

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.54>

Volume 3, Number 331 (2020), 202 – 208

УДК 524.1; 551.521.64

V.P. Antonova, S.V. Kryukov, V.Yu. Lutsenko, A.M. Malimbayev

«Institute of Ionosphere» JSC «NCSRT», Almaty, Kazakhstan.

E-mail: valanta@rambler.ru, cosmoserg@mail.ru, unclegoering@gmail.com,
nanozavr@mail.ru, valanta@rambler.ru

VARIATIONS OF LOW ENERGY NEUTRONS AND EARTH'S SEISMOACTIVITY

Abstract. The results of the study of variations in the intensity of slow neutrons at the high-altitude Tien-Shan cosmic ray station (3340 m above sea level, 20 km from Almaty) are presented. The effect of cosmic and geophysical events on the flux of thermal and epithermal neutrons was successively analyzed. The comparison was made with well-known variations of high-energy neutrons of galactic origin recorded by the 18NM64 monitor. Like the 18NM64 neutron monitor, the installation for detecting thermal and epithermal neutrons is located near the Zailiysky fault of the earth's crust.

It has been established that, in the absence of seismic activity, the variations of thermal neutrons on the earth's surface are of the same nature as the high-energy neutrons recorded by the monitor 18NM64. However, during the activation of seismic activity, the frequent breakdown of the correlation between the intensity of thermal and high-energy neutrons was noted. The cause of this phenomenon is the additional thermal neutron flux of the lithospheric origin, which appears under these conditions. It is shown that the amplitude of the additional thermal neutron flux from the Earth's crust is equal to 5-7% of the background level.

A difference was found also in the spectral composition of variations of slow and high-energy neutrons in the range ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Hz. Variations, due to the gravitational influence of the moon, are present throughout the 12-year period of research of thermal neutrons. The amplitude and its dynamics were determined. The analysis of our catalog of earthquakes in the vicinity of Almaty with an intensity of ≥ 3 points showed that $\sim 65 \div 70\%$ of these events occurred during the full moon or new moon.

Key words: cosmic rays, variations of thermal and of high-energy neutrons, seismic activity, earthquakes.

Introduction. Active study of near-Earth space using data on the registration of the intensity of the neutron component of cosmic rays began in sixties of the last century after the International Geophysical Year, 1957-1958. An international network of ground-based standard neutron monitors was organized mainly on the basis of proportional counters, the gas filling of which includes boron trifluoride enriched with boron isotope ^{10}B . The counting efficiency is determined by the probability of neutron capture by boron nuclei. It is maximum for neutrons of thermal energies. However, low-energy neutrons are more susceptible to the influence of the surrounding geophysical environment. Since neutron monitors were designed to study outer space outside the Earth's atmosphere, the counters are surrounded by polyethylene to reflect thermal and slow down fast neutrons, and lead is used to increase the counting rate due to local neutron generation. The high-mountain Tien-Shan neutron monitor 18NM64 (3340 m above sea level) has been included in the international network since 1973 and registers high-energy neutrons (above 200 MeV) of galactic origin with high statistical accuracy, counting rate $\sim 5 \cdot 10^6$ imp/hour. By now, variations in the intensity of high-energy neutrons and their sources are quite well studied.

Thermal neutron measurements have long been episodic in nature. The interest in measuring thermal neutrons increased after the detection of their bursts in the Pamir and Tien Shan during the extreme gravitational impact on the Earth's crust from the Moon and the Sun (new moon, full moon, solar eclipses) [1-3]. It was supposed that the earth's crust, undergoing mechanical action, displaces the stocks of

radioactive gases of radon isotopes. In the process of radioactive decay, alpha particles are formed that interact with the nuclei of the elements of the earth's crust and air with the formation of neutrons. An experimental confirmation of the existence of variations in the background thermal neutron flux associated with lunar periods was also presented by the authors of [4].

The stationary installation for detecting thermal and epithermal neutrons at the high-altitude Tien-Shan cosmic rays station was created and put into operation in November 2006. Like the 18NM64 neutron monitor, it is located in a seismically active region near a fracture of the earth's crust. Studies of variations in the intensity of thermal neutrons have shown the promise of their use for the diagnosis and prediction of earthquakes in seismically active regions [5].

Experimental complex for detecting thermal and epithermal neutrons

The detector of thermal neutrons (DTN) is composed of two modules. Either module includes six proportional counters filled with the mixture of helium-3 gases and argon. One module (DTN1) is installed in one the building with 18NM64 standard neutron monitor; the second module (DTN2), 10 m from the building in a light plywood container. The modules are fed separately and are independent. The principled difference between thermal neutron detectors and the neutron monitor is the absence of the lead and the absorber, that reflects thermal and slows down fast neutrons. Thermal neutron detection efficiency $\sim 60\%$. The counting speed of the module installed inside the building is $\sim 6.8 \cdot 10^4$ imp / h, and the external $\sim 4.9 \cdot 10^4$ imp / h, the time resolution is 10 seconds.

The effect of atmospheric and interplanetary disturbances on the intensity of thermal neutrons

Placing the thermal neutron detectors beside with the neutron monitor, 18NM64, made it possible to compare changes in the thermal neutron flux with well-studied variations of high-energy neutrons, caused by atmospheric and interplanetary sources. The study showed that regardless of the energy of the recorded neutrons, all detectors react in the same way to changes in atmospheric pressure; an increase in pressure leads to a decrease in the counting rate of both high-energy neutrons and thermal neutrons, figure 1 (left panel). A decrease in pressure leads to the opposite effect in the neutron intensity. High correlation coefficients ($K = 0.97$ for detectors inside the building and $K = 0.84$ for the external module, DTN2) with the neutron monitor, the similarity and amplitude of the response to changes in atmospheric pressure made it possible to draw the conclusion about the atmospheric origin of the recorded neutrons. This conclusion makes it possible to use the barometric formula for the correction of high-energy neutrons also for neutrons of thermal and epithermal energies.

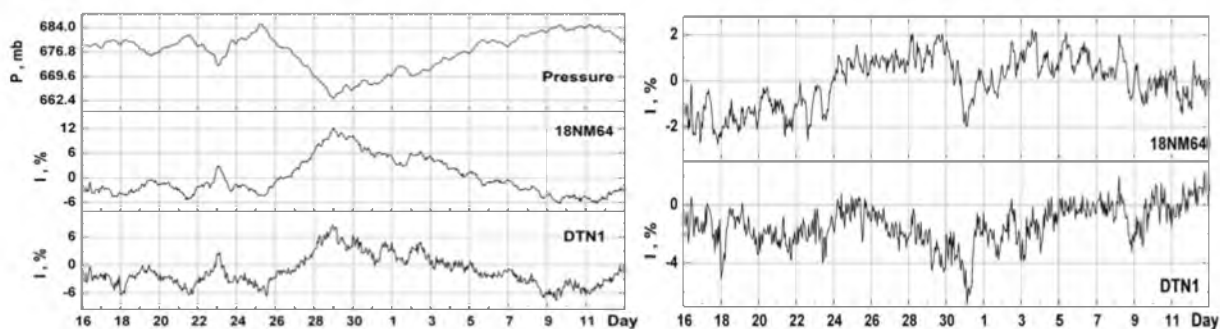


Figure 1 – Values of atmospheric pressure, the intensity of high-energy and the thermal neutrons (left panel - without pressure correction, right panel - with correction), March - April, 2015

Also, regardless of the energy of detected neutrons, all detectors react in the same way to disturbances in the interplanetary space caused by the coronal masses ejection (CME). It is known, that the ejection of solar plasma with the frozen-in magnetic field forms a shock wave in interplanetary space, which acts like a giant piston, "sweeping out" galactic cosmic rays and causing magnetic storms on Earth. Ground neutron monitors at this time register a decrease in the intensity of cosmic rays (Forbush-effect) or changes in intensity caused by a geomagnetic storm, figure 1(right panel).

The effect of activation of seismic processes on the intensity of thermal neutrons

The presented results in the previous section confirm the conclusion about the genetic connection of thermal neutrons with high-energy neutrons of galactic origin in seismically calm conditions [3]. However, during the activation of seismic processes, the synchronism of variations in the intensity of thermal neutrons and high-energy ones is broken, figure 2. The moment of the main shock of the earthquake is marked by the vertical line.

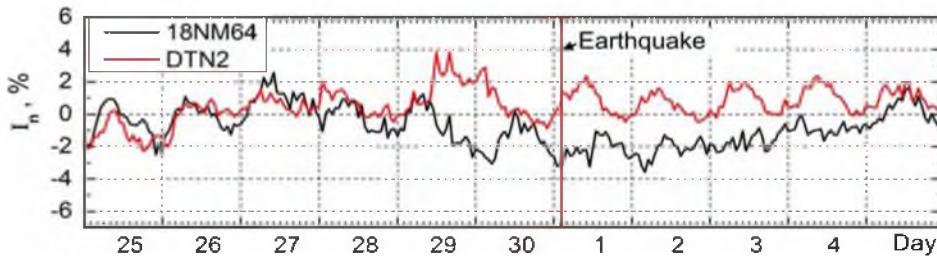


Figure 2 – Variations of thermal and high-energy neutrons, April - May 2011

Almaty is surrounded by a number of potential sources of strong earthquakes, therefore, the diagnosis and forecast of seismic activity will always be relevant for residents of the city and its environs. The study of the measured geophysical parameters was conducted during periods of activation of seismic processes in order to identify earthquake precursors. The catalog of seismic events for analysis included 32 earthquakes perceptible in Almaty with an intensity of ≥ 3 b. When compiling the catalog, the information presented on the website of the Institute of Geophysical Research, National Nuclear Center, IGR NNC RK (<http://www.kndc.kz>) was used.

Variations of atmospheric and interplanetary origin in the intensity of thermal neutrons are excluded by simple mathematical transformations, considering that they are similar to variations of high-energy neutrons. Figure 3 presents the calculation results for three periods accompanied by earthquakes. There are no low-frequency trends or daily variations, but a significant increase in the thermal neutron flux on the eve of the earthquake or immediately after it is obvious. It was found that $\sim 60\%$ of earthquakes in Almaty with the intensity of ≥ 3 b during the period 2007-2018 were accompanied by the increase in the intensity of thermal neutrons, but on the eve of earthquakes of such events $\sim 25-30\%$. It is also obvious that the lithosphere is the source of the additional flux of thermal neutrons during the activation of seismic processes. The amplitude of the additional thermal neutron flux of the lithospheric origin is equal to 5-7% of the background level. Sometimes it reaches values of 10-12%. The conclusion of authors [3, 5] about the possibility of using thermal neutron registration for the diagnosis and prediction of earthquakes is confirmed. However, a necessary condition for this is the synchronous registration of high-energy neutrons.

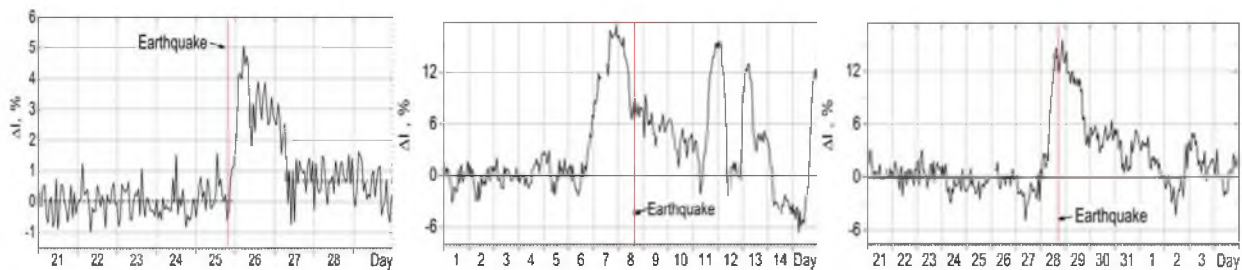


Figure 3 – Variations of thermal neutrons intensity of lithospheric origin during seismic activity 25.12.2006, 08.04.2009 and 28.01.2013

The gravitational effect of the moon on the intensity of thermal neutrons

The identify of periodic variations of thermal neutrons was carried out by spectral analysis using the Blackman-Tukey method in low-frequency ranges ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Hz and ($7 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-5}$) Hz. [6]. It is in these ranges that the spectrum of the most well-known variations of high-energy neutrons of galactic

origin is located: daily, 27-day. The daily variation is well stands out both in the intensity of high-energy neutrons and in the intensity of thermal neutrons. The spectral analysis of periodic variations of thermal and high-energy neutrons showed the difference in the distribution of spectral estimates in the low-frequency range ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Hz. In this range, the 27-day variation is a known spectral component in the intensity of high-energy cosmic rays of galactic origin. However, we did not find this periodicity either in the intensity of high-energy neutrons or in thermal neutrons during the 24th cycle of solar activity, 2009—2018. Its absence is due to the extremely low solar activity of only 24 cycles.

The stable spectral peak is detected in the intensity of thermal neutrons at a frequency corresponding to the period of 29.5 days (synodic, lunar month) throughout the entire 12-year period of research of thermal neutrons, Figure 4. This variation is due to the gravitational influence of the moon on neutrons of lithospheric origin. The difference in the total annual paths of the Moon and the Sun, reduced to the same time, gives the duration of the average synodic revolution of the Moon, or lunar month, of 29.531 days, during which the Moon returns to its previous position relative of the Sun.

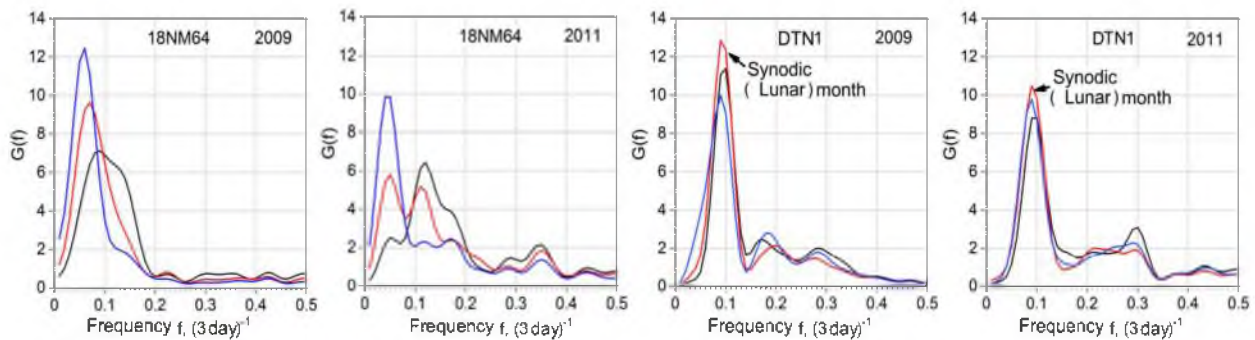


Figure 4 – Power spectra of variations of high-energy (18NM64) and thermal neutrons (DTN) in the range ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Hz

In the intensity of high-energy neutrons, this variation is not detected throughout the study period, which indicates an additional, internal source of thermal neutrons (lithosphere). The stability of the spectral peaks was tested using three low frequency filters of different lengths. In the power spectra of variations of thermal neutrons, the spectral peak corresponding to the synodic month is stable, which confirms its reliability, in contrast to low-frequency peaks in the spectra of variations of high-energy neutrons.

The method of complex signal demodulation was applied to determine the amplitude of the lunar variation with the period of 29.5 days in the intensity of thermal neutrons [7]. It varies within $\pm 0.9\%$ of the average with an apparent semi-annual periodicity during the entire research period. The results of calculations for three years are presented in the figure 5.

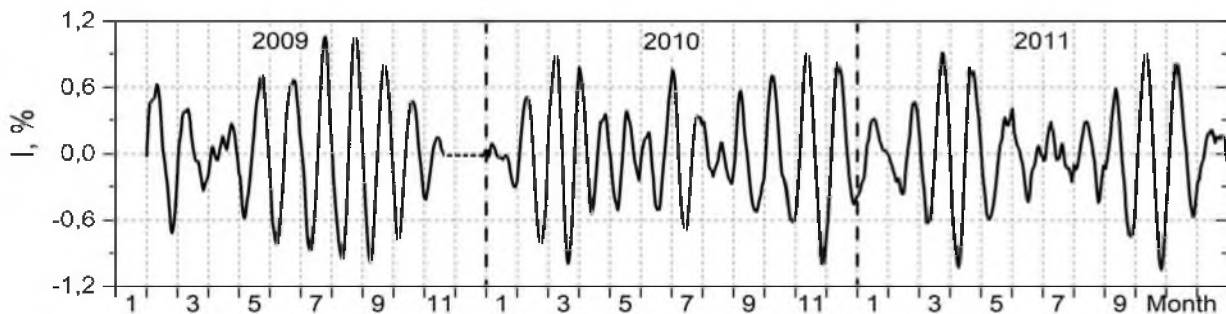


Figure 5 – Temporal scan of the periodicity of 29.5 days of thermal neutrons intensity for 2009-2011

The analysis of our catalog of earthquakes in the vicinity of Almaty with an intensity of ≥ 3 points showed that $\sim 65 \div 70\%$ of these events occurred during the full moon or new moon ($\pm 1 \div 2$ days). The correlation between bursts of thermal neutrons, the phases of the moon and seismic activity was

previously noted by the staff of the Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University in the Pacific seismic ring [8].

Conclusions. The study of variations in the intensity of thermal (epithermal) neutrons at the high-altitude station of the Tien Shan, located near the fault of the earth's crust, showed that this geophysical parameter can be used in predicting earthquakes. However, the necessary condition for this is the synchronous registration of high-energy neutrons to highlight variations of lithospheric origin. It is recommended that the forecasting also take into account the amplification of the gravitational effect of the moon during full moons and new moons.

The work was carried out in accordance with RBP-008 "Development of space technologies for monitoring and forecasting natural resources, technogenic environmental changes, creation of space technology and ground-based space infrastructure, research of long-distance and near-space objects" under the theme «Development of methods for the diagnosis and prediction of geospatial events based on measurements of the parameters of the ionosphere, mesosphere, atmospheric electric field and thermal neutrons» (2018-2020), registration number (RN) 0118PK00798.

В.П. Антонова, С.В. Крюков, В.Ю. Луценко, А.М. Малимбаев

ЕЖШС «Ионосфера институты» «ҰҒЗТО» АҚ, Алматы, Қазақстан

АЗ ЭНЕРГИЯЛЫ НЕЙТРОНДАРДЫҢ ВАРИАЦИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ЖЕРДІҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ БЕЛСЕНДІЛІГІ

Аннотация. 2006 жылы қарашасында биіктіктегі ғарыштық сәулелік станцияда жылу термиялық және эпитеpmиялық нейтрондарды анықтауға арналған стационарлық қондырғы жасалып, пайдалануға берілді. 18NM64 нейтронды монитормы, жоғары энергиялы нейтрондар сияқты, ол Солтүстік Тянь-Шань тауларында (теңіз деңгейінен 3340 м биіктікте, Алматыдан 20 км) Заилийский жарылысының жанында сейсмикалық белсенді жерде орналасқан. Жылу нейтронының детекторлары мен 18NM64 нейтронды монитормының арасындағы негізгі айырмашылық қорғаныс пен сіңіргіш заттың болмауы болып табылады, ол жылуды бейнелейді және галактикалық шығу тегі тез нейтрондарды баяулатады. Термиялық нейтрондардың қарқындылығының өзгеруін зерттеу олардың сейсмикалық белсенді аймақтардағы жер сілкіністерін диагностикалау және болжау үшін пайдаланылатындығын көрсетті. Бұл мақалада ғарыштық және геофизикалық бұзылу көздерінің термиялық және эпитеpmиялық нейтрондар ағынына әсерін дәйекті талдау нәтижелері келтірілген.

18NM64 нейтронды монитормының жанында жылу нейтрондық детекторларын орналастыру жылу нейтрон ағынының өзгеруін атмосфералық және планетааралық көздер әсерінен пайда болған жоғары энергиялы нейтрондардың өзгерулерімен салыстыруға мүмкіндік берді. Зерттеу көрсеткендей, тіркелген нейтрондардың энергиясына қарамастан, барлық детекторлар атмосфералық қысымның өзгеруіне бірдей жауап береді. Сонымен қатар, барлық детекторлар тәждік массаның шығарылуынан (СМЕ) туындаған планетааралық кеңістіктегі бұзылуларға бірдей жауап береді. Жылу нейтронының детекторлық мәліметтерінің нейтронды монитормының деректерімен жоғары корреляция коэффициенттері тіркелген нейтрондардың атмосфералық шығу тегі туралы қорытынды жасауға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері жылу нейтрондарының галактикалық шығу тегі жоғары энергетикалық нейтрондармен сейсмикалық тыныштық жағдайында генетикалық байланысы туралы қорытындыны растады.

Алайда, сейсмикалық процестердің активтенуімен жылу және жоғары энергиялы нейтрондардың қарқындылығындағы вариациялардың синхронизмі бұзылатындығы анықталды. Жылу нейтрондарының интенсивтілігіндегі атмосфералық және планетааралық шығу өзгерістері қарапайым энергетикалық нейтрондардың өзгеруіне ұқсас болғандықтан қарапайым математикалық қайта құрулармен жойылады.

Жер сілкінісінен кейінгі үш кезеңдегі есептеу нәтижелері келтірілген. Төмен жиіліктегі трендтер немесе тәуліктік ауытқулар жоқ, бірақ жер сілкінісі қарсаңында немесе ол пайда болғаннан кейін жылу нейтрондарының ағынының едәуір артуы. 2007-2018 жылдар аралығында Алматыдағы жер сілкінісінің ~ 60% болатындығы $\geq 3b$ белгілі болды, жылу нейтрондарының қарқындылығының артқы деңгейден 5-7% - га артуымен қатар жүрді, және осындай оқиғалардың жер сілкінісі қарсаңында ~ 25-30%. Сондай-ақ, литосфера сейсмикалық процестердің активтенуі кезінде қосымша жылу нейтрондық ағынының көзі болып табылады.

Жылулық нейтрондардың мерзімді өзгерістері төмен жиілік диапазонында ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц және ($7 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-5}$) Гц -де Блэкман-Тукей спектрлік талдауы арқылы анықталды. Жылу және жоғары энергиялы нейтрондардың периодты өзгерулерінің спектрлік анализі спектрлік бағалардың таралуындағы

айырмашылықты көрсетті. ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц. Термиялық нейтрондарды зерттеудің 12 жылдық кезеңі ішінде 29,5 күн (синодтық, айлық) кезеңге сәйкес келетін жиіліктегі жылу нейтрондарының интенсивтілігінің өзгеруінен тұрақты спектрлік шың анықталды. Бұл өзгеріс айдың литосфералық нейтрондарға гравитациялық әсеріне байланысты. Жоғары энергиялы нейтрондардың қарқындылығында бұл өзгеріс бөлінбейді. Кешенді сигналды демодуляция әдісі 29,5 тәулік кезеңі бар айдың өзгеру амплитудасын және оның динамикасын анықтау үшін қолданылды. Алматы маңында орналасқан жер сілкінісі каталогының талдауы ≥ 3 балға дейін, $\sim 65-70\%$ толық ай немесе жаңа ай кезінде болғанын көрсетті.

Сонымен, Тянь-Шань биіктіктегі станциясында жылу және эпитепмалды нейтрондардың қарқындылығындағы вариацияларды зерттеу бұл геофизикалық параметрді жер сілкінісін болжауда қолдануға болатындығын көрсетті. Алайда, литосфералық шығу тегі вариациясын есептеу үшін жоғары энергиялы нейтрондарды синхронды тіркеу бұл үшін қажетті шарт болып табылады. Болжамда сонымен қатар толық ай және жаңа ай кезінде айдың гравитациялық әсерін ескеру ұсынылады.

Түйін сөздер: ғарыштық сәулелер, жылу және жоғары энергетикалық нейтрондардың вариациялары, сейсмикалық белсенділік, жер сілкінісі.

В.П. Антонова, С.В. Крюков, В.Ю. Луценко, А.М. Малимбаев

ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, Казахстан

ВАРИАЦИИ НЕЙТРОНОВ НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ И СЕЙСМОАКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ

Аннотация. Стационарная установка для регистрации тепловых и эпитепловых нейтронов на высокогорной станции космических лучей была создана и введена в эксплуатацию в ноябре 2006 года. Как и нейтронный монитор 18NM64, регистрирующий высокоэнергичные нейтроны, она расположена в сейсмически активном районе вблизи Заилийского разлома земной коры в горах Северного Тянь-Шаня (3340 м над уровнем моря, 20 км от Алматы). Принципиальная разница между детекторами тепловых нейтронов и нейтронным монитором 18NM64 заключается в отсутствии свинца и поглотителя, который отражает тепловые и замедляет быстрые нейтроны галактического происхождения. Исследования вариаций интенсивности тепловых нейтронов показали перспективность их использования для диагностики и прогнозирования землетрясений в сейсмически активных регионах. В данной статье представлены результаты последовательного анализа влияния космических и геофизических источников возмущений на поток тепловых и эпитепловых нейтронов.

Размещение детекторов тепловых нейтронов рядом с нейтронным монитором 18NM64 позволило сравнивать изменения потока тепловых нейтронов с хорошо изученными вариациями нейтронов высокой энергии, вызванными атмосферными и межпланетными источниками. Исследование показало, что независимо от энергии регистрируемых нейтронов все детекторы одинаково реагируют на изменения атмосферного давления. Кроме того, все детекторы одинаково реагируют на возмущения в межпланетном пространстве, вызванные выбросом корональных масс (СМЕ). Высокие коэффициенты корреляции данных детектора тепловых нейтронов с данными нейтронного монитора позволили сделать вывод об атмосферном происхождении зарегистрированных нейтронов. Результаты исследования подтвердили вывод о генетической связи тепловых нейтронов с высокоэнергетическими нейтронами галактического происхождения в сейсмически спокойных условиях.

Однако было обнаружено, что при активизации сейсмических процессов синхронность вариаций интенсивности тепловых и высокоэнергетических нейтронов нарушается. Вариации атмосферного и межпланетного происхождения в интенсивности тепловых нейтронов исключаются простыми математическими преобразованиями, учитывая, что они аналогичны вариациям нейтронов высоких энергий.

Представлены результаты расчета для трех периодов, сопровождаемых землетрясениями. Нет низкочастотных трендов или суточных колебаний, но значительное увеличение потока тепловых нейтронов накануне землетрясения или сразу после него становится очевидным. Выяснилось, что $\sim 60\%$ землетрясений в Алматы с интенсивностью $\geq 3b$ в период 2007-2018 гг. сопровождались увеличением интенсивности тепловых нейтронов на 5-7% от уровня фона, а накануне землетрясений таких событий $\sim 25-30\%$. Также очевидно, что литосфера является источником дополнительного потока тепловых нейтронов при активации сейсмических процессов.

Выявление периодических вариаций тепловых нейтронов проводилось методом спектрального анализа Блэкмана-Тьюки в низкочастотных диапазонах ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц и ($7 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-5}$) Гц. Спектральный анализ периодических вариаций тепловых и высокоэнергетических нейтронов показал различие в распределении спектральных оценок в диапазоне. ($2 \cdot 10^{-7} \div 2 \cdot 10^{-6}$) Гц. Стабильный спектральный пик выявлен в вариациях

интенсивности тепловых нейтронов на частоте, соответствующей периоду 29,5 дня (синодический, лунный месяц) в течение всего 12-летнего периода исследования тепловых нейтронов. Эта вариация обусловлена гравитационным воздействием Луны на нейтроны литосферного происхождения. В интенсивности нейтронов высокой энергии эта вариация не выделяется. Методом комплексной демодуляции сигнала была определена амплитуда лунной вариации с периодом 29,5 суток и ее динамика. Анализ нашего каталога землетрясений в окрестностях Алматы с интенсивностью ≥ 3 балла показал, что $\sim 65 \div 70\%$ этих событий произошло в полнолуние или новолуние.

Таким образом, исследование вариаций интенсивности тепловых и эпитепловых нейтронов на высокогорной станции Тянь-Шаня показало, что этот геофизический параметр может быть использован при прогнозировании землетрясений. Однако необходимым условием для этого является синхронная регистрация нейтронов высоких энергий для выделения вариаций литосферного происхождения. Рекомендуется, чтобы при прогнозировании также учитывался гравитационный эффект Луны во время полнолуния и новолуния.

Ключевые слова: космические лучи, вариации тепловых и высокоэнергетических нейтронов, сейсмическая активность, землетрясения.

Information about authors:

Antonova Valentina Pavlovna, PhD. Phys.-mat. sciences, Head of laboratory, «Institute of Ionosphere» JSC «NCSRT», Almaty, valanta@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1865-4868>;

Kryukov Sergey Viktorovich, Senior researcher, «Institute of Ionosphere» JSC «NCSRT», Almaty, cosmoserg@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1413-7433>;

Lutsenko Vadim Yurievich, PhD student, Head of sector, «Institute of Ionosphere» JSC «NCSRT», Almaty, unlegoering@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0416-6724>;

Malimbayev Andrey Maratovich, PhD student, Leading researcher, «Institute of Ionosphere» JSC «NCSRT», Almaty, nanozavr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3507-913X>

REFERENCES

[1] Volodichev NN, Kuzhevskii BM, Nechaev OYu, Panasiuk MI, Shavrin PI (1977) Origination of neutron intensity bursts during new and full Moon. Space exploration [Kosmicheskie issledovaniya] Vol. 35, №2, P. 144-154 (in Russ.).

[2] Volodichev NN, Zakharov VA, Kuzhevskij BM, Nechaev OYu, Podorolski AN, Chubenko AP, Shepetov AL, Antonova VP (2001) The flows of neutrons of space radiation and from terrestrial crust. Proceedings of 27th ICRC, Hamburg, Germany. P. 4204-4207.

[3] Antonova VP, Volodichev NN, Kryukov SV, Chubenko AP, Shchepetov AL (2009) Results of Detecting Thermal Neutrons at Tien Shan High Altitude Station. Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 49, №6, P. 761-767.

[4] Alekseenko VV, Jappuev DD, Kozyarivsky VA, Kujaev AU, Kuzminov VV, Mikhailova OI, Stenkin YuV (2007) Analysis of variations in the flux of thermal neutrons at an altitude of 1700 m above sea level. News of the RAS, Physical Series [Izvestiya RAN, Seriya Fizicheskaya] Vol. 71, №7, P. 1075-1078 (in Russ.).

[5] Antonova VP, Kryukov SV, Lucenko VYu, Chubenko AP (2016) Effects of earthquakes in variations of thermal neutrons intensity at the high altitude station of Northern Tien-Shan. News of NAS RK. Series of physico-mathematical, Vol. 3, №4 (307), P. 20-26. ISSN 1991-346X

[6] Jenkins G, Watts D (1971) Spectral analysis and its applications. Mir, Moscow, USSR (in Russ.).

[7] Privalinsky VE, Panchenkov VA, Asarina EYu. (1992) Hydrological Time Series Models. Gidrometeoizdat, Russia (in Russ.).

[8] Volodichev NN, Sigaeva EA (2017) Neutrons from the Earth's surface due to lunar and solar tides, and Earth's seismicity. Bulletin of Moscow University. Series 3. PHYSICS. ASTRONOMY [Vestnik MGU Seriya 3. Fizika. Astronomiya] №6, P. 94-98 (in Russ.).