

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВАРИАЦИЙ ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ВТОРИЧНЫХ КОМПОНЕНТ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЕ

А. А. Орлов¹, В. С. Махмутов¹, М. В. Филиппов¹,
Ю. И. Стожков¹, Ж.-П. Ролан², Е. В. Калинин¹

В работе представлены результаты анализа экспериментальных данных, полученных в период с 1 июня по 31 декабря 2015 г. в районе астрономического комплекса CASLEO (Аргентина), на наземной аппаратуре, разработанной в рамках международного сотрудничества между Физическим институтом им. П. Н. Лебедева, Университетом Маккензи (Бразилия) и астрономическим комплексом CASLEO. Основное внимание в работе уделено исследованию вариаций заряженной и нейтральной компонент космических лучей и приземного электрического поля во время проявления сейсмической активности – землетрясений в районе расположения CASLEO. Также в работе использованы данные о солнечной активности, состоянии межпланетной среды и геомагнитной активности.

Ключевые слова: вариации космических лучей, сейсмическая активность, приземное электрическое поле.

Введение. В рамках международного сотрудничества между Физическим институтом им. П. Н. Лебедева, Университетом Маккензи и астрономическим комплексом Эль-Леонсито – CASLEO (S31.47°, W69.17°, высота над уровнем моря 2500 м, жесткость геомагнитного обреза 9.8 ГВ) в мае 2015 г. завершились работы по созданию первой части наземной экспериментальной аппаратуры [1] для исследований модуляционных

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: mfilippov@frtk.ru.

² Университет Маккензи, Бразилия, г. Сан-Пауло.

процессов в галактических космических лучах, процессов, связанных с солнечной активностью и солнечными вспышками [2], а также явлений, обусловленных вариациями электрического поля в земной атмосфере [3] и проявлениями сейсмической активности [4]. Особенности географического расположения астрономического комплекса CASLEO заключаются в нахождении в зоне Бразильской геомагнитной аномалии и в районе повышенной сейсмической активности. Низкий уровень влажности атмосферы позволяет проводить регулярные наблюдения Солнца с использованием солнечного субмиллиметрового телескопа (SST) на частотах 212 и 405 ГГц [5].

В Тихом океане находится несколько зон разрастания океанической литосферы, главная из которых – Восточно-Тихоокеанская зона, включающая в себя подводные литосферные плиты Кокос и Наска. По периферии океана происходит субдукция этих плит под обрамляющие океан континенты, образуя так называемый Тихоокеанский очаг землетрясений (Ring of Fire).

В данной работе анализируются экспериментальные данные наземной аппаратуры, полученные во время землетрясений в районе Перуанско-Чилийского желоба, расположенного вблизи астрономического комплекса CASLEO.

Состав экспериментального комплекса и данные сейсмической и геомагнитной активностей. Экспериментальный наземный комплекс научной аппаратуры состоит из детектора заряженных частиц CARPET [6, 7], трех модулей Нейтронного детектора (ND или НД) [8], четырех модулей Гамма-спектрометра [9] и Монитора электрического поля EFM-100 (Bolttek, США) [10].

Источником данных по сейсмической активности в период с 1 июня по 31 декабря 2015 г. является официальный сайт геологической службы США [11]. Сформирована база данных землетрясений (включая все афтершоки), произошедших в радиусе 500 км от астрономического комплекса CASLEO, которая включает в себя: дату, время, магнитуду (> 2.5), глубину залегания гипоцентра, расстояние до CASLEO, широту и долготу. Стоит отдельно отметить, что в период с 1 июня по 31 декабря 2015 г. было зафиксировано 1049 таких событий.

Для анализа экспериментальных данных также использованы данные о межпланетной среде и геомагнитной активности: величина напряженности межпланетного магнитного поля B (в спокойном состоянии $B \sim 3.5\text{--}5$ нТл), B_z – компонента межпланетного магнитного поля в направлении к Солнцу (ее величина в спокойном состоянии ~ 1 нТл) и скорость плазмы солнечного ветра (SW Plasma Speed, в спокойном состоянии 300–350 км/с). Для характеристики геомагнитного поля использовались индексы

геомагнитной активности Kp (в спокойном состоянии $Kp \leq 4.0$) и Dst (в спокойном состоянии ~ 0 нТл).

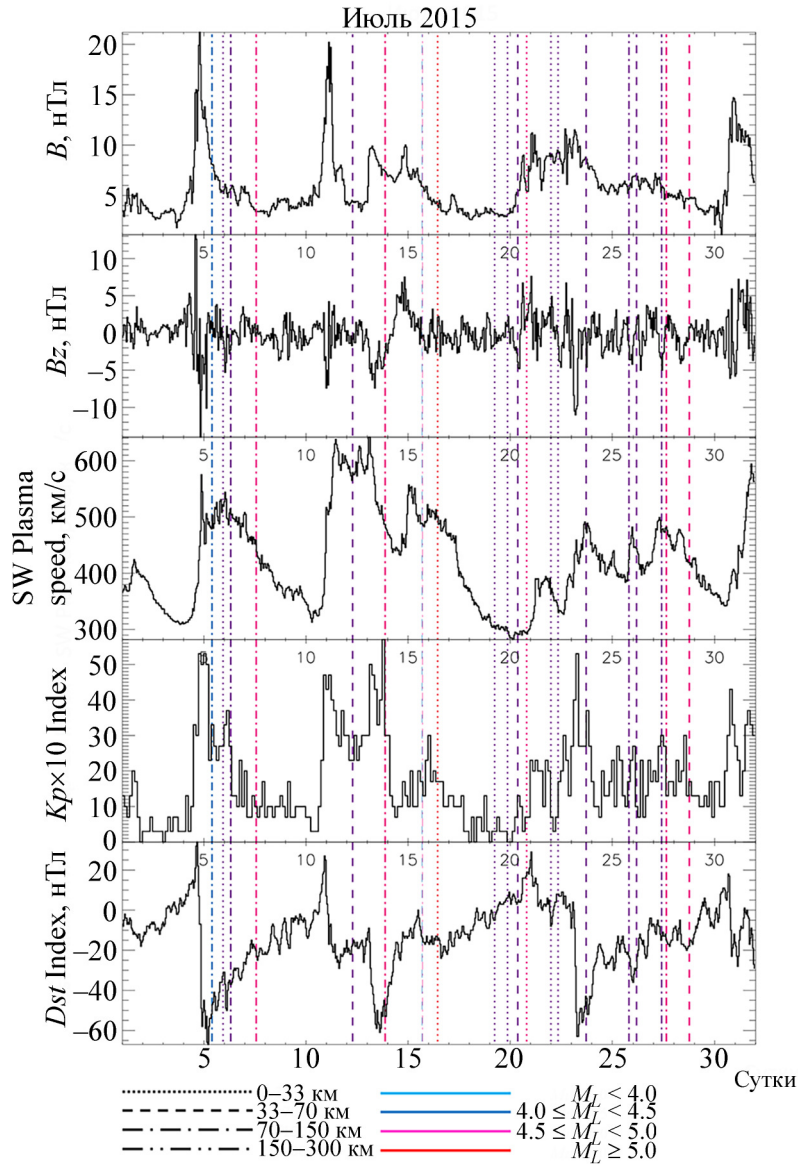


Рис. 1: Данные по межпланетной среде и геомагнитному полю за июль 2015 г. Сверху вниз: напряженность межпланетного магнитного поля B и его B_z -компонента, скорость солнечного ветра SW , геомагнитные индексы Kp и Dst . Вертикальными линиями отмечено время регистрации землетрясений. Тип этих линий указывает на удаление места землетрясения (в км) от CASLEO, а цвет линии обозначает магнитуду события.

Результаты анализа экспериментальных данных. На основании сформированной базы данных был проведен анализ событий, произошедших в районе Перуанско-Чилийского желоба (побережье Чили; S29.5°–S33.5°, W71°–W73°). В период с 1 июня по 31 декабря 2015 г. зафиксировано 1049 событий (включая афтершоки, ~8%). На основании распределений по глубине залегания гипоцентра и по магнитуде получено, что у большинства событий гипоцентр залегает на глубине 0–33 км, а магнитуда (M_L) находится в диапазоне 4.0–5.0.

Следует также отметить, что период с 1 июня по 31 декабря 2015 г. характеризуется возмущенным состоянием геомагнитного поля: в основном землетрясения наблюдались на фоне геомагнитных возмущений. На рис. 1 представлены данные о состоянии межпланетной среды и геомагнитного поля за июль 2015 г. из которых следует, что (1) в данный период наблюдалось прохождение у Земли нескольких межпланетных ударных волн со скоростью 500–650 км/с, (2) величина магнитного поля B достигала величины 20 нТл, а его компонента B_z уменьшалась до уровня -15 нТл, что (3) вызвало возмущенность геомагнитного поля, при котором Dst -индекс достигал -65 нТл, а Kp -индекс величины 5.5. Отметим, что большинство событий произошло в главной фазе геомагнитной бури и на этапе ее восстановления. Кроме того, в некоторых случаях наблюдается усиление магнитуды событий на фазе восстановления геомагнитного поля. Монитор электрического поля EFM-100 зарегистрировал в данный период вариации приземного электрического поля с амплитудой 20 кВ/м.

В сентябре 2015 г. также наблюдалась серия межпланетных ударных волн со скоростью до 650 км/с. При этом магнитное поле B достигало величины 21 нТл, параметр B_z величины -11 нТл, что приводило к возмущенности геомагнитного поля, при которой Dst -индекс достигал -100 нТл, а Kp -индекс 7.0. Данный период интересен тем, что 16 сентября 2015 г. в 22:54 (UTC) произошло мощное землетрясение магнитудой 8.3 и глубиной залегания гипоцентра 22.44 км, вызвавшее серию повторных толчков из 610 событий до 31 сентября 2015 г. Во время этих событий также зарегистрированы значительные вариации электрического поля до -15 кВ/м.

Отдельно рассмотрим событие, происходившее в период с 1 по 5 ноября 2015 г. На рис. 2 представлены данные о состоянии межпланетной среды и геомагнитного поля за данный временной интервал. С 3 ноября наблюдалось прохождение у Земли межпланетной ударной волны со скоростью 600–700 км/с. Величина магнитного поля B достигла при этом величины более 20 нТл, а его компонента B_z достигла величины

7 нТл, что (3) вызвало возмущенность геомагнитного поля, при котором Dst -индекс достигал 30 нТл, а Kp -индекс величины 5.

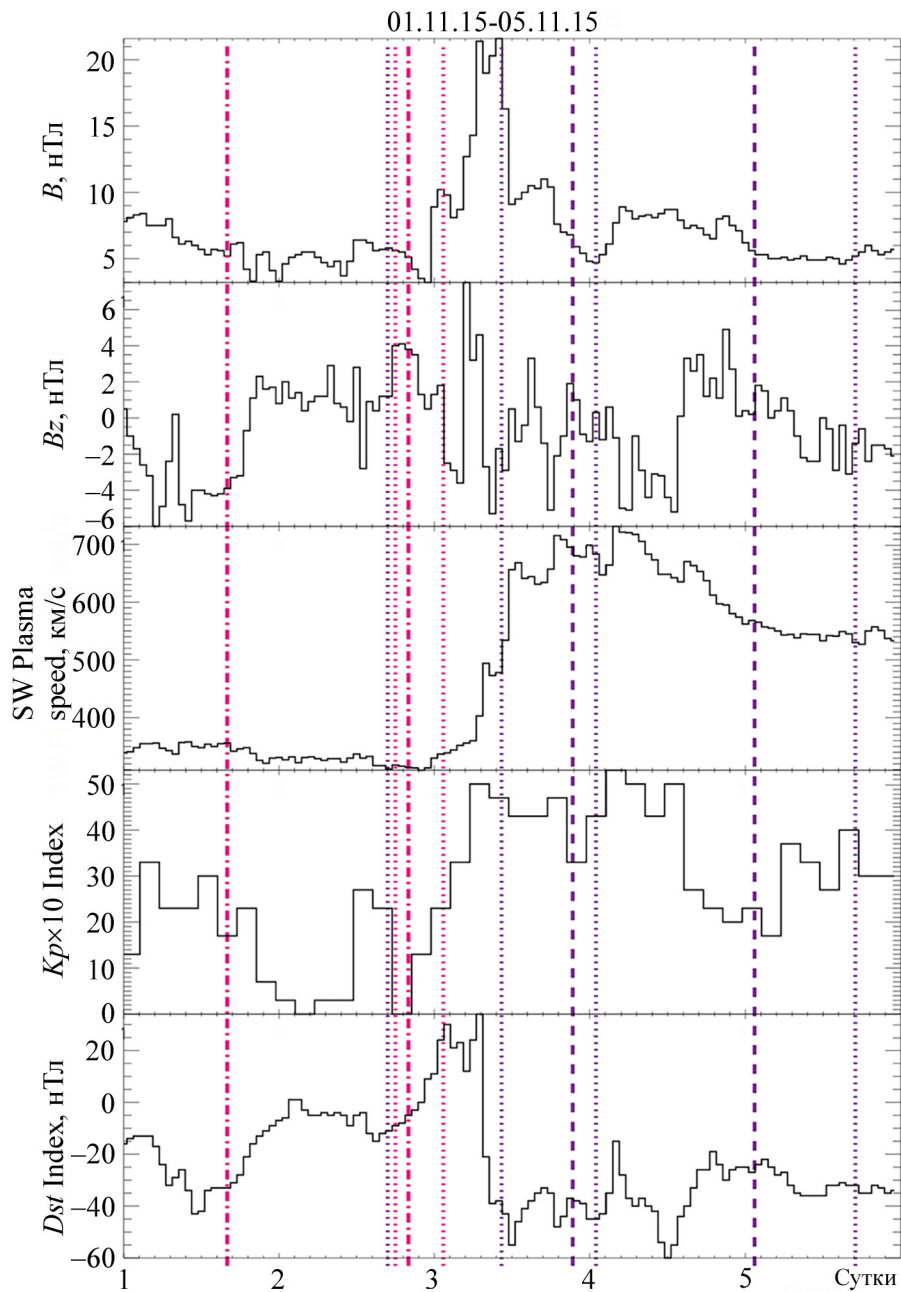


Рис. 2: Данные по межпланетной среде и геомагнитному полю в период с 1 по 5 ноября 2015 г. Вертикальными линиями отмечено время регистрации землетрясений. Тип штриховки и цвета линий аналогичны рис. 1.

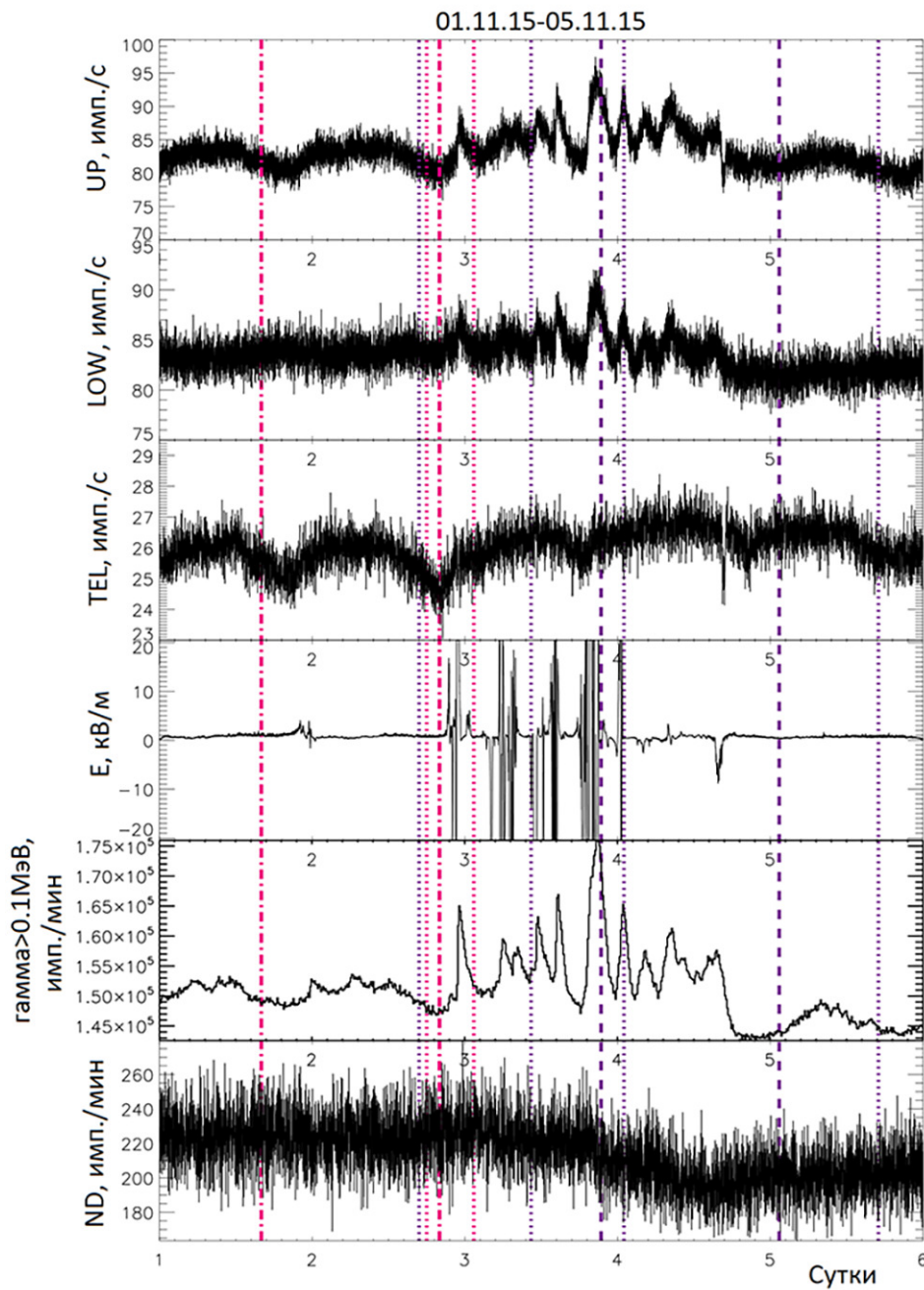


Рис. 3: Данные экспериментального наземного комплекса в период с 1 по 5 ноября 2015 г. Вертикальными линиями отмечено время регистрации землетрясений. Тип штриховки и цвета линий аналогичны рис. 1.

На рис. 3 представлены данные экспериментального наземного комплекса в период с 1 по 5 ноября 2015 г.: детектора заряженных частиц CARPET (темп счета частиц

в каналах UP, LOW и TEL-канале совпадений), Нейтронного детектора (НД), одного модуля Гамма-спектрометра и Монитора электрического поля EFM-100. Во время сейсмической активности наблюдаются сильные и продолжительные вариации электрического поля (до 20 кВ/м), одновременно с которыми наблюдаются значительные вариации фонового счета заряженной компоненты космических лучей (до 16%) и гамма-компоненты космических лучей (до 15% вплоть до энергий квантов ~ 1 МэВ). Вариации на установках Нейтронный детектор в этот период не обнаружено.

Заключение. В работе приведены результаты анализа данных наземного экспериментального комплекса в районе астрономического комплекса CASLEO во время проявления сейсмической активности. Установлено, что большинство землетрясений, больше 70%, происходили во время геомагнитных возмущений, вызванных приходом межпланетных ударных волн. Во время наблюдений серии землетрясений обнаружены вариации электрического поля (до 20 кВ/м) и вариации интенсивности заряженной компоненты космических лучей (до 15%) и гамма-компоненты космических лучей (до 16%). Однако в настоящее время нет четкого разделения вариаций электрического поля, вызванных самими землетрясениями или грозовой активностью в районе CASLEO, но не исключается, что грозовая активность и вариации электрического поля вызваны землетрясениями через связь в глобальной электрической цепи.

В дальнейшем запланирован анализ полученных данных в период до 2022 г. и исследование количественных и возможных причинно-следственных связей между рассмотренными явлениями, в том числе между геомагнитной и сейсмической активностями.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. Н. Квапшин, М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Краткие сообщения по физике ФИАН **49**(1), 16 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622010031.
- [2] Е. А. Тулеков, В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская и др., Геомагнетизм и аэрономия **60**(6), 704 (2020). DOI: 10.31857/S0016794020060139.
- [3] В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, Ж.-П. Ролан и др., Изв. РАН, сер. физ. **81**(2), 262 (2017). DOI: 10.7868/S0367676517020260.
- [4] А. А. Орлов, В. С. Махмутов, М. В. Филиппов и др., Изв. РАН, сер. физ. **85**(11), 1666 (2021). DOI: 10.31857/S0367676521110272.
- [5] P. Kaufmann, C. G. Gimenez de Castro, V. S. Makhmutov, et al., Journal of Geophysical Research **108**(A7), 1280 (2003). DOI: 10.1029/2002JA009729.

- [6] R. R. S. De Mendonca, J.-P. Raulin, E. Echer, et al., J. Geophys. Res.: Space Phys. **118**(4), 1403 (2013). DOI: 10.1029/2012JA018026.
- [7] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков, О. С. Максумов, Приборы и техника эксперимента, № 3, 109 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220030039.
- [8] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, Ю. И. Стожков и др., Приборы и техника эксперимента, № 5, 96 (2020). DOI: 10.31857/S0032816220050298.
- [9] М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, А. Н. Квашнин и др., Приборы и техника эксперимента, № 4, 74 (2021). DOI: 10.31857/S0032816221040030.
- [10] <https://www.boltek.com/downloads/efm-100/>
- [11] <https://www.usgs.gov/>

Поступила в редакцию 20 мая 2022 г.

После доработки 21 июля 2022 г.

Принята к публикации 22 июля 2022 г.