

УДК 537.67

ВАРИАЦИИ ЗАРЯЖЕННОЙ И НЕЙТРАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЗОНЕ CASLEO

© 2021 г. А. А. Орлов^{1,2,*}, В. С. Махмутов^{1,2}, М. В. Филиппов¹, Ю. И. Стожков^{1,2}, Ж.-П. Ролан³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Долгопрудный, Россия

³Университет Маккензи, Центр радиоастрономии и астрофизики, Сан-Пауло, Бразилия

*E-mail: orlov.aa@phystech.edu

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Представлены результаты анализа данных наземных измерений заряженной и нейтральной компонент космических лучей и приземного электрического поля в районе астрономического комплекса КАСЛЕО (CASLEO; Эль-Леонсито, Аргентина), полученных в период 2015–2020 гг. Основное внимание уделено измерениям во время проявлений сейсмической активности – землетрясений, произошедших на расстоянии от 5 до 500 км от КАСЛЕО. Предварительный анализ выборки событий позволил установить отдельные свойства этих вариаций.

DOI: 10.31857/S0367676521110272

ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи (КЛ) определяют свойства глобальной электрической цепи и играют существенную роль в атмосферных процессах. Поэтому изучение физической природы вариаций потоков вторичных КЛ на разных временных масштабах (суточных, 27-дневных, сезонных, годовых и т.д.), вызванных солнечной активностью, сейсмической и грозовой активностями и атмосферными процессами является актуальной задачей [1–3]. При этом создание и использование наземных измерительных научных комплексов является необходимым для получения экспериментальной базы данных для таких исследований.

С этой целью в 2015 г. на территории астрономического комплекса КАСЛЕО (CASLEO; Эль-Леонсито, Сан-Хуан, Аргентина), в содружестве с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН, был создан наземный космофизический комплекс, состоящий из детектора КОВЕР (CARPET), трех модулей нейтронного детектора (ND), четырех модулей гамма-спектрометра (GAMMA) и монитора электрического поля (электростатического флюксметра) EFM-100 [3–9].

В статье представлены предварительные результаты анализа совокупности экспериментальных данных, полученных на указанном наземном комплексе во время сейсмоактивных событий, зарегистрированных с середины июня 2015 по на-

чало марта 2020 г. Проведен анализ данных, полученных во время отдельных землетрясений и для совокупной выборки событий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Характеристики сейсмической активности в районе комплекса КАСЛЕО в период середина июня 2015–начало марта 2020 гг. были получены по данным, представленным на электронном ресурсе [10]. За указанный период было зарегистрировано 251 землетрясение. Для каждого события были определены его время, магнитуда, расстояние от эпицентра до КАСЛЕО (с точностью ~10 км) и глубина залегания гипоцентра. На рис. 1 представлены статистические распределения землетрясений по магнитуде, расстоянию от КАСЛЕО до эпицентра и глубине гипоцентра. Из представленных данных следует, что магнитуда большинства землетрясений находится в диапазоне 4–6 баллов, удаление от КАСЛЕО составляет от 10 до 460 км и гипоцентр находится на глубине от 5 до 210 км. Результаты анализа приведенных распределений, в том числе 2-х пиковой структуры распределения величины глубины гипоцентров землетрясений будут представлены в отдельной работе. В целом, события распределены относительно равномерно по месяцам года (в среднем, 3–5 событий в месяц). Исключением является сентябрь

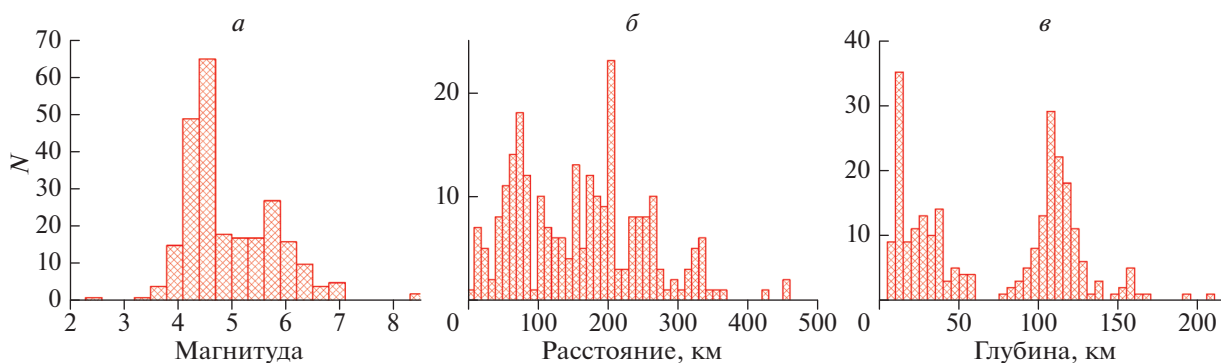


Рис. 1. Статистические распределения характеристик землетрясений, зарегистрированных в районе астрономического комплекса КАСЛЕО (CASLEO) в период с середины июня 2015 г. по начало марта 2020 г.: по величине магнитуды события (панель *a*), расстоянию от КАСЛЕО до эпицентра (*б*) и глубине залегания гипоцентра (*в*).

2015 г., в течение которого произошло 46 землетрясений.

Измерения заряженной и нейтральной компонент КЛ в приземном слое атмосферы проводились с помощью наземного комплекса аппаратуры. Подробное описание перечисленных выше детекторов приведено в работах [3–8]. Приведем их основные характеристики.

Детектор заряженных частиц КОВЕР состоит из 240 газоразрядных цилиндрических счетчиков Гейгера СТС-6, расположенных в 2 слоя по 120 счетчиков, объединенных по логической схеме “ИЛИ”. Слои разделены алюминиевым поглотителем толщиной 7 мм. Данные измерений формируются по трем детектирующим каналам. N_1 (верхний слой счетчиков) и N_2 (нижний слой счетчиков) – интегральный счет (за 0.5 с) заряженных частиц: электронов (позитронов) с энергией $E \geq 200$ кэВ, протонов с $E \geq 5$ МэВ, мюонов с $E \geq 1.5$ МэВ и гамма-квантов с $E \geq 20$ кэВ (эффективность регистрации гамма-квантов меньше 1%). Третий канал – “телескоп” (совпадения импульсов N_1 и N_2), регистрирует электроны и позитроны с энергией $E \geq 5$ МэВ, протоны с $E \geq 30$ МэВ и мюоны с $E \geq 15.5$ МэВ.

Нейтронный детектор состоит из 3-х идентичных модулей, в каждый из которых входят девять ^3He счетчиков СНМ-18, экранированных двумя слоями полиэтилена для понижения энергии быстрых нейтронов до тепловых значений.

Гамма-спектрометр состоит из 4-х детектирующих модулей, в состав которых входят кристалл NaI(Tl) и фотоумножитель R1307 Hamamatsu. АЦП спектрометра обеспечивает 128 уровней квантования сигнала в диапазоне энергии от 40 кэВ до 3 МэВ.

На рис. 2 в качестве примера приведены результаты измерения заряженной и нейтральной компонент КЛ и электрического поля в приземной атмосфере в период с 21 января 2017 г. (14:50 UT) по 22 января 2017 г. (14:50 UT). Верти-

кальная линия соответствует времени землетрясения магнитудой 4.7 балла, произошедшего 22 января 2017 г. в 02:50 UT на удалении 50 км от

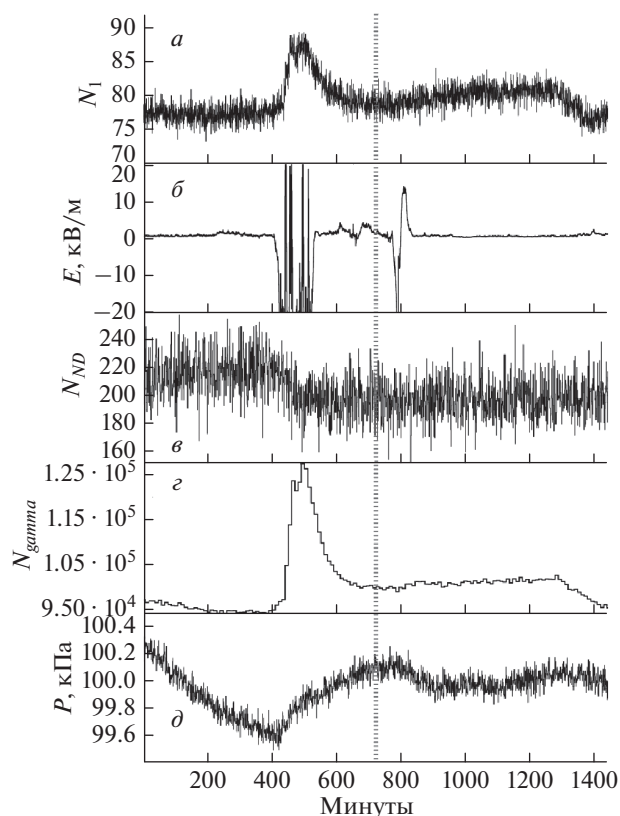


Рис. 2. Данные измерений в период 21 января 2017 г. (время отсчитывается с 14:50 UT) по 22 января 2017 г. (14:50 UT): – 30 секундный темп счета N_1 заряженной компоненты, зарегистрированный детектором КОВЕР (*a*); напряженность приземного электрического поля (30 с данные) (*б*); темп счета в минуту нейтронного детектора (*в*); 10 мин данные гамма спектрометра (N_{gamma}) (*г*) и изменение атмосферного давления (1 мин данные) (*д*). Вертикальная линия соответствует времени регистрации землетрясения 22 января 2017 г. (02:50 UT).

КАСЛЕО. На основе приведенных данных можно отметить следующее: за 5–6 часов до события наблюдалась грозная активность. Во время грозной активности зарегистрированы сильные вариации электрического поля (более 20 кВ/м) в течение 1.5 ч, увеличение темпа счета (до ~14%) малоэнергичной вторичной компоненты КЛ (N_1), повышение счета гамма-спектрометра (N_{gamma}) в каналах 50 кэВ–2 МэВ. Уменьшение темпа счета детектора тепловых нейтронов (N_{ND}), начавшееся около 22:00 UT, связано с дождевыми осадками. Само землетрясение произошло на фоне увеличенного приземного электрического поля (до ~3 кВ/м) в течение одного часа. Также следует отметить, что спустя ~1 ч 20 мин после землетрясения, детектором EFM-100 зарегистрированы повторные вариации электрического поля амплитудой от –20 до 16 кВ/м в течение одного часа.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные предполагают образование протяженной области, в которой наблюдаются вариации напряженности электрического поля на удалении ~50 км от эпицентра землетрясения. Модуль амплитуды этих вариаций превосходит 15 кВ/м. При этом, само землетрясение (в 02:50 UT) наблюдалось в условиях небольшого увеличения электрического поля (до 3 кВ/м). Далее был проведен совместный анализ небольшой произвольной выборки событий, состоящей из 20 землетрясений с магнитудой 3.8–6.4 балла, удаленных от КАСЛЕО на расстоянии 15–90 км. В 15% выбранных событий наблюдались длительные (от 1.5 до 2.5 ч) мощные вариации электрического поля с амплитудой более 20 кВ/м, которые произошли за 4–6 ч до землетрясения. Для исследования вариаций нейтральной и заряженной компоненты КЛ, а также электрического поля в приземной атмосфере в районе КАСЛЕО был использован метод наложенных эпох. Данный метод был применен к указанной выше выборке событий на временном интервале ± 12 ч от начала землетрясения. На основании результатов анализа данных установлено, что события наблюдаются в период уве-

личенного приземного поля (на протяжении 12 ч). При этом нередко сейсмическая активность наблюдается в период повышенной грозной активности в атмосфере. Дополнительно, за 4.5 ч до события наблюдается длительная (в течение 2.5 ч) вариация малоэнергичной заряженной компоненты КЛ и гамма-излучения. Однако при этом отсутствует увеличение темпа счета нейтронной компоненты. В будущем, будет проведен анализ экспериментальных данных, полученных во время зарегистрированных землетрясений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хаердинов Н.С., Лидванский А.С., Хаердинов М.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. № 5. С. 650; Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., Khaerdinov M.N. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 591.
2. Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б., Германенко А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 655; Balabin J.V., Gvozdevsky B.B., Germanenko A.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 596.
3. Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Ролан Ж.П. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 262; Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., Raulin J.-P. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 2. P. 241.
4. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 5. С. 670; Philippov M.V., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. No. 5. P. 611.
5. Филиппов М.В., Стожков Ю.И., Махмутов В.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 753; Philippov M.V., Stozhkov Y.I., Makhmutov V.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. No. 5. P. 696.
6. Philippov M.V., Makhmutov V.S., Stozhkov Yu.I. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. Sect. A. 2020. V. 959. Art. No. 163567.
7. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И. и др. // ПТЭ. 2020. Т. 63. № 3. С. 109; Philippov M.V., Makhmutov V.S., Stozhkov Yu.I. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. No. 3. P. 388.
8. Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И. и др. // ПТЭ. 2020. Т. 63. № 5. С. 96; Philippov M.V., Makhmutov V.S., Stozhkov Yu.I. et al. // Instrum. Exp. Tech. 2020. V. 63. No. 5. P. 716.
9. <https://boltek.com/downloads/efm-100>.
10. <https://earthquaketrack.com>.

Variation of charged and neutral components of cosmic rays in the CASLEO seismic region

A. A. Orlov^{a, b, *}, V. S. Makhmutov^{a, b}, M. V. Philippov^a, Y. I. Stozhkov^{a, b}, J.-P. Raulin^c

^aLebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bMoscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

^cMackenzie University, Center for Radio Astronomy and Astrophysics, Sao-Paulo, Brazil

*e-mail: orlov.aa@phystech.edu

Results of the analysis of data on ground-based measurements of charged and neutral cosmic ray component, surface electric field variation at CASLEO astronomical observatory (El Leoncito, Argentina) during 2015–2020 are presented. We concentrate on the experimental data obtained during seismic activity and earthquakes, recorded at a distance of 5–500 km from CASLEO. Preliminary results on charged and neutral cosmic ray component, surface electric field response at CASLEO to seismic activity are presented.