындалған шамадан асқан кезде триггерлік деп аталатын басқарушы импульстық сигналды өндіру. Әдетте дұрыс құрылған жүйе бастапқы энергиясы 10^{15} эВ жоғары болатын, өстері детекторға тура келген барлық ААН-ді тіркеу арқылы минутына 4-5 триггерлік импульстарды өндіруге қабілетті. Әрбір осындай триггерлік оқиға Тянь-Шань станциясының банк қорына жинақталады және оның өту мерзімі жоғары дәлдікпен тіркеледі. Экспериментке қатынасы бар басқа қондырғылардың мағлұматын талдау мәселесі осы триггерлік белгімен салыстыру арқылы жүргізіледі.

Кез-келген ААН нөсер өсінің екі координатасымен (х,у) және нөсердің құрамындағы зарядталған бөлшектердің жалпы санымен N_c бағаланады. Соңғы көрсеткіш кілемдегі детекторлардың жазықтығында эксперименталды түрде өлшенген зарядталған бөлшектердің тығыздығымен бағаланады. Бағалау мәселесі (х,у) кеңістігіндегі бөлшектердің эксперименталдық үлестірілуін Нисимура-Камата-Грайзен (НКГ) үйлесімдігіне қарасты теориялық функциялар жиынтығын аппроксимациялау арқылы орындалады [10]. Тянь-Шань станциясында жүргізілген эксперимент нәтижелерін осы әдіспен бағалау кезінде жоғары-

да көрсетілген 10^{15} эВ шамасындағы энергетикалық табалдырық ААН өлшемінің минималды мәніне сәйкес келетіні белгілі [11,12]. Осындай деңгейдегі әрбір нөсерде энергиясы 0,1-1.0 ТэВ жоғары және бірнеше километрлік тереңдіктегі жер қыртысына өте алатын мюондар кездеседі. Нөсердің бастапқы энергиясы өскен сайын, оның құрамындағы жоғары энергетикалық мюондардың жалпы саны да энергияға ε_0 пропорционал көбейетіні байқалған [13,14].

Кең алқапты ауқымды атмосфералық нөсерден (ААН) басқа, Тянь-Шань станциясында ғарыш нұрының мюондық құраушысы туралы мағлұматты өндіретін тағы бір мүмкіндік бар. Жоғары энергетикалық мюондардың өткені туралы мағлұмат станцияның жер асты детекторының нейтрондарды көптеп өндіруінен байқалады. Нейтрондық детектор ААН-ді тіркеуге арналған детекторлар кілемінің астындағы жер асты бөлмеде, қалыңдығы 2000 г/см^2 топырақ астында орналасқан [10]. Нейтрондарды детектормен өндіру принципі [15] жұмыста толық қарастырылған. Егер жоғары энергетикалық мюондар ($> 5 \text{ ТэВ}$) детектор арқылы өтетін болса, ондай нейтрондар жер асты детектордың ішкі материалымен әсерлесуі кезінде тікелей ядролық реакциялардың орын алуына байланысты, немесе мюондардың тежелуі нәтижесінде туындайтын қатаң гамма-кванттардың фото-ядролық реакцияларға қатынасуына байланысты өндіріледі. Булану нейтрондары (нейтроны испарения) деген атауға ие болған осы нейтрондар жер асты детекторының құрама бөлігі ретінде саналатын, нейтронға сезімтал газоразрядты санауыштармен тіркеледі. Шектеулі уақыт аралығында санауыштармен өндірілген импульстық сигналдардың жалпы саны өткен мюондардың еселік өлшемі ретінде қарастырылады және қорытқы энергиясының мәніне баламалы шама деп бағаланады. Сол үшін қажетті мөлшердегі импульстар қорын құру периодының ұзақтығы детектордың ішкі көлемінде нейтрондардың өмір сүру мерзімі арқылы табылады. Осы шама Тянь-Шань станциясының жер асты детекторы үшін бірнеше мили-

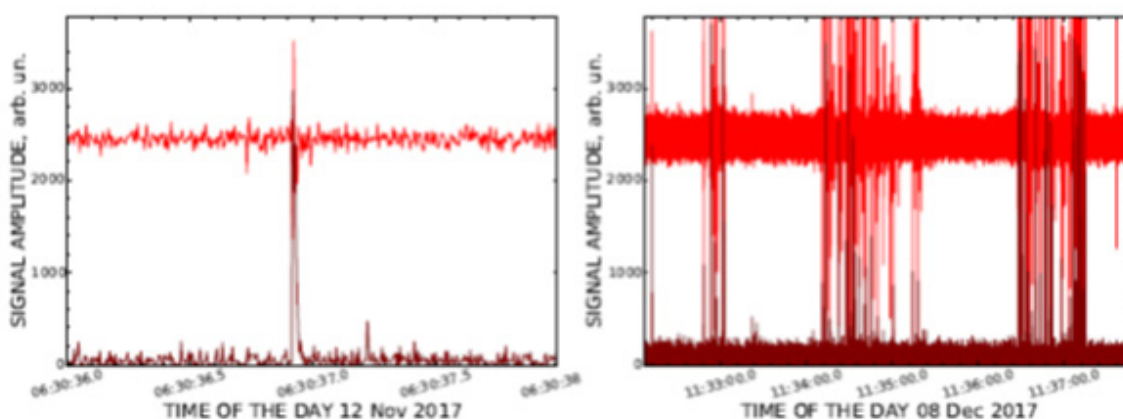
секундты құрайды [10]. Кең ауқымды атмосфералық нөсер секілді, әрбір тіркелген нейтрондық оқиға арнайы мағлұматтар жиынтығында, басқа мәліметтермен салыстыруға қолайлы болу үшін тіркелу мерзімі жоғары дәлдікпен көрсетілген қорда сақталады.

Осы мақсаттағы келесі күрделі де маңызды мәселенің қатарына биік таулы Тянь-Шань ғылыми станциясының акустикалық қондырғысын қолдану арқылы өндірілген мағлұматтар кешенін пайдалану ісін жатқызу қажет. Қондырғының детекторы сезімталдығы ерекше жоғары микрофон блогынан және оның сигналын күшейтуге, түрлендіруге, сақтауға арналған мамандандырылған электроникадан құралады. Акустикалық тербелістің жиілігі 0,5–10 кГц аралығында микрофонның сезімталдығы 20 мВ/Па шамасында сақталады. Микрофон жер бетінен 50 м тереңдікте, 300 метрлік скважинаға орналастырылған. Скважинаның центрі мен ААН детекторлар жүйесі центрінің арақашықтығы 250 м. Тянь-

Шань станциясының акустикалық детекторының құрылысы, жұмысы, қолдану принципі және сигналды өңдеуші электроникалық құрылғы туралы толық мағлұматты [16,17] еңбектерден табуға болады.

Акустикалық оқиғалар және оқиғалар статистикасы

Акустикалық детектордың сигналының өзгерісіне жүргізілген ұзақ мерзімді мониторинг негізгі бірқалыпты орта мәннің төңірегінде аз шамалы кездейсоқ тербелістердің бар екенін көрсетті. Ара - кідік кездесетін қысқа мерзімді қарқынды сигнал осы кездейсоқ сигналдармен қабаттаса келеді. Қарқынды сигналдың ұзақтылығы секундтың ондық бөліктерімен бағаланса, максималды интенсивтілігі дәстүрлі тербелістердің стандарттық ауытқуынан он шақты есе жоғары екендігі анықталды. Сондай сигналдың жиі кездесетін түрі 1-суретте, сол жақтағы графиктен көрінеді.



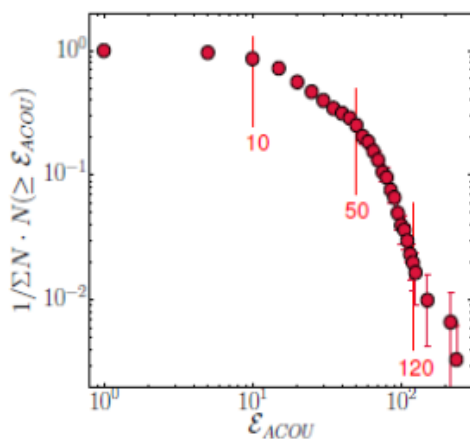
1 сурет – Сол жақта: акустикалық детектордың үздіксіз сигналымен қабаттаса байқалған, ара-кідік кездесетін акустикалық оқиға. Оң жақта: бір күн ішінде сейсмикалық белсенділігі жоғары кеңістікте орын алған акустикалық оқиғалар жиынтығы. Үстіңгі графиктер – тікелей тіркелген микрофондық сигнал, төменгі графиктер – сол сигналдың төменгі жиілікті сыртқы шолушысы

Әдетте, мұндай қарқынды оқиғалардың кездесу аралығында ешбір заңдылық байқалған емес, сондықтан олардың тәулік ішінде кездесу жиілігі жүзден астам процестерді құрауы мүмкін. Сонымен қатар, олардың қарқындылығы мен метеорологиялық құбылыстардың, сыртқы электромагниттік әсерлер мен адами факторлардың арасында да ешқандай байланыстың жоқтығы байқал-

ды. Үздіксіз екі жылдық бақылау барысында тіркелген процестің әрқашанда қысқа мерзім ішінде байқалуын, амплитудасының мейлінше үлкен болуын, уақытқа байланысты сирек кездесуін және сыртқы факторларға тәуелсіздігін ескере отырып, микрофондық сигналдардың осы көріністерін сейсмикалық табиғаты бар акустикалық процестер деп қа-

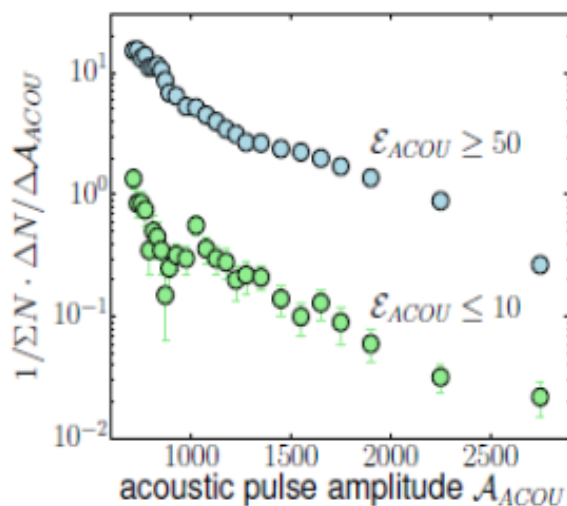
былдауға тура келді. Алдағы уақытта бұл сигналдар акустикалық оқиғалар деп аталды.

Осы оқиғаларды статистикалық және сандық тұрғыдан бағалау үшін арнайы ереже қажет: төменгі жиілікті микрофондық сигналдың сыртқы шолушысы аналогты – цифрлық түрлендіргіштің 12 разрядты кодының минималды мәнінен қысқа мерзім ішінде 700 еседен артық қалыптасса, ондай процестерді акустикалық оқиғалар деп атау келісілді. Дәл сондай талапқа сәйкес келетін процесс 1-суреттегі сол жақтағы графиктен айқын көрінеді. Акустикалық оқиғалардың табиғатын білу үшін олардың кездесу жиілігінің статистикасына талдау жүргізіледі. Осындай оқиғалардың күн сайынғы интегралдық үлестірілуінің сандық сипаты 2-суреттегі графикте келтірілген. Үлестірілудің бұл түрі қуаттың өзгерісін сипаттаушы тәуелділікке ұқсас болғанымен, одан үш түрлі шекаралық мәндер кезінде $\varepsilon_{ACOU} = 10, 50$ және 100 ауытқу арқылы өтеді. Оның себебін акустикалық сигналдардың өндірілу моделіндегі айырмашылықтардан іздеу керек деген болжам бар. Мұндай айырмашылықтың тағы бір көрінісі 1-суреттегі екі графикті салыстырудан байқалады: сол жақтағы график күні бойғы тек бір ғана оқиғамен ($\varepsilon_{ACOU} = 1$) байланысты болса, оң жақтағы график бір күн ішінде қысқа мерзім сайын ε_{ACOU} көрсеткіші жоғары тіркелген импульстар сериясын сипаттайды.



2 сурет – Күнделікті тіркелген оқиғалар санағының интегралдық үлестірілуі ε_{ACOU} . Үлестірілу тіркелген оқиғалардың толық қосындысына ΣN нормалау арқылы берілген

Акустикалық оқиғалардың шыңы деп аталатын максималды мәндерінің екі бірдей үлестірілуінің күнделікті оқиғалардың арасынан төменгі жиілікті арнадан байқалған, төменгі ($\varepsilon_{ACOU} < 10$) және жоғары ($\varepsilon_{ACOU} > 50$) санды оқиғаларға сәйкес келетін жеке-жеке көріністері 3-суретте берілген. (Графиктерде сигналдың амплитудасы акустикалық мағлұматты тіркеу барысында жүргізілетін аналогты-цифрлы құрылғының кодымен көрсетілген). Үлестірілулердің екеуінің де өзгерісі бір-біріне ұқсас, экспонента түрінде өткенімен, қарқындылығының абсолют мәндері бойынша он есе айырмашылығы бар екенін көру қиын емес. Бұл айырмашылықтың себебін тағы да акустикалық оқиғалардың шығу табиғатының өзгешелігінен іздеу керек.



3 сурет – Акустикалық оқиғалар амплитудасының сандық көрсеткіштерінің екі түрлі – төменгі ($\varepsilon_{ACOU} < 10$) және жоғары ($\varepsilon_{ACOU} > 50$) болуына байланысты үлестірілуі. Үлестірулер әрбір топтағы оқиғалардың қосындысына ΣN нормалау арқылы берілген

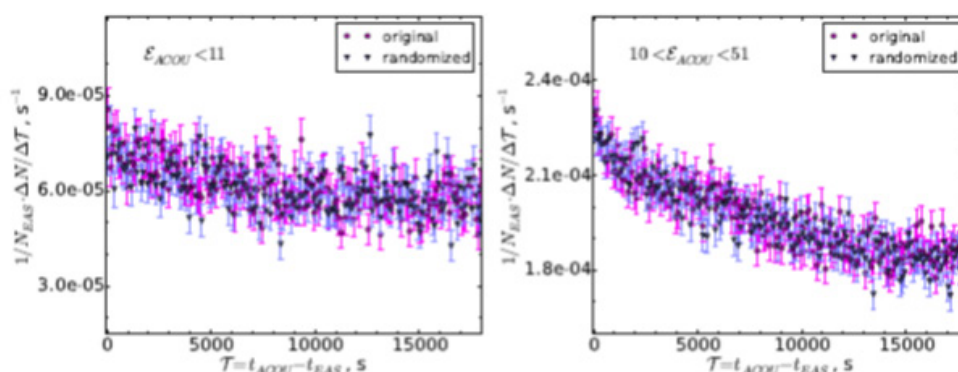
Кең ауқымды атмосфералық нөсер мен акустикалық оқиғалар арасындағы кешігудің үлестірілуі

Акустикалық оқиғалардың сейсмикалық табиғатын және олардың өтімді мюондармен арақатынасы серпімді энергияның бөлінуіне тікелей байланысты екенін ескеру арқылы, мюондардың сейсмикалық белсенді кеңістікпен әсерлесу мерзімі мен акустикалық сигналдың келіп тіркелуі арасында уақыттық корреляция болуы тиіс деп топшы-

лау ешбір логикалық қайшылық туғызбаса керек. Кең ауқымды қуатты атмосфералық нөсердің орталық кеңістігінде жоғары энергетикалық мюондардың, әсіресе энергиясы (0,1-1,0) Тэв жоғары, жер қыртысының бірнеше километрлік тереңдікте жатқан литосферасына дейін өте алатын мюондардың болуы күмәнсыз. Мұндай жағдайда Тянь-Шаньдағы нөсер детекторларының қондырғысында орналасқан ААН триггерінің көмегімен мюондардың өту моменті жоғары дәлдікпен тіркеледі. Сонымен бірге осы қондырғымен өндірілген кез-келген шама, әсіресе, нөсердің негізгі өлшемі ε_0 туралы мағлұмат, алдағы кезеңде жүргізілетін талдау үшін өте маңызды болуы мүмкін. Соңғы талдауды іс жүзінде акустикалық оқиғаның келу уақытымен t_{ACOU} бастапқы энергиясы ε_0 жеткілікті шамадағы оған дейін өткен барлық нөсерлердің тіркелу мерзімдері t_{AAN} арасындағы кешігуді $T = t_{ACOU} - t_{AAN}$ зерттеумен алмастыруға болады. Мұндай зерттеулерді орындау кезінде өзара бір-бірімен себепті-себепсіз байланысы болуы да, болмауы да мүмкін, кездейсоқ өтетін екі түрлі ретсіз құбылыстармен әрекеттесуге тура келеді. Соған байланысты күтіп отырған пайдалы эффектін қапталдаса қатар келетін тәуелсіз оқиғалардың әсерінен тазарту мәселесі туындайды. Сол үшін өндірілген

эксперименталдық мағлұматтарды пайдалану барысында арнайы ережеге сүйенуге тура келеді.

Қабылданған барлық мағлұматтардың ішінде бастапқы энергиясы $\varepsilon_0 > 10^{15}$ эВ жоғары, өстері акустикалық датчик орналасқан скважинадан 150м дейінгі қашықтықтағы ААН сәйкес келетін оқиғалар ғана санаққа алынды. Осындай нөсерлердің интегралды қарқындылығы $\sim (20-30)$ сағ⁻¹ мөлшерінде қалыптасады және олардың әрқайсысының орталық кеңістігінде кем дегенде бірнеше жоғары энергетикалық мюондардың болатыны сөзсіз. Осы шартты басшылыққа алу арқылы литосфералық кеңістікте триггерлік эффект туғыза алмайтын, бірақ кездейсоқ сәйкестік мағлұматтарды көбейту арқылы статистикалық үлестірулерді өзгертуге өзінің үлесін қосатын болғандықтан, төменгі энергетикалық нөсерлерді ескермеудің қажеттігі байқалады. Бұл талаптың орындалуы тіркелетін акустикалық оқиғалардың амплитудасының минималды кодының $A > 700$ жоғары болуын міндеттейді. Сонымен қатар қосалқы шуларды туғызуына байланысты, станцияның территориясында желдің жылдамдығы 11 м/с болған кезеңдер де талдаудан шығарылды. Мұндай шығындардың жалпы үлесі эксперименталдық қондырғының жұмысының 5% құрайды.



4 сурет – Қуатты атмосфералық нөсердің өту мерзімімен одан кейінгі акустикалық оқиғалар арасындағы кешігудің үлестірілуі күнделікті екі түрлі акустикалық сандарға $\varepsilon_{ACOU} < 10$ (сол жақта) және $10 < \varepsilon_{ACOU} < 50$ (оң жақта) байланысты берілген

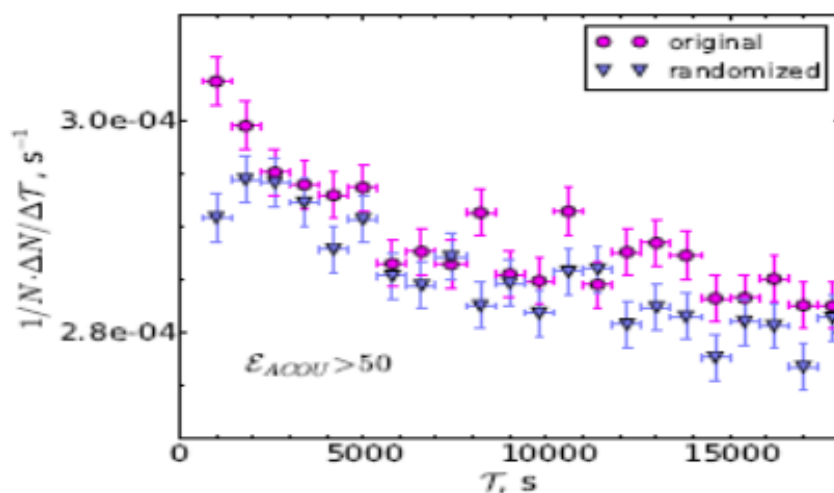
Акустикалық оқиғалар және жер асты детекторының мюондар туралы мағлұматтары

Бастапқыда айтылғандай, Тянь-Шань экспериментінде ғарыш нұрының жоғары энер-

гетикалық мюондарының литосфералық қыртысқа өткені туралы альтернативті мағлұматтар жер асты нейтрондар детекторының қатысуымен өндіріледі. Бұл жерде ғарыш нұрының нейтрондары туралы маркерлік белгі ретінде

детектордың ішкі құрылымында туындайтын «нейтрондық оқиғаның» көрінісі ретінде қолданылатын булану нейтрондарын алуға болады. Нейтрондар оқиғасының маңызды көрсеткіші ретінде детектордың санауышы тіркелген импульстық сигналдардың жалпы санын сипаттаушы еселік коэффициент M қабылданған. Акустикалық мағлұматтар мен нейтрондар арасындағы байланыс корреляциялық талдау кезінде нақты болу үшін нейтрондар оқиғасының еселік коэффициенті кем дегенде $M_{\min} = 10$ немесе одан да жоғары болуы тиіс [15]. Мұндай жағдайда жер қыртысының 5-10 км тереңдігіне өту үшін мюондардың энергиясы 100ТэВ шамасындай болуы тиіс.

Соған сәйкес келетін Тянь-Шань станциясының жер асты детекторымен тіркелетін оқиғалардың жиілігі $(10-15) \text{ сағ}^{-1}$ құрады. Жер асты нейтрондық оқиғаларды мюондардың өтуін анықтаушы маркер ретінде пайдаланудың кең ауқымды атмосфералық нөсер үшін қолдану әдісінен айырмашылығы жоқ: акустикалық оқиғаның әсерінің тіркелу мерзімі мен еселік коэффициенті $M > 10$ артық болатын нейтрондық оқиғалар арасындағы уақыт айырмашылығы $T = t_{M>10} - t_{\text{ACOU}}$ есепке алынады. Осы шаманың мәндері бойынша кешігудің үлестірілуі тұрғызылады. Есептеу процесі осылай келесі шамалар үшін жалғастырыла береді.



5 сурет – Жер асты нейтрондық детектормен тіркелетін, еселік коэффициенті $M > 10$ энергетикалық мюондардың өту мерзімі мен одан кейін туындайтын акустикалық сигналдардың арасындағы кешігудің үлестірілуі

Жер асты нейтрондық оқиғалардың алғашқы және сигналдың тіркелген уақыты мен кешігуі арасындағы үлестірулердің салыстырмалы өзгерістері 5-суретте берілген. Жер асты оқиғалары үшін $M > 10$ сирек кездесетін құбылыс болғандықтан, гистограмманың уақыт өсі бөліктерінің құны 800 секундқа сәйкес келеді. Графикті салу үшін тиісті мағлұматтарды пайдалану кезінде күнделікті қарқындылығы $\epsilon_{\text{ACOU}} > 50$ акустикалық оқиғалар ғана қарастырылды. $T < 800$ сек төменгі кешігулер кезінде эксперименталдық нәтижелер үшін арадағы айырмашылықтың қателігі көбейе түседі. Осы факторлардың барлығы жинала келе, ғарыш нұрының жоғары энергетикалық мюондары мен Жер астында туын-

дайтын қысқа мерзімдік акустикалық эмиссиялар арасында ескерусіз қалдыруға болмайтын, бірақ терең зерделеуді қажет ететін байланыстың бар екендігін білдіреді.

Қорытынды

Зерттеу нәтижелерін қорыта келе төмендегідей топшылауға болады:

- Биік таулы Тянь-Шань станциясында жер асты сейсмикалық белсенді, бүліну мүмкіндігі жоғары кеңістікте пайда болатын акустикалық эмиссияларды пайдаға асырудың алғашқы қадамы жүзеге асырылды.
- Эксперимент барысында белсенділігі әлдеқайда жоғары «акустикалық эмиссиялар» деп аталған қысқа мерзімді қуатты тербеліс-

тердің дәстүрлі, амплитудасы тұрақты және бір текті акустикалық процестердің орташа мәндерімен салыстырғанда ондаған есе айырмашылығы бар екендігі анықталды және олардың әдеттегі ұзақтылығы секундтың ондық бөлігінен де төмен екендігі белгілі болды.

- Акустикалық оқиғалардың сандық көрсеткіші күніне 0-100 оқиғаға дейін болуы ықтимал. Күнделікті оқиғалар саны 50-ден жоғары болатын құбылыстардың статистикалық қасиеттері, одан төмен жағдаймен салыстырғанда мүлдем өзгеше болуы тағы мүмкін.

- Жоғары энергиялы (≥ 100 ТэВ) ғарыш нұрлары мюондарының өту мерзімі мен одан кейінгі кешігу уақыты аралығында (100–1000с) туындайтын акустикалық оқиғалар арасында статистикалық тұрғыдан маңызы жоғары корреляция байқалған. Мұндай корреляция акустикалық оқиғалардың сандық көрсеткіші тек жоғары болған күндері ғана кездесетіні белгілі болды.

Жоғары энергиялы мюондардың жердің терең кеңістігіндегі сейсмикалық құламаға дейін өте алатындығы, оған ілесе акустикалық оқиғалардың туындауы және екі арада уақыт корреляциясының орын алуы ғарыш бөлшектерінің триггерлік әсерімен акустикалық эмиссияны ықпалдандырушы процесс ретінде теориялық болжамның эксперименталдық дәлелі бола алады. Егер осы гипотеза болашақта орындалатын зерттеу нәтижелері арқылы қосымша дәлелденетін болса, байқалған корреляцияларды жүйелі түрде талдау жер қыртысындағы ағымдық құбылыстарды, әсіресе жер сілкінісін болжаудың оперативті зерделеуші басты құралына айналары сөзсіз. Қиыншылығы мен маңыздылығы ажырамас әдіске жататын бұл процестің эксперименталдық базасы ретінде аса бір қолайлы орын – ғарыш сәулелерінің биік таулы Тянь-Шань ғылыми-зерттеу станциясының мүмкіндіктерін пайдаланудың маңызы айрықша.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. O. B. Chavroshkin, A. V. Nikolaev, L. N. Rykunov, and V. V. Tsyplakov. Methods, results and perspectives of the high frequency seismic noise and vibrosignals. In 6th Rep IASPEL Comm. Microseismol. 18 IUGG, Hamburg, Germany, 1983.
2. G. Paparo, G. P. Gregori, R. De Ritis, and A. Taloni. Acoustic emission (AE) as a diagnostic tool in geo-physics. *Ann. Geophys.*, 45(2):401–416, 2002.
3. X. Lei and S. Ma. Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process. *Earthq. Sci.*, 27:627–646, 2014.
4. H. Jaspersen, C. Bolton, P. Johnson, et al. Unsuper-vised classification of acoustic emissions from catalogs and fault time-to-failure prediction. *arXiv:1912.06087 [physics.geo-ph]*, 2019.
5. B. Rouet-Leduc, C. Hulbert, N. Lubbers, et al. Machine learning predicts laboratory earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, 44:9276–9282, 2017.
6. V. A. Tsarev. Geophysical applications of neutrino beams. *Soviet Physics Uspekhi*, 28(10):940, 1985.
7. V. A. Tsarev and V. A. Chechin. Atmospheric muons and high-frequency seismic noise. LPI Preprint No. 179, 1988.
8. G. A. Gusev, V. V. Zhukov, G. I. Merzon, et al. Cosmic rays as a new instrument of seismological studies. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 38(12):374–379, 2011.
9. L. I. Vildanova, G. A. Gusev, V. V. Zhukov, et al. The first results of observations of acoustic signals generated by cosmic ray muons in a seismically stressed medium. *Bull. Lebedev Phys. Inst.*, 40(3):74–79, 2013.
10. A. P. Chubenko, A. L. Shepetov, V. P. Antonova, et al. New complex EAS installation of the Tien Shan mountain cosmic ray station. *Nucl. Instrum. Methods A*, 832:158–178, 2016.

11. V. A. Ryabov, A. M. Almenova, V. P. Antonova, et al. Modern status of the Tien-Shan cosmic ray station. EPJ Web of Conf., 145:12001, 2017.
12. D. S. Adamov, B. N. Afanasjev, V. V. Arabkin, et al. Phenomenological characteristics of EAS with $N_e = 2 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^7$ obtained by the modern Tien-Shan installation “Hadron”. In Proceedings of the 20th ICRC, volume 5, pages 460–463, Moscow, USSR, 1987.
13. T. Antoni, W. D. Apel, A. F. Badea, et al. Muon density measurements with the KASCADE central detector. Astropart. Phys., 16:373–386, 2002.
14. T. Pierog and K. Werner. Muon production in extended air shower simulations. Phys. Rev. Lett., 101:171101, 10 2008.
15. A. Shepetov, A. Chubenko, O. Kryakunova, et al. Under-ground neutron events at Tien Shan. J. Phys.: Conf. Ser., 1181:012017, 2019.
16. A. L. Shepetov, T. Kh. Sadykov, K. M. Mukashev, et al. Seismic signal registration with an acoustic detector at the Tien Shan mountain station. 429(3):47–56, 2018.
17. K. M. Mukashev, T. Kh. Sadykov, V. A. Ryabov, et al. Investigation of acoustic signals correlated with the flow of cosmic ray muons in connection with seismic activity of Northern Tien Shan. Acta Geophys., 67(4):1241–1251, 2019.