
НАБЛЮДЕНИЕ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ В ПЕРИОДЫ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

OBSERVING THE NEUTRON COMPONENT DURING THUNDERSTORM ACTIVITY AT A MOUNTAIN CR STATION

А.А. Луковникова*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, luk@iszf.irk.ru***В.М. Алешков***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vic@iszf.irk.ru***А.С. Лысак***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, axel@iszf.irk.ru***A.A. Lukovnikova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, luk@iszf.irk.ru***V.M. Aleshkov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vic@iszf.irk.ru***A.S. Lysak***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, axel@iszf.irk.ru*

Аннотация. На станции космических лучей (КЛ) «Иркутск-3000», расположенной на высоте 3000 м над уровнем моря, в течение трех летних месяцев 2015 г. проведены измерения интенсивности нейтронной компоненты КЛ нейтронным супермонитором 6NM64, а также атмосферного электрического поля и уровня электромагнитных помех во время грозových разрядов. Показано, что уровень электромагнитных помех при их регистрации в моменты грозových разрядов в значительной степени зависит от установленного уровня дискриминации сигнала. Влияния грозových разрядов на скорость счета нейтронного супермонитора на станции КЛ «Иркутск-3000» в наблюдаемый период не обнаружено.

Ключевые слова: космические лучи, атмосферное электричество.

Abstract. During three summer months in 2015, the Cosmic Ray (CR) station Irkutsk-3000, located at 3000 m above sea level, measured the CR neutron component intensity with the 6NM64 neutron monitor, as well as the atmospheric electric field strength and the level of electromagnetic interference during lightning discharges. It is shown that the level of electromagnetic interference, when registered during lightning discharges, depends considerably on the fixed level of signal discrimination. During observations, we observed no effects of thunderstorm discharges at the neutron monitor count rate at the CR station Irkutsk-3000.

Keywords: cosmic rays, atmospheric electricity.

ВВЕДЕНИЕ

Первое сообщение о статистически значимом повышении скорости счета в детекторе нейтронов в периоды грозовой активности в ходе трехлетнего эксперимента на высоте 2743 м над уровнем моря было опубликовано в [Shah et al., 1985]. В этом эксперименте нейтроны регистрировались счетчиками, наполненными BF₃, окруженными слоем полиэтилена в качестве замедлителя. Изменения электрического поля, связанного с молниевыми разрядами, регистрировались с помощью линейной антенны. В работе [Enoto et al., 2017] показано, что во время молниевых разрядов тормозное излучение релятивистских электронов может инициировать фото-ядерные реакции, в которых рождаются нейтроны. Возможность генерации нейтронов в результате молниевых разрядов описана также в [Babich et al., 2013]. Авторы связывают усиление потока нейтронов в грозových облаках и во времена гроз с фото-ядерными реакциями за счет тормозного излучения лавин убегающих электронов высоких энергий, способных развиваться в грозовом электрическом поле.

При этом в работе [Бабич и др., 2013] отмечается, что усиление скорости счета детекторов нейтронов в грозовой атмосфере может быть вызвано любым проникающим излучением, генерируемым в атмосфере. В то же время существуют работы, в которых такие нейтроны не были обнаружены [Aleksenko et al., 2015; Махмутов и др., 2017; Чилингарян, 2017].

В последнее время были проведены эксперименты по измерению интенсивности нейтронов в периоды грозовой активности. Такие исследования проводились в 2004–2005 гг. на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции космических лучей (высота над уровнем моря 3340 м) с помощью комплекса устройств «Гроза» [Антонова и др., 2008]. Нейтронная компонента регистрировалась с помощью стандартного нейтронного супермонитора 18NM64 (скорость счета порядка $5 \cdot 10^6$ имп/ч).

В районе Якутска, в долине Туймаада, для изучения кратковременных всплесков нейтронов во время гроз [Стародубцев и др., 2012] использовался синхронизированный комплекс приборов с различным временным разрешением, основным из которых был нейтронный супермонитор 24NM64 (высота над

уровнем моря 105 м). Использовались данные с минутным разрешением, исправленные на давление. Изучение зависимости скорости счета нейтронного супермонитора от напряженности приземного атмосферного электрического поля во время молниевых разрядов показало, что кратковременные всплески нейтронов регистрируются при превышении в среднем пороговой напряженности электрического поля значений $-16 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$, причем с ростом напряженности поля наблюдалось повышение амплитуды всплесков.

В результате эксперимента в долине Туймаада статистически значимые всплески нейтронов были замечены во время 9 мощных гроз из 39 событий.

Результаты, полученные в описанных экспериментах, авторы объясняют порождением дополнительного потока нейтронов молниевыми разрядами.

Авторами работ, которые описывают эксперименты на станциях космических лучей (КЛ), расположенных в зоне вечной мерзлоты и в высокогорье, не обсуждаются механизмы образования нейтронов в грозовых разрядах и их распространение в атмосфере. Вызывает сомнение постулат авторов о возможном многократном увеличении потоков нейтронов в грозовых разрядах и их распространении до точки наблюдения. К примеру, в эксперименте в долине Туймаада расстояние от точки удара молнии в вершину сопки до места регистрации космических лучей составляло около 7 км, т. е. 2–3 пробега нейтронов до взаимодействия. Следует учесть, что нейтронный супермонитор, с помощью которого регистрируется нейтронная компонента космических лучей, имеет очень узкую диаграмму направленности ($\sim \cos^6(\theta)$). Поэтому мы думаем, что нейтроны, образовавшиеся в стороне от точки наблюдения, не могут дать заметного вклада в скорость счета нейтронного монитора.

Нами проведен эксперимент по регистрации интенсивности нейтронной компоненты космических лучей на высоте 3000 м во время грозовой активности.

В данной работе представлены результаты одновременных измерений скорости счета нейтронов нейтронным монитором, напряженности атмосферного электрического поля, а также электромагнитных помех во время грозовых разрядов на высокогорной станции КЛ «Иркутск-3000» (3000 м над уровнем моря).

ДАННЫЕ И АППАРАТУРА

Для анализа использовались одномоментные данные интенсивности космических лучей, исправленные на давление, которые получены с помощью установленного на высоте 3000 м нейтронного супермонитора 6NM64. Скорость счета 6NM64 порядка — $25 \cdot 10^3$ имп/мин, статистическая точность минутных данных — $\sim 0.7\%$, одного счетчика — $\sim 1.4\%$. Для регистрации интенсивности нейтронной компоненты используются регистраторы PCI-1780. Усилитель-дискриминатор состоит из двух узлов: линейного усилителя с токовым входом, работающего в режиме преобразования ток—напряжение, и порогового устройства с различными уровнями дискриминации

(на уровне 0.4–0.5 В). Вход усилителя-дискриминатора подключен к двухметровой нити счетчика. Эта нить играет роль антенны для приема электромагнитного излучения грозы в случае, если корпус счетчика, выполняющего роль экрана (для антенны), плохо заземлен (когда сопротивление заземления станции велико). На станции КЛ используется схема подключения с заземленным катодом (высокое напряжение подается на нить, корпус заземлен) и с переделкой сигнала на усилитель через высоковольтный разделительный конденсатор.

В качестве приемника электромагнитных помех (ЭМП) используется счетчик СНМ-15, из которого удален газ и к которому подведено напряжение питания счетчика. Возможность регистрации электромагнитных помех с помощью «пустого» счетчика впервые была экспериментально опробована в 1980-х гг. на станции КЛ «Иркутск-3000» [Козлов, Янчуковский, 1987; Янчуковский, Козлов, 1988]. Причем сигналы ЭМП с разными уровнями дискриминации (порог дискриминации 1 установлен на уровне 0 В, порог дискриминации 2 — на уровне 0.2 В) подсчитываются в отдельных каналах регистратора. Пороги были выбраны исходя из дискриминационных характеристик счетчика нейтронов [Козлов, Янчуковский, 1987].

Для измерения напряженности электрического поля атмосферы использовался электростатический флюксметр, разработанный и изготовленный в конструкторском бюро экспериментального цеха ИСЗФ СО РАН [Алешков, Молодых, 2012] и имеющий следующие характеристики:

- диапазон измерений от $-30\,000 \text{ В}$ до $+30\,000 \text{ В}$;
- точность $\pm 50 \text{ В}$;
- частота вращения экранирующей пластины 3000 об/мин.

Усилитель был включен в дифференциальном режиме измерений для исключения электромагнитных помех, фазовый детектор был выполнен на оптопаре для определения знака градиента потенциала. Обрабатывались секундные данные.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На рис. 1–4 представлены графики скоростей счета нейтронов (а) и электромагнитных помех (б, в), зарегистрированных при помощи усилителя с различными порогами дискриминации (0.2 В и 0 В), а также графики наблюдения напряженности электрического поля 14, 15, 22, 25 июня 2015 г. (г).

Показано, что уровень электромагнитных помех при их регистрации в моменты грозовых разрядов в значительной мере зависит от установленного уровня дискриминации сигнала. Так, число зарегистрированных электромагнитных помех при уровне дискриминации 0.2 В в 5–10 раз ниже, чем при уровне дискриминации 0 В, причем число зарегистрированных помех при уровне дискриминации 0.2 В во всех приведенных грозовых событиях не превышает статистическую ошибку в определении полезной информации.

При анализе данных скорости счета нейтронного монитора на станции КЛ «Иркутск-3000» при выбран-

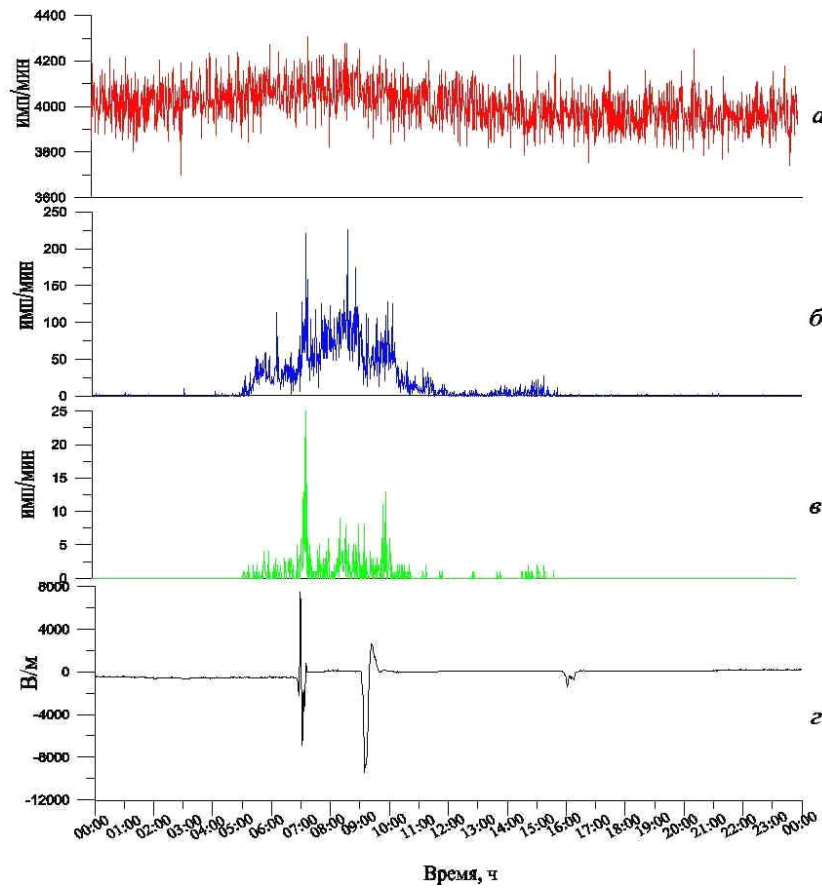


Рис. 1. Скорости счета нейтронов (а) и уровни электромагнитных помех, полученные при регистрации с различными порогами дискриминации усилителей 0.2 В (б) и 0 В (в) соответственно; напряженность электрического поля по данным флюксметра, установленного на станции КЛ «Иркутск-3000» (г) для 14 июня 2015 г.

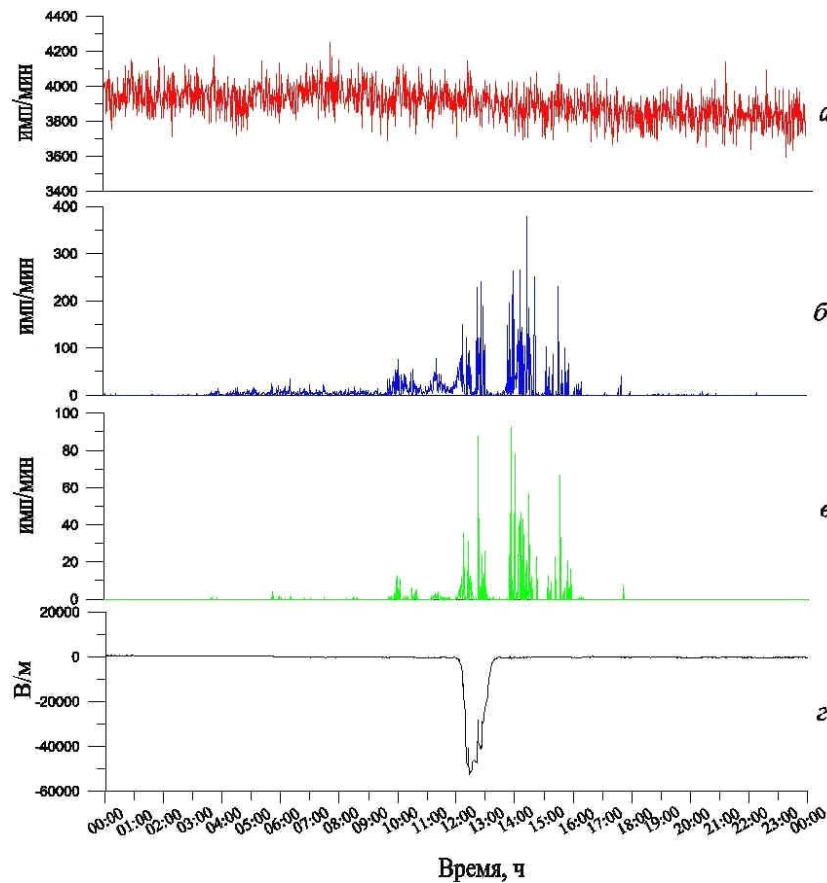


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 15 июня 2015 г.

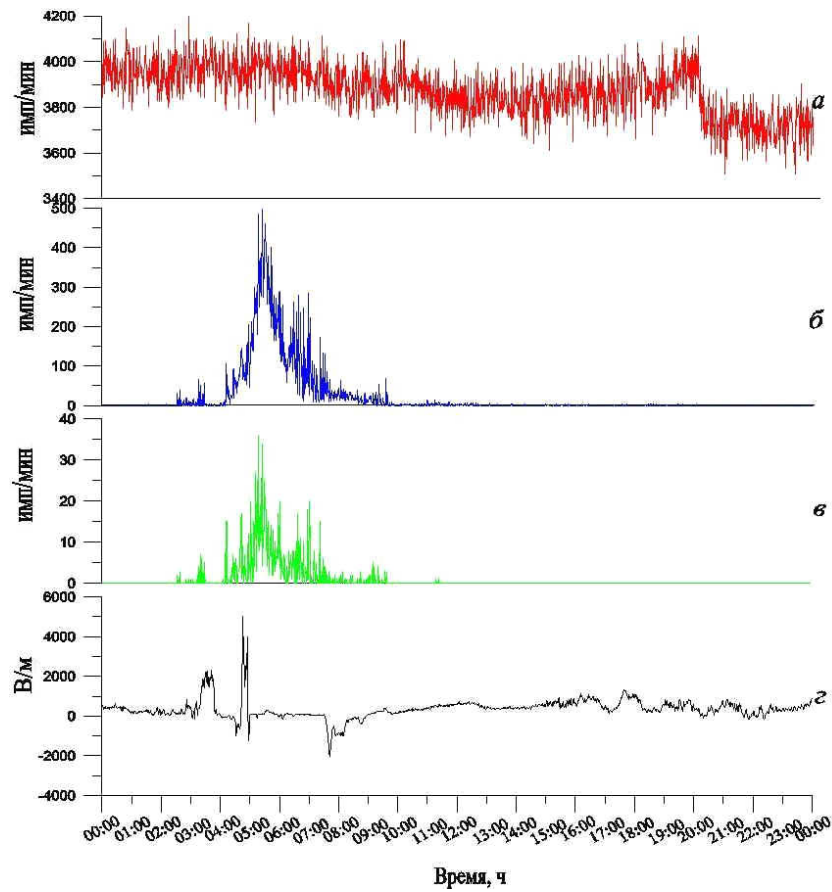


Рис. 3. Скорости счета нейтронов (а) и уровня электромагнитных помех, полученные при регистрации с различными порогами дискриминации усилителей 0.2 В (б) и 0 В (в) соответственно; напряженность электрического поля по данным флюксметра, установленного на станции КЛ «Иркутск-3000» (г) для 22 июня 2015 г.

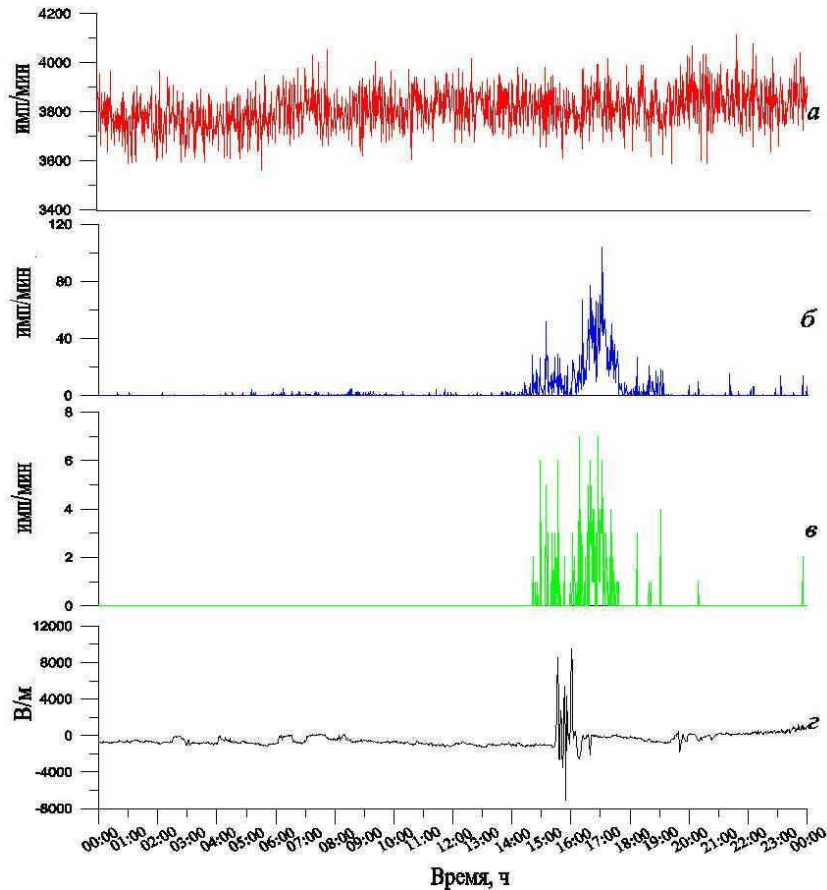


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для 25 июня 2015 г.

ном для постоянных измерений уровне дискриминации 0.4 В в пределах статистической точности увеличения скорости счета в моменты грозовых разрядов не выявлено.

Кратковременные увеличения числа зарегистрированных импульсов при грозовых разрядах [Shah et al., 1985; Антонова и др., 2008; Стародубцев и др., 2012] скорее всего обусловлены вкладом электромагнитных помех в скорость счета нейтронных супермониторов. Для гарантированной защиты от ЭМП требуется повышение помехозащищенности аппаратуры станций КЛ и соблюдение требований к заземлению. В нашем исследовании ЭМП, возникшие во время гроз, не оказали влияния на работу аппаратуры регистрации станции КЛ «Иркутск-3000». Мы отметили, что НМ сделан так, что он не может детектировать нейтроны, образовавшиеся далеко в стороне от места их регистрации, а также частицы, образовавшиеся в окружающих предметах. Кроме того, нам неизвестен механизм, с помощью которого в грозовых электрических полях можно ускорить нуклоны до релятивистских энергий так, чтобы они могли пройти 2–3 пробега до взаимодействия и дать нейтроны, способные дойти до точки их регистрации.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы Фундаментальных научных исследований П.16. Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>] и уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)».

Авторы благодарят в.н.с. ИСЗФ СО РАН Сдобнова В.Е. за полезные консультации и обсуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешков В.М., Молодых С.И. Комплекс приборов для измерения параметров атмосферного электричества // Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. С. 74–76. (Интеграционные проекты, вып. 35).
- Антонова В.А., Гуревич А.В., Зыбин К.П. и др. Влияние атмосферного электрического поля на регистрацию нейтронным монитором космических лучей // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. Алматы, 2008. № 4. С. 11–15.
- Бабич Л.П., Бочков Е.И., Залялов А.Н. и др. Об усилении потока фотоядерных нейтронов в грозовой атмосфере и возможности его регистрации // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97, вып. 6. С. 333–339. DOI: [10.7868/S0370274X13060015](https://doi.org/10.7868/S0370274X13060015).
- Козлов С.А., Янчуковский А.Л. Усилитель-дискриминатор к нейтронному монитору НМ-64 и контроль работы детектора: Препринт СибИЗМИР № 17-87. Иркутск, 1987. 13 с.
- Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Ролан Ж.П. и др. Вариации космических лучей и приземного электрического поля в январе 2016 г. // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 2. С. 262–265. DOI: [10.7868/S0367676517020260](https://doi.org/10.7868/S0367676517020260).
- Стародубцев С.А., Козлов В.И., Торопов А.А. и др. Первые экспериментальные наблюдения всплесков нейтронов под грозовыми облаками вблизи уровня моря // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 96, вып. 3. С. 201–204.
- Чилингарян А. Рождаются ли релятивистские элементарные частицы в молниевых разрядах? // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81, № 2. С. 258–261. DOI: [10.7868/S0367676517020144](https://doi.org/10.7868/S0367676517020144).

Янчуковский А.Л., Козлов С.А. АИИС — новый компонент Саянского спектрографа космических лучей: Препринт СибИЗМИР № 18-88. Иркутск, 1988. 35 с.

Alekseenko V., Arneodo F., Bruno G., et al. Decrease of atmospheric neutron counts observed during thunderstorms // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. 125003. DOI: [10.1103/PhysRevLett.114.125003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.125003).

Babich L.P., Bochkov E., Dwyer J.R., et al. Numerical analysis of 2010 high-mountain (Tien-Shan) experiment on observations of thunderstorm-related low-energy neutron emissions // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2013. V. 118. P. 7905–7912. DOI: [10.1002/2013JA019261](https://doi.org/10.1002/2013JA019261).

Enoto T., Wada Y., Furuta Y., et al. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge // Nature. 2017. V. 551. P. 481–484. DOI: [10.1038/nature24630](https://doi.org/10.1038/nature24630).

Shah G.N., Razdan H., Bhat G.L., Ali G.M. Neutron generation in lightning bolts // Nature. 1985. V. 313. P. 733–755.

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 20 марта 2019 г.).

REFERENCES

- Alekseenko V., Arneodo F., Bruno G., Giovanni A.Di., Fulgione W., Gromushkin D., Shchegolev O., Stenkin Yu., Stepanov V., Sulakov V., Yashin I. Decrease of atmospheric neutron counts observed during thunderstorms. *Phys. Rev. Lett.* 2015, vol. 114, 125003. DOI: [10.1103/PhysRevLett.114.125003](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.125003).
- Aleshkov V.M., Molodykh S.I. Equipment for measuring atmospheric electricity parameters. *Seismoionosfernye i seismoelektromagnitnye protsessy v Baikalskoi riftovoi zone* [Seismoionospheric and Seismoelectromagnetic Processes in the Baikal Rift Zone]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012, pp. 74–76. (In Russian).
- Antonova V.A., Gurevich A.V., Zybin K.P., Karashtin A.N., Kryukov S.V., Ryabov V.A., Ptitsyn M.O., Chubenko A.L., Shlyugaev Yu.V., Shchepotov A.L. Atmospheric electric field effect on cosmic ray registration by neutron monitor. *Izvestiya NAN RK. Seriya fiziko-matematicheskaya* [News of NAS RK. Physico-Mathematical Series]. Almaty, 2008, no. 4, pp. 11–15. (In Russian).
- Babich L.P., Bochkov E.I., Dwyer J.R., Kutsyk I.M., Zalyalov A.A. Numerical analysis of 2010 high-mountain (Tien-Shan) experiment on observations of thunderstorm-related low-energy neutron emissions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, pp. 7905–7912. DOI: [10.1002/2013JA019261](https://doi.org/10.1002/2013JA019261).
- Babich L.P., Bochkov E.I., Zalyalov A.A., Kutsyk I.M. On amplifications of photonuclear neutron flux in thunderstorm atmosphere and possibility of detecting them. *JETP Letters*. 2013, vol. 97, iss. 6, pp. 291–296. DOI: [10.1134/S0021364013060027](https://doi.org/10.1134/S0021364013060027).
- Chilingaryan A. Are relativistic elementary particles born in thunderstorm discharges? *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2017, vol. 81, no. 2, pp. 258–261. DOI: [10.7868/S0367676517020144](https://doi.org/10.7868/S0367676517020144). (In Russian).
- Enoto T., Wada Y., Furuta Y., Nakazawa K., Yuasa T., Okuda K., Makishima K., Sato M., Sato Y., Nakano T., Umemoto D., Tsuchiya H. Photonuclear reactions triggered by lightning discharge. *Nature*. 2017, vol. 551, pp. 481–484. DOI: [10.1038/nature24630](https://doi.org/10.1038/nature24630).
- Kozlov S.A., Yanchukovsky A.L. *Usilitel'-diskriminator k neitronnomu monitoru NM-64 i kontrol' raboty detektora* [Amplifier-Discriminator for the Neutron Monitor NM-64 and Detector Control]: Preprint SibiZMIR no. 17-87. Irkutsk, 1987, 13 p. (In Russian).
- Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., Philippov M.V., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Viktorov S.V., Panov V.M., Raulin J.-P., Tacza J., Marun A., Fernandez G. Variations in cosmic rays and the surface electric field in January 2016. *Bulletin of*

the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017, vol. 81, no. 2, pp. 241–244. DOI: [10.3103/S1062873817020265](https://doi.org/10.3103/S1062873817020265).

Shah G.N., Razdan H., Bhat G.L., Ali G.M. Neutron generation in lightning bolts. *Nature*. 1985, vol. 313, pp. 733–755.

Starodubtsev S.A., Kozlov V.I., Toropov A.A., Mullayarov V.A., Grigor'ev V.G., Moiseev A.V. First experimental observations of neutron bursts under thunderstorm clouds near sea level. *JETP Letters*. 2012, vol. 96, iss. 3, pp. 188–191. DOI: [10.1134/S0021364012150106](https://doi.org/10.1134/S0021364012150106).

Yanchukovsky A.L., Kozlov S.A. *AIIS — novyi komponent Sayanskogo spektrografa kosmicheskikh luchej* [AIIS — a New Component of the Sayan Cosmic Ray Spectrograph]: Preprint SibIZMIR no. I8-88. Irkutsk, 1988, 35 p. (In Russian).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed March 20, 2019).

Как цитировать эту статью:

Луковникова А.А., Алешков В.М., Лысак А.С. Наблюдение нейтронной компоненты в периоды грозовой активности на высокогорной станции космических лучей. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 3. С. 64–69. DOI: [10.12737/szf-53201906](https://doi.org/10.12737/szf-53201906).