

УДК 537.67

## НЕПРЕРЫВНОЕ СВЕЧЕНИЕ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ГРОЗ И ДИНАМИКА ЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПО ДАННЫМ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

© 2019 г. Н. С. Хаердинов<sup>1, \*</sup>, А. С. Лидванский<sup>1</sup>, М. Н. Хаердинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: khaerdinovns@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

В Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН на установке “Ковер” исследуются новые физические явления, сопутствующие грозам. Разработанные методы позволяют оценивать разность потенциалов в тропосфере по вариациям вторичных частиц космических лучей. В непрерывном режиме ведется наблюдение ночного неба над установкой удаленными цифровыми видеокамерами. Описывается метод. Приводятся экспериментальные свидетельства корреляции свечений с вариациями регистрируемых частиц и глобальными возмущениями геомагнитного поля. Приводятся примеры возможного влияния сейсмической активности на динамику грозы.

DOI: 10.1134/S0367676519050168

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1–3] приводились примеры непрерывного свечения ночного неба над грозовыми облаками, зарегистрированного в результате комплексного исследования геофизических эффектов, сопутствующих медленному электрическому пробою стратосферы, инициированному лавинами убегающих электронов. Условием подробного рассмотрения таких событий являлось наличие возмущений большой амплитуды (~1%) в вариациях мюонов, регистрируемых установкой интегрально по углам. В работах [4, 5] был разработан метод анализа вариаций интенсивности наклонных мюонов на установке “Ковер”, позволяющий корректно оценивать разность потенциалов в тропосфере над ней. Метод также позволяет исследовать вариации поля в грозовых облаках с биполярным распределением заряда в плоскости. Ниже приводится анализ такого грозового события.

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка “Ковер” БНО ИЯИ РАН (43.3° N, 42.7° E) расположена на Северном Кавказе, в низине горного ущелья, на высоте 1.7 км над уровнем моря. В удалении от соседних вершин гор (4 км над уровнем моря) на расстоянии 5 км. На установке ведется непрерывная регистрация вторичных частиц космического излучения, измеряется атмосферное давление, температура, напряженность приземного электрического поля, электрический

ток дождя. Регистрируемые частицы разделяются на мягкую и жесткую компоненты. В результате коррекции экспериментально выделяются вариации двух независимых каналов вторичных частиц космических лучей, зондирующих атмосферу — электрон-фотонная компонента и мюонная. В работе [4] дается описание эксперимента, проводимого на установке “Ковер” БНО ИЯИ РАН по регистрации вариаций интенсивности наклонных мюонов во время гроз. Суть метода состоит в том, что при регистрации установкой, составленной из непрерывного горизонтального слоя сцинтилляционных детекторов (квадрат из 400 детекторов, размер каждого 70 × 70 × 30 см<sup>3</sup>) более наклонные мюоны дают больший сигнал, суммарный по индивидуальным детекторам. Разделяя все зарегистрированные мюоны на три группы по амплитуде энерговыделения, определяем угловые зоны и характерные, соответствующие угловым, радиальные границы “просматриваемой” мюонами области вертикального поля. “Вертикальные” мюоны (30–62 МэВ) ↔ 0°–37°, 0–3.5 км, “промежуточные” мюоны (62–90 МэВ) ↔ 37°–56°, 3.5–12 км, “периферийные” мюоны (более 90 МэВ) ↔ ↔ более 56°, более 12 км. Это позволяет [5], применяя теорию формирования вариаций электрическим полем, проводить оценку биполярного распределения поля в горизонтальной плоскости, определяя разность потенциалов вертикального поля над установкой и на периферии, в удалении более 12 км. Метод оценки поля предполагает стабильную температуру в атмосфере.

Результаты расчета корректны для быстрых вариаций, за время которых изменение температуры пренебрежимо мало. Для непрерывной регистрации оптического свечения два внешних пункта видеорегистрации “просматривают” область неба над установкой с расстояния 0.5 км (пункт Нейтрино, преимущественное направление – на юг) и 75 км (село Хасанья – преимущественное направление на запад). В каждом пункте регистрация проводится двумя камерами в цветном и инфракрасном диапазонах. Описание метода обработки видеоматериала дано в [2]. В представляемой работе используется материал, отснятый в черно-белом разрешении видеокамерами Cs265 в ночном режиме. Для выделения распределения свечения по высоте вся фотография делится на три горизонтальные области: верхняя “ионосфера”, средняя “стратосфера” и нижняя “тропосфера”. Для сравнения с фоном при обработке фотография делится на три равные вертикальные зоны: “левую”, “правую” и “центр”. При количественном анализе определяется средняя яркость пикселей локальных областей на фотографии. Прямой калибровкой искусственным источником света разного цвета была установлена функциональная связь яркости свечения удаленной непрерывной поверхности со средней яркостью пикселей его изображения на фотографии.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены результаты комплексного исследования грозового события, произошедшего в ночь с 24 на 25 июля 2014 г. В работе везде приводится местное время, опережающее мировое на 3 ч. В 21:00 на установке начался отрицательно заряженный дождь на фоне падающих давления и приземной температуры. Электрическое поле не выходило за пределы чувствительности прибора, это указывает на начало развития грозы в стороне от установки. В интегральном потоке мюонов на протяжении всей ночи значительных вариаций не было. До 21:00 на установке шли ремонтные работы, что сказалось на стабильности регистрации (скачок интенсивности регистрации частиц около 21:00). По вариациям интенсивности мюонов получены временные профили разности потенциалов над установкой и на периферии. Сразу после окончания ремонтных работ над установкой регистрируется возмущение положительного поля в тропосфере. На периферии при этом оно не выделяется. Возможно соответствующее возмущение вертикальных мюонов связано с началом активного образования облачности в районе установки, видимого на вечерних фотографиях в более ранние часы. Можно лишь отметить, что последний пик в этом свечении совпадает по времени и по форме с положительным глобальным возмущением в X-компоненте геомагнитного поля с максимальной амплитудой в 22:37. До этого

момента магнитное поле было три часа относительно спокойным. Затем пошла серия возмущений, перешедших в каскад суббурь с началом фазы развития для первой (значительной) в 02:25. На рис. 1 представлена динамика ночной атмосферы и ее электрического состояния во время грозы на фоне развития суббурь в магнитосфере.

Из анализа вариаций мюонов следует, что с 23:30 постепенно в тропосфере стала формироваться отрицательная разность потенциалов. В 00:56 постепенный рост ее амплитуды в области над установкой резко сменился понижением с дальнейшей переполосовкой в 01:25. Такое поведение согласуется с моделью медленного пробоя стратосферы, инициированного лавинами убегающих электронов, в припороговом режиме ускоряющихся в ионосферу отрицательным зарядом верхней части грозового облака. В результате такого пробоя отрицательный облачный заряд уходит в ионосферу, и разность потенциалов в тропосфере должен определять положительный заряд, ранее ниже расположенный. В период смены заряда над установкой (01:03 – 01:22) удаленная камера (Хасанья, 75 км) зарегистрировала свечение, выделяемое на уровне ~10% над фоном. Яркость фона, согласно калибровке камеры,  $E_{\phi} \sim 3 \times 10^{-3}$  кд · м<sup>2</sup>. Отсюда увеличение яркости свечения верхней части неба во время пробоя  $dE \sim 3 \times 10^{-4}$  кд · м<sup>-2</sup>. Свечение в 01:14 достигло максимальной яркости, приобретя локальный характер, угловой размер порядка 20° × 20°. Далее оно затухало. При зрительном анализе по фотографиям видно, что до 01:03 и после 01:21 в месте свечения в области “ионосферы” отчетливо видна звезда. То есть, в начальный первый период свечение прозрачно, в остальное время – непрозрачно. Прозрачность восстановилась по окончании свечения. Параллельно с переполосовкой грозового поля над установкой периферийное отрицательное поле продолжало нарастать. Звезда в небе вновь скрылась в 01:40. С этого момента начался рост яркости свечения по всей ширине фотографии. Наиболее ярко светится “ионосфера”. В период 01:45 – 01:50 на рис. 1 отмечается возмущение положительной разности потенциалов в тропосфере над установкой, на 100 МВ. В момент 01:51:05, по данным ресурса [http:// www.emsc-csem.org/Earthquake](http://www.emsc-csem.org/Earthquake), было зафиксировано в удалении 315 км от установки (43.31° N 46.85° E) землетрясение магнитудой 3.3 балла, на глубине 5 км. В 01:52:14 и 01:53:53 видеокамерами зафиксированы два молниевых разряда над горами. В 01:55 постепенное нарастание отрицательной разности потенциалов на периферии сменилось ее регулярным снижением до момента переполосовки в 03:04. Согласно модели, начался медленный пробой стратосферы в области периферии. В период 02:00 – 02:10 вновь был отмечен скачок положительной разности потенциалов в тропосфере. В 02:09:04 – 02:09:17 и было зарегистрировано сразу два землетрясения. Пер-

вое, относительно близкое, в удалении 1480 км, в Турции ( $36.45^\circ \text{ N } 27.11^\circ \text{ E}$ , глубина 7 км, магнитуда 2.4), другое – в Атлантике ( $28.6^\circ \text{ N } 43.8^\circ \text{ W}$ , глубина 10 км, магнитуда 4.5). Все это время непрерывно нарастала яркость широкомасштабного свечения ночного неба. В момент 02:29 началась фаза развития магнитосферной суббури. Это хорошо определяется на графике вариаций геомагнитного поля (рис. 2) измеренных среднеширотными станциями с разной долготой. Согласно описанию начальной фазы развития магнитосферной суббури [6, стр. 94], если активизация начинается с “разрыва” тока в магнитосферном хвосте, то должен возникать “суббуревой токовый клин”, формирующий в полуночные часы ( $\pm 2$  ч) в ионосфере “электрострую” в западном направлении на высоте 100 км. Обычно она располагается на широте аврорального овала ( $60^\circ$ ) в узком интервале, там, где максимальна активность полярных сияний при суббуре. Магнитное поле Земли при этом возмущается специфическим образом, описанным в [6, стр. 104]. Из графиков видно, что в период 02:10 – 03:40 активизаций было две. По характеру они разные. У первой моменты экстремумов в вариациях Y-компоненты совпадают для всех станций. У второй наблюдается существенная разница, появились пульсации. Заметим, в первом случае (02:29), в момент начала фазы развития суббури, как и в случае с землетрясениями, регистрируется всплеск положительной разности потенциалов в тропосфере над установкой (02:25–02:30), усиливший яркость свечения до максимального значения. А при второй активизации (03:04) произошел импульсный разряд. Длительность скачка потенциала на периферии – 30 секунд. Возможно, и эта вторая активизация сопровождалась скачком положительного поля, который привел к высотному разряду с области отрицательно заряженной периферии. Массовоускоренные убегающие электроны вы-

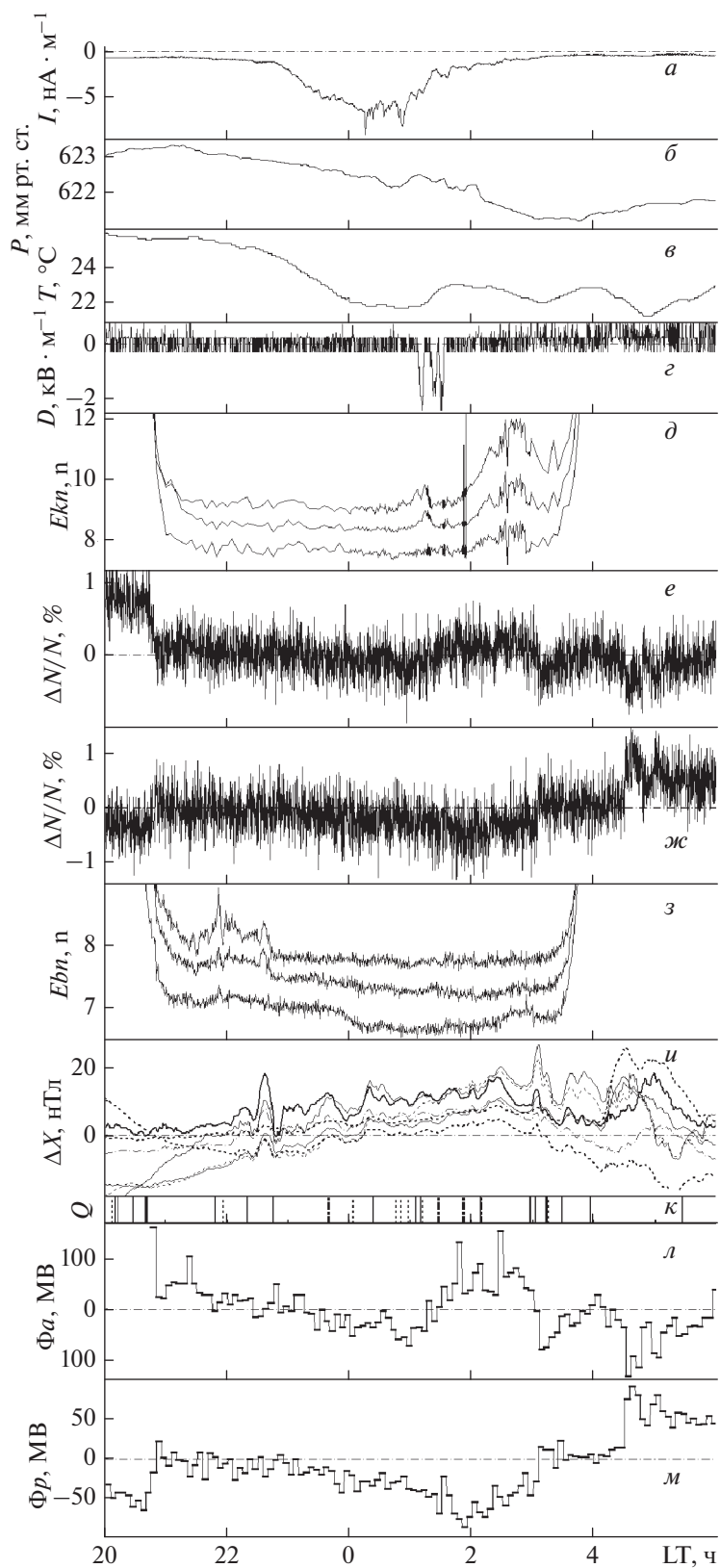
шли в магнитосферу, компенсировав всплеск положительного потенциала, и стали дрейфовать на восток, создавая отрицательное возмущение в X-компоненте поля по мере распространения. Это хорошо заметно на верхней картинке рис. 2. Так, например, локальный минимум в X-компоненте для станции ( $43.2^\circ \text{ N}, 76.9^\circ \text{ E}$ ) Alma-Ata, расположенной на 30 градусов восточнее, наступил в 03:07 – раньше, чем на других станциях. Так, для станции ( $-27.2^\circ \text{ N}, 250.58^\circ \text{ E}$ ) IPM задержка 3 мин. Для нашей широты средняя энергия дрейфующих с такой скоростью частиц – 9 МэВ. В 03:06 скачком падает интенсивность уже “вертикальных” мюонов, что отвечает появлению отрицательного поля над установкой. Поле “периферий” при этом постоянно. Позже свечения прекратились. Этот момент (03:06) совпал со временем локального экстремума Y-компоненты во всей утренней части Земли. Можно заметить, на станции Brandon ( $49.87^\circ \text{ N}, 260.0261^\circ \text{ E}$ ) также начало расти значительное отрицательное возмущение в X-компоненте, прервав затянувшийся рост, не изменив при этом поле в восточном направлении (Y), т.е. это локальный эффект в кольцевом токе, приводящий к стабилизации магнитного поля.

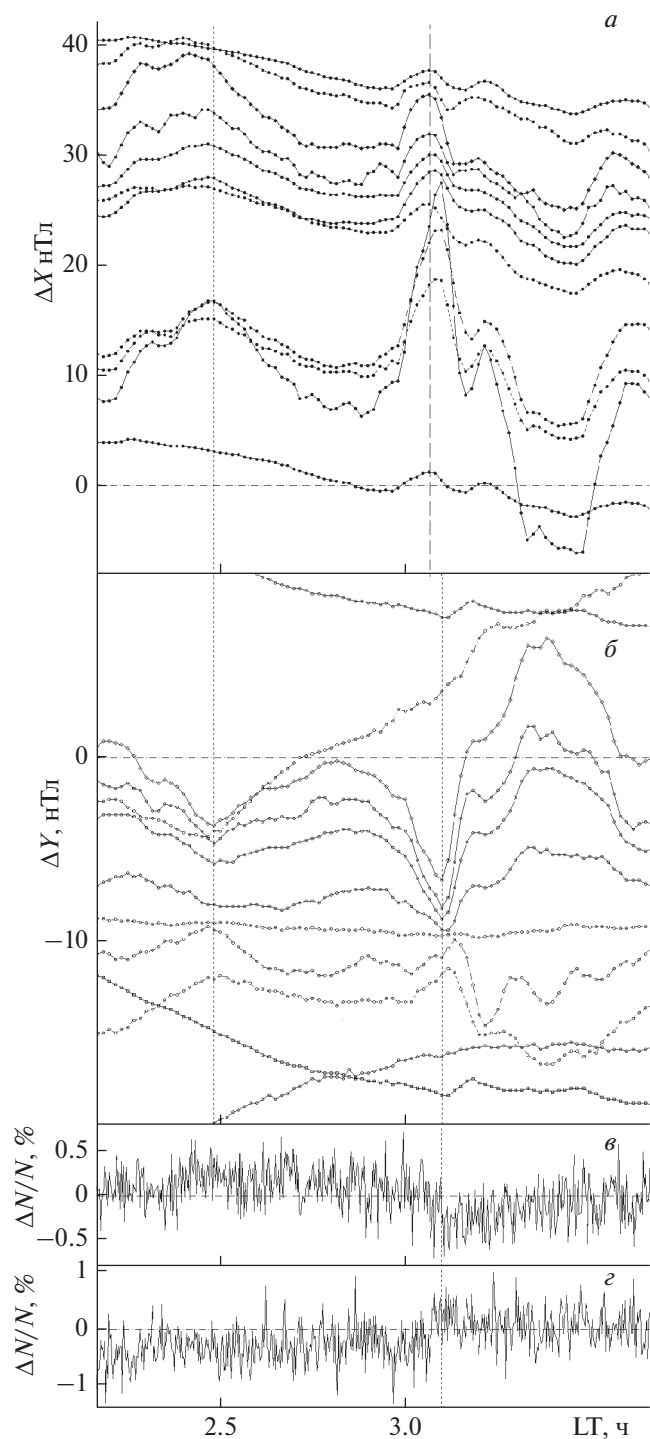
## ВЫВОДЫ

Зарегистрировано непрерывное диффузное свечение ночного неба на фоне звезд над грозowymi облаками, сопровождающее динамичный период смены электрического поля в тропосфере с отрицательного на положительное. Свечение в максимуме – непрозрачное, с амплитудой  $\sim 3 \times 10^{-4}$  кд/м<sup>2</sup>, угловой размер  $20^\circ \times 20^\circ$ , с центром в  $30^\circ$  над горизонтом.

Зарегистрирован факт взаимодействия магнитосферных суббурь с грозовым электричеством на средних широтах. Измерены амплитуды ( $\sim 100$  МВ)

**Рис. 1.** Грозовое событие 24–25.07.2014. Время местное. Где нет специальных указаний – усреднение 10 секунд. *a* – электрический ток дождя; *b* – атмосферное давление; *v* – приземная температура воздуха; *z* – приземная электрическая напряженность; *d* – яркость свечения, удаленная камера (75 км), значения с разной скважностью (экспозиция 0.2 с), верхняя линия – средняя яркость верхней области (“ионосфера”) центральной зоны снимка, средняя линия – яркость средней области (“стратосфера”) центральной зоны снимка, нижняя линия – яркость нижней области (“тропосфера”) центральной зоны снимка (для удобства представления график изображен с вычетом 2), ось ординат – отн. ед.:  $1 \sim 10^{-7}$  лк освещенности объектива камеры; *e* – вариации мюонной интенсивности с энерговыделением в детекторе в области 30–60 МэВ (“вертикальные” мюоны); *жс* – вариации мюонной интенсивности с энерговыделением в детекторе более 90 МэВ (“периферийные” мюоны); *з* – ближняя камера (0.5 км), скважность 30 секунд (экспозиция 0.2 с), верхняя линия – средняя яркость верхней области (“ионосфера”) всего снимка, средняя линия – яркость средней области (“стратосфера”) всего снимка (график изображен с вычетом 0.3), нижняя линия – яркость нижней области (“тропосфера”) всего снимка (график изображен с вычетом 1.3), ось ординат – отн. ед.:  $1 \sim 10^{-7}$  лк освещенности; *и* – вариации X-компоненты индукции геомагнитного поля (направление на север), по данным ряда среднеширотных станций (ресурс <http://www.intermagnet.org>) (усреднение 1 мин), толстая линия – данные станции Borok ( $58.07^\circ \text{ N}, 38.23^\circ \text{ E}$ ); *к* – моменты землетрясений по всей Земле с магнитудой более 1 (ресурс <http://www.emsc-csem.org/Earthquake>) (точность 1 с); *л* – средняя разность потенциалов в тропосфере по внутренней области, над установкой (усреднение 5 мин); *м* – средняя разность потенциалов в тропосфере по внешней, периферийной области (усреднение 5 мин).





всплесков положительного и отрицательного поля в тропосфере Земли в “утренней” зоне, сопутствующих суббуревым активизациям. Всплески формируются одновременно на расстоянии ~10–30 км друг от друга. Длительность переднего фронта положительного всплеска 30 с, отрицательного 2 мин. Оценена характерная энергия ат-

←  
**Рис. 2.** Грозовое событие 24–25.07.2014. Представлены вариации индукции геомагнитного поля, зарегистрированные сетью среднеширотных геофизических станций (ресурс <http://www.intermagnet.org>). Время указано местное. Для наглядного сравнения вариаций графики для каждой компоненты каждой станции, смещены по оси ординат так, чтобы быть на рисунке преимущественно выше тех, которые географически расположены западнее. Верхний и нижний графики на рисунке получены смещением по данным одной и той же станции. Координаты станций (снизу вверх): 1)  $-27.2^\circ$  N,  $250.58^\circ$  E IPM, 2)  $49.87^\circ$  N,  $260.0261^\circ$  E Brandon, 3)  $38.2^\circ$  N,  $282.63^\circ$  E Fredericksburg, 4)  $43.9321^\circ$  N,  $299.9905^\circ$  E Sable Island, 5)  $-22.4^\circ$  N,  $316.35^\circ$  E Vassouras, 6)  $40.957^\circ$  N,  $0.333^\circ$  E Ebro, 7)  $49.08^\circ$  N,  $14.02^\circ$  E Budkov, 8)  $51.84^\circ$  N,  $20.79^\circ$  E Belsk, 9)  $58.07^\circ$  N,  $38.23^\circ$  E Borok, 10)  $43.2^\circ$  N,  $76.9^\circ$  E Alma-Ata, 11)  $-27.2^\circ$  N,  $250.58^\circ$  E IPM. *a* – вариации X-компоненты индукции геомагнитного поля по сети станций (направление на север, усреднение 1 мин); *б* – вариации Y-компоненты геомагнитного поля по сети станций (направление на восток, усреднение 1 мин); *в* – вариации мюонной интенсивности с энерговыделением в детекторе в области 30–60 МэВ (вертикальные мюоны, усреднение 10с); *г* – вариации мюонной интенсивности с энерговыделением в детекторе более 90 МэВ (периферийные мюоны, усреднение 10 с).

мосферных электронов (9 МэВ), ускоренных в результате импульсного высотного разряда при таком взаимодействии.

Зарегистрированы факты всплесков положительного поля в тропосфере (~100 МВ) в период подготовки и развития суббури в утренней зоне Земли, непосредственно предшествующие землетрясениям, расположенным в относительной близости – на расстояниях 300 и 1500 км.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канониди К.Х., Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 733; Kanonidi K.Kh., Lidvansky A.S., Khaerdinov M.N., Khaerdinov N.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 5. P. 679.
2. Канониди К.Х., Куреня А.Н., Лидванский А.С. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 730; Kanonidi K.Kh., Kurenja A.N., Lidvansky A.S. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 5. P. 676.
3. Канониди К.Х., Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 242; Kanonidi K.Kh., Lidvansky A.S., Khaerdinov M.N., Khaerdinov N.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 2. P. 222.
4. Khaerdino M.H., Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S. // Intern. Symposium Thunderstorm Elementary Particle Acceleration (TEPA 2015). (Nor Amberd, 2015). P. 23.
5. Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С., Лидванский А.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 226; Khaerdinov M.N., Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 2. P. 246.
6. Веселовский В.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного пространства // уч. пособие. М.: Университетская книга, 2010. 94 с.