

УДК 53.05

ВЫСЫПАНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В АТМОСФЕРЕ НА СРЕДНЕЙ И ПОЛЯРНЫХ ШИРОТАХ В 2022–2023 ГОДАХ

© 2024 г. В. С. Махмутов^{1,2,*}, Г. А. Базилевская^{1,3}, А. Н. Квашнин¹, М. Б. Крайнев¹,
Н. С. Свиржевский¹, А. К. Свиржевская¹, Ю. И. Стожков¹

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Московская обл., Долгопрудный, Россия

³Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: makhmutov@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 02.03.2024 г.

После доработки 24.04.2024 г.

Принята к публикации 27.05.2024 г.

Исследование высыпаний высокоэнергичных электронов (ВВЭ) из магнитосферы в земную атмосферу является важным для изучения физических механизмов ускорения электронов во время межпланетных возмущений в околоземном пространстве, процессов формирования захваченных потоков электронов в магнитосфере и их последующего высыпания в атмосферу. Кроме этого, выпадающие электроны влияют на функционирование космических аппаратов и нередко приводят к значительному разрушению мезосферного озона. Долгопрудненская научная станция (ДНС) ФИАН с 1957 г. проводит непрерывные измерения потоков космических лучей на высотах 0–30 км в атмосфере полярных широт (Мурманская обл.; Антарктида) и на средней широте (Московская область). За это время зарегистрировано почти 600 случаев ВВЭ, в основном, из внешнего радиационного пояса Земли вблизи его полярной границы (по данным измерений в Мурманской области). Вместе с тем зарегистрировано несколько случаев высыпаний электронов на средней широте (Московская обл.) и на ст. Мирный в Антарктиде, в том числе в 2022–2023 гг. В работе обсуждаются межпланетные и геомагнитные условия во время этих событий. Анализ данных измерений в стратосфере позволил установить спектры поглощения вторичных тормозных фотонов и на их основе, с использованием разработанного авторами метода, определить первичные энергетические спектры выпадающих магнитосферных электронов.

DOI: 10.31857/S0023420624060034, EDN: IGJMVH

1. ВВЕДЕНИЕ

В магнитосфере Земли есть два радиационных пояса — внешний на $\sim 3\text{--}6 R_E$ и внутренний на $\sim 2\text{--}3 R_E$. Внешний пояс состоит из электронов с энергиями от надтепловых (< 10 кэВ) до десятков мегаэлектронвольт и очень динамичен (например, [1]). Он реагирует на возмущения солнечного ветра и может заполняться электронами или освобождаться от них за время порядка одного или нескольких дней [2]. В периоды отрицательной B_z -компоненты межпланетного магнитного поля магнитосфера получает

дополнительную энергию от солнечного ветра, что приводит к генерации различных волн и ускорению электронов за счет взаимодействия волн с частицами и за счет бетатронного ускорения в изменяющемся магнитном поле. Электроны, движущиеся с сохранением адиабатических инвариантов, оказываются запертыми в геомагнитном поле. Возмущения не только ускоряют частицы, но и нарушают адиабатичность движения частиц. Это приводит к высыпанию электронов в атмосферу или уходу электронов из магнитосферы в космическое пространство (shadowing).

Процессы во внутренней области магнитосферы, состоящей из холодной и плотной плазмы (плазмосферы), приводят к генерации волн, называемых плазмосферным шипением, которые особенно интенсивны вблизи границы плазмосферы (плазмопаузы). Здесь рассеяние электронов доминирует над радиальной диффузией внутрь, что приводит к созданию «непроницаемого барьера» для электронов [3, 4]. Внутренний край внешнего радиационного пояса в основном соответствует месту расположения плазмопаузы. Зазор между поясами обусловлен рассеянием электронов на волнах [5] и постоянными, но слабыми высыпаниями электронов в атмосферу. Высказывались предположения об искусственном происхождении зазора, вызванного высыпаниями, инициируемыми излучением очень низких частот от искусственных передатчиков, относящихся к области эффективного взаимодействия с электронами [6]. Однако авторы исследования [3] настаивали на главной роли естественных процессов. В настоящее время общепризнано, что образованию зазора способствуют как природные, так и человеческие факторы [7].

Экспериментальные измерения высыпаний электронов в области зазора не столь многочисленны, как наблюдения в полярных областях, но в последнее время они привлекают все большее внимание (например, [8–13]). В работе [13] предложено учитывать наблюдения в районе зазора при моделировании влияния высыпаний на процессы в атмосфере.

Долгопрудненская научная станция (ДНС) ФИАН с 1957 г. проводит непрерывные измерения потоков космических лучей на высотах 0–30 км в атмосфере полярных широт (Мурманская обл. и Антарктида) и на средней широте (Долгопрудный, Московская обл.) [14]. Многолетний однородный ряд данных о потоках космических лучей (КЛ) в атмосфере используется для исследования модуляционных процессов КЛ в гелиосфере, ускорения и распространения солнечных КЛ, а также для изучения высыпаний высокоэнергичных электронов (ВВЭ) из магнитосферы. Запуск радиозондов постоянно осуществляется на ст. Апатиты (Мурманская обл.; 67°34'03" с.ш. 33°23'36" в.д.), которая находится вблизи полярной границы внешнего радиационного пояса Земли (параметр Мак-Иллвайна $L \sim 5.6$), на ст. Долгопрудный (Москва; 55°45'7.9", 37°36'56.2"), которая расположена между внешним и внутренним радиационными поясами (область зазора; $L \sim 2.4$),

и на ст. Мирный (Антарктида; 66°33'20" ю.ш. 93°00'11" в.д.) расположенной в области южной полярной шапки с открытыми силовыми линиями геомагнитного поля ($L > 10$). Анализ случаев высыпаний электронов из магнитосферы в земную атмосферу необходим для изучения физических механизмов ускорения электронов во время межпланетных возмущений в околоземном пространстве, процессов формирования захваченных потоков электронов в магнитосфере и их последующего высыпания в атмосферу. Кроме этого, потоки высыпающихся электронов влияют на функционирование космических аппаратов и нередко приводят к значительному разрушению мезосферного озона и пр. [15, 16].

2. НАБЛЮДЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Измерения космических лучей в атмосфере [14] проводятся с помощью радиозонда, поднимаемого в атмосферу на метеорологических баллонах до высоты 25–30 км. Стандартный радиозонд для измерения космических лучей состоит из двух счетчиков Гейгера, расположенных в виде телескопа, разделенных алюминиевым поглотителем (фильтром) толщиной 7 мм (2 г·см^{-2}). Одиночный счетчик регистрирует электроны ($E > 200 \text{ кэВ}$), протоны ($E > 5 \text{ МэВ}$) и рентгеновские лучи (фотоны с $E > 20 \text{ кэВ}$; эффективность $\sim 1\%$), а телескоп (выполненный в виде схемы совпадений импульсов) регистрирует электроны ($E > 5 \text{ МэВ}$) и протоны ($E > 30 \text{ МэВ}$). Эффективность счетчиков для заряженных частиц близка к 100%. Информация о потоках частиц, зарегистрированных прибором, и об остаточном давлении воздуха передается на наземный приемник. В последние годы в состав радиозонда входит лишь одиночный счетчик. Известно, что высыпающиеся электроны, в зависимости от их энергии, поглощаются на высотах 80–100 км ($10^{-4} \text{—} 5 \cdot 10^{-3} \text{ г·см}^{-2}$) в верхних слоях атмосферы. Однако они генерируют рентгеновские фотоны, которые могут проникать довольно глубоко в атмосферу и регистрироваться одиночным счетчиком, чувствительным к рентгеновским лучам. Примерно в 75% зарегистрированных ВВЭ рентгеновские лучи распространяются в атмосфере до $\sim 25 \text{ км}$, из них треть зарегистрирована на высотах более 30 км. Таким образом, мы в основном имеем дело с высыпаниями электронов с энергией выше нескольких сотен килоэлектрон-вольт (более подробно [17, 18]).

3. ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ 2022–2023 ГОДОВ

Высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ) в эксперименте ФИАН наблюдаются в основном в Мурманской области. С 1961 г. зарегистрировано почти 600 случаев ВВЭ, характеристики которых представлены в работах [17, 18]. В последние годы из-за экономических трудностей сократилось число запусков радиозондов. Вследствие этого в 2022–2023 гг. было зарегистрировано всего 3 случая ВВЭ: 05.XII.2022, 26.XII.2022 и 30.XII.2022.

Наблюдениям ВВЭ в Московской области до сих пор уделялось мало внимания (из-за редкости событий), хотя Москва находится в районе зазора между внешним и внутренним радиационными поясами, где высыпания электронов небольших энергий ($E > 30$ кэВ) происходят достаточно часто даже в условиях умеренной геомагнитной активности ([10, 13] и ссылки там). В 2009 г. в Московской области был зарегистрирован случай исключительно сильного ВВЭ, который оказал значительное влияние на физические процессы в атмосфере [15, 16]. Хотя в последние годы частота запусков радиозондов сократилась, по предварительным оценкам, ВВЭ в Московской области наблюдаются чаще, чем раньше. В исследуемый период зарегистрированы ВВЭ 20.VI.2022, 06.II.2023 и 06.XII.2023.

Станция Мирный находится в области открытых силовых линий межпланетного магнитного поля (ММП) и не должна регистрировать

ВВЭ. Тем не менее, в период 1966–2014 гг. было зарегистрировано десять случаев, отвечающих критериям выделения ВВЭ в эксперименте ФИАН. Последний случай наблюдался в Мирном 16.V.2022. Такие события должны быть связаны с сильной деформацией полярной границы радиационного пояса.

В настоящей работе в качестве примеров рассматриваются случаи ВВЭ, наблюдавшиеся на ст. Мирный 16.V.2022 и на ст. Долгопрудный (Москва) 20.VI.2022.

На рис. 1 представлены 1-минутные скорости счета одиночного счетчика, измеренные в мае 2022 г. на ст. Мирный и в июне 2022 г. на ст. Долгопрудный (Москва). Измерения 11 и 13 мая на ст. Мирный и 29 июня в Московской области соответствуют регистрации потоков галактических космических лучей в спокойных условиях (т.н. фоновые переходные кривые КЛ в атмосфере). Повышенный темп счета счетчика 16 мая (Мирный) и 20 июня (Москва) соответствует регистрации рентгеновских фотонов, образованных высыпавшимися электронами в атмосфере. Далее, для определения потока фотонов в атмосфере, «фоновые» кривые космических лучей (например, средний счет счетчика за 11 и 13 мая) были вычтены из данных измерений во время ВВЭ (например, данные, полученные 16.V.2022 в Мирном). Результаты такого вычитания представляют спектр поглощения фотонов в атмосфере во время ВВЭ, например распределение $\Delta N \approx f(X)$ на рис. 2 (левая панель).

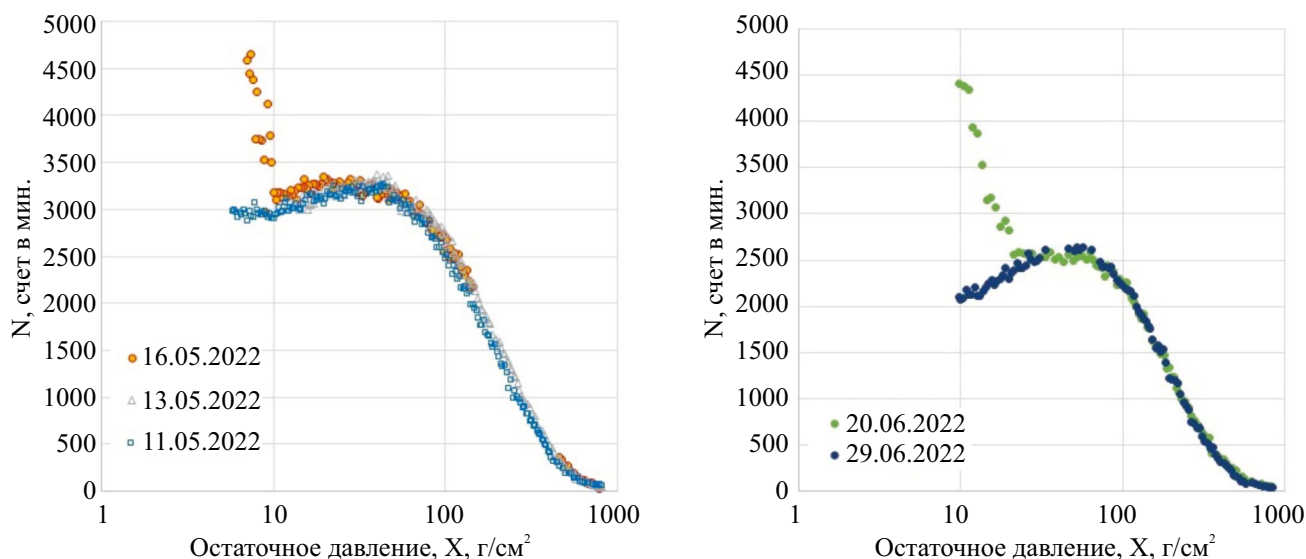


Рис. 1. Данные измерений одиночного счетчика 11, 13 и 16.V.2022 на ст. Мирный (слева) и 20, 29.VI.2022 на ст. Долгопрудный (Москва; справа) на разных уровнях остаточной атмосферы (давления). Случаи высыпаний электронов зарегистрированы 16 мая на ст. Мирный (слева) и 20 июня на ст. Долгопрудный (справа).

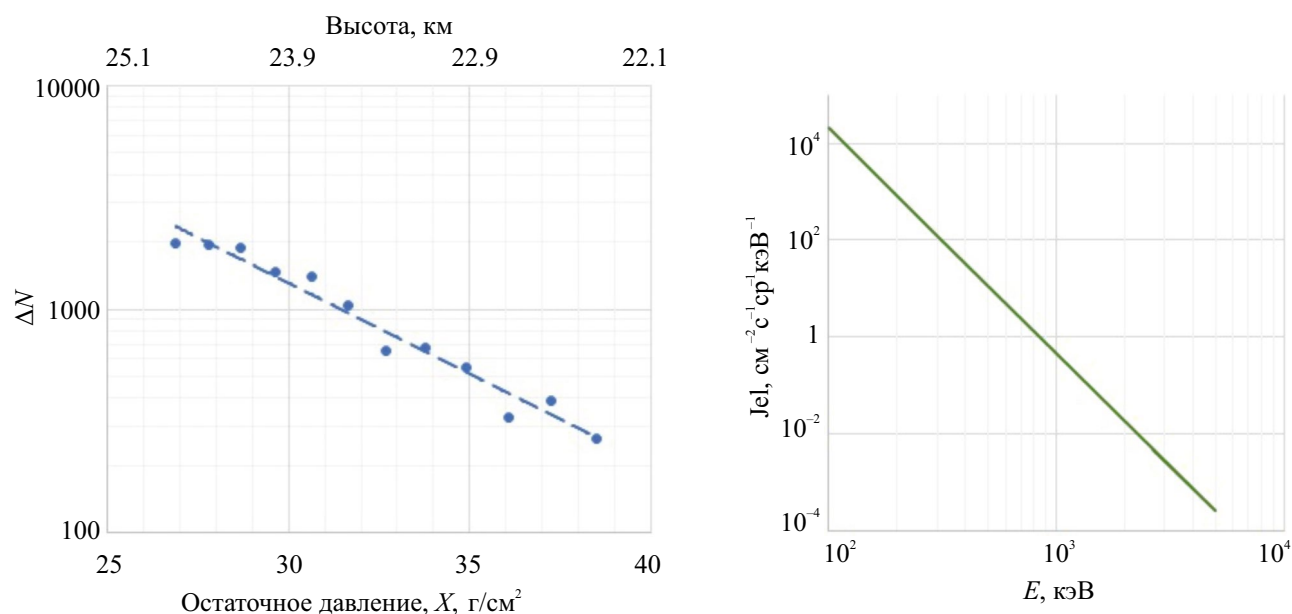


Рис. 2. Слева: спектр поглощения фотонов >20 кэВ (ΔN в зависимости от глубины остаточной атмосферы (X); ΔN — значение превышения скорости одиночного счетчика над фоном по минутным данным) во время ВВЭ 20.VI.2022 в Москве. Справа: восстановленный энергетический спектр высыпающих электронов на границе атмосферы для этого события.

Пунктирная линия показывает аппроксимацию данных экспоненциальной зависимостью $\Delta N = N \exp(-X/X_0)$. Эти параметры установленных спектров поглощения фотонов использовались далее для оценки энергетического спектра высыпающих электронов на границе атмосферы. Для этого были проведены расчеты процесса прохождения электронов и вторичных фотонов в атмосфере с использованием нового метода описанного в публикации [19 и ссылки там]. Использовался код RUSCOSMICS Монте-Карло, разработанный на основе GEANT4 (<https://ruscosmics.ru/FIANRSCSM>). Этот код учитывает тормозное излучение, ионизационные потери энергии, многократное рассеяние, рождение пар, Комптон рассеяние и фотоэффект, что позволяет рассчитать результирующий поток частиц (электронов/позитронов и фотонов), их угловое распределение и распределение по энергии на разных высотах (или уровнях остаточной атмосферы). На рис. 2 (справа) показан энергетический спектр электронов на границе атмосферы, определенный для ВВЭ 20.VI.2022 в Долгопрудном (Москва).

4. МЕЖПЛАНЕТНЫЕ И ГЕОМАГНИТНЫЕ УСЛОВИЯ

Ранее, изучение случаев ВВЭ, зарегистрированных в Мурманской области, позволило

установить достаточно четкую связь между появлением ВВЭ и условиями в межпланетной среде, которая соответствует современным представлениям о природе ВВЭ. Эти события как правило инициируются приходом высокоскоростного потока солнечного ветра. На фоне отрицательной, и часто турбулентной, B_z -компоненты ММП возмущения солнечного ветра проникают в магнитосферу Земли и запускают ряд процессов, в частности, увеличение волновой активности. В результате процессов взаимодействия волна — частица происходит как ускорение частиц (рост интенсивности электронов внешнего радиационного пояса), так и нарушение их адиабатического движения, приводящие к потерям электронов, одним из каналов которых является ВВЭ [18]. События ВВЭ происходят на фоне умеренной геомагнитной возмущенности ($|Dst| \approx 30\text{—}40$ нТл), более часто в главной фазе геомагнитного возмущения, но продолжают в течение фазы восстановления геомагнитного поля, где они формируют группы. Во многих случаях ВВЭ, зарегистрированные в атмосфере, соответствуют периодам длительного повышения авроральной активности — High-Intensity, Long-Duration, Continuous Auroral Activity (HILDCAA) [20].

Рассмотрим условия в межпланетном пространстве и в магнитосфере во время ВВЭ, зарегистрированных на ст. Мирный 16.V.2022 (8:46–9:00 UT) и на ст. Долгопрудный (Москва)

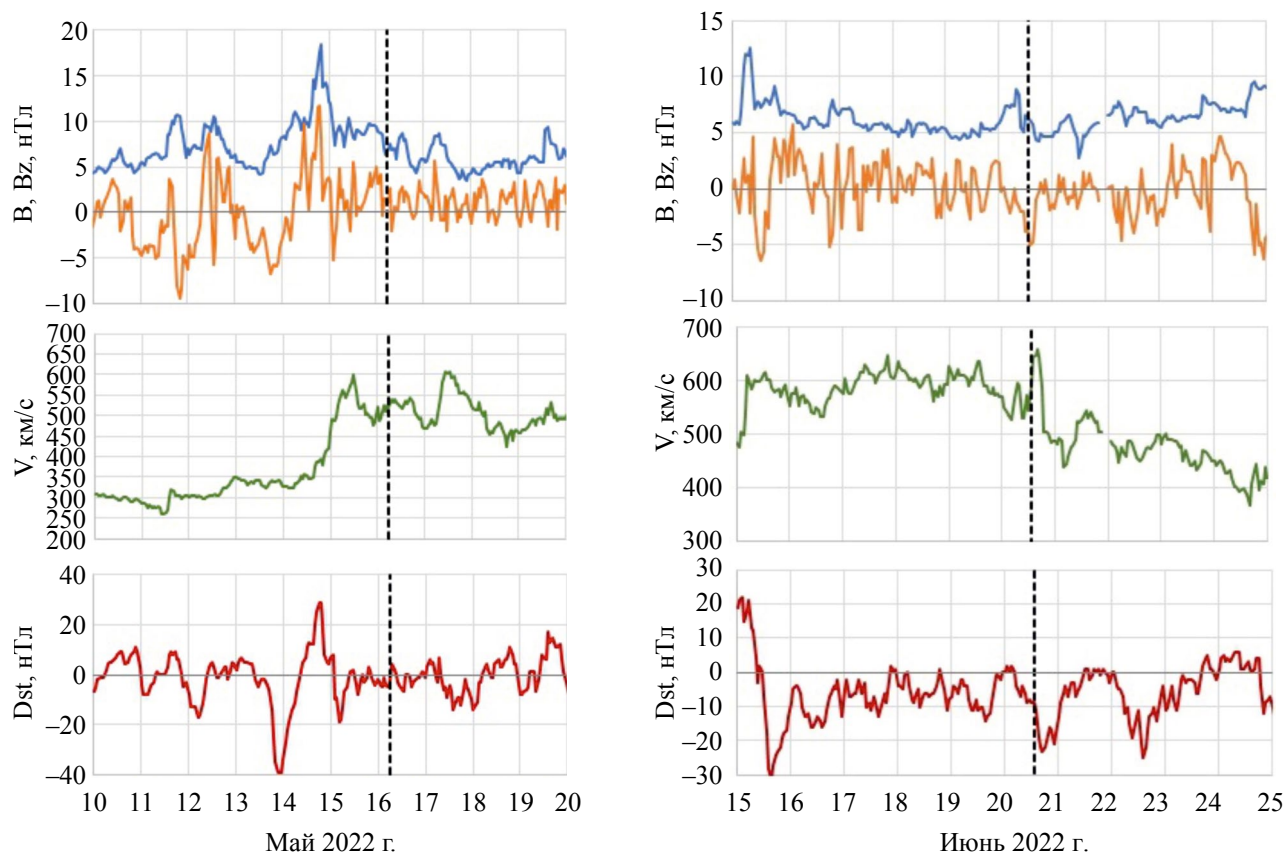


Рис. 3. Временные изменения характеристик межпланетной плазмы и геомагнитного Dst -индекса 10–20.V.2022 и 15–25.VI.2022. Вертикальные штриховые линии указывают на время наблюдения ВВЭ в Мирном 16.V.2022 (слева) и на ст. Долгопрудный 20.VI.2022 (справа).

20.VI.2022 (12:56–13:05 UT). На рис. 3 представлены временные изменения характеристик межпланетной плазмы и геомагнитного Dst -индекса в рассматриваемых событиях (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

Высыпание высокоэнергичных электронов в Мирном 16.V.2022 (8:46–9:00 UT) произошло на фоне длительного возрастания скорости солнечного ветра (V) в диапазоне от ~300 до 610 км/с, связанного с приходом к Земле высокоскоростного потока солнечного ветра 14–15 мая. Накануне наблюдалось уменьшение B_z -компоненты межпланетного магнитного поля до -6 нТл и уменьшение геомагнитного Dst -индекса до -20 нТл. Также зарегистрировано увеличение величины аврорального AE -индекса до 600–700 нТл (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_realtime/202206/index_20220620.html). Следует отметить, что в этих условиях происходит изменение магнитной конфигурации во время фазы расширения суббури, что приводит к расширению и распространению зоны полярных высыпаний на более высокие широты [21, 22].

По данным измерений на спутнике *CORONAS-F* в подобных условиях 13.XII.2003 наблюдались высыпания электронов с энергией 0.3–1.5 МэВ в северной полярной области при $L > 8$ [22]. Таким образом, редкое высыпание электронов в Мирном 16.V.2022 вероятно связано с возможным расширением внешней границы полярных высыпаний в область южной полярной шапки, характеризуемой параметром $L > 10$.

Высыпание высокоэнергичных электронов 20 июня (12:56–13:05 UT) было зарегистрировано на ст. Долгопрудный (Москва), расположенной в области зазора между внутренним и внешним радиационным поясами ($L = 2.4$). Событие наблюдалось во время длительной фазы восстановления геомагнитного возмущения, начавшегося 15.VI.2022, когда скорость солнечного ветра достигла ~600 км/с, B_z -компонента межпланетного магнитного поля уменьшилась до -6 нТл, и началась слабая геомагнитная буря. В период 15–20.VI.2022 средний уровень скорости солнечного ветра составил ~550 км/с, зарегистрированы незначительные

вариации B_z -компоненты межпланетного магнитного поля в пределах от -5 до $+5$ нТл. Кратковременное увеличение скорости солнечного ветра и уменьшение геомагнитного D_{st} -индекса было зарегистрировано 20 июня. В это же время наблюдалось увеличение AE -индекса до ~ 600 нТл (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_realtime/202206/index_20220620.html). Согласно исследованию [20], перечисленные характеристики межпланетных и геомагнитных условий соответствуют периоду HILDCAA — длительному повышению авроральной активности. Известно, что высыпания электронов с энергией свыше 30 кэВ наблюдаются в области зазора даже в условиях умеренной геомагнитной активности [10]. Хотя в более ранних работах утверждалось, что энергия электронов в области зазора не превышает 1 МэВ [23], появились доказательства ВВЭ больших энергий [9, 24]. В работе [24] показано, что после магнитных бурь наблюдается увеличение потока электронов до 3 МэВ в области $2.8 < L < 3$ и потока электронов с $E = 1.1\text{--}1.3$ МэВ вплоть до $L = 1.8$.

5. ВЫВОДЫ

Долгопрудненская научная станция ФИАН на протяжении десятков лет проводит непрерывные измерения потоков космических лучей на высотах 0–30 км в атмосфере полярных широт (Мурманская обл.; Антарктида) и на средней широте (Московская обл.). За время наблюдений зарегистрировано почти 600 случаев ВВЭ, в основном, из внешнего радиационного пояса Земли вблизи его полярной границы по данным измерений в Мурманской обл. (параметр Мак-Иллвайна $L \sim 5.6$). Вместе с тем в 2022–2023 гг. зарегистрировано несколько случаев высыпаний электронов на средней широте на ст. Долгопрудный, расположенной в области зазора между внутренним и внешним радиационным поясами ($L \sim 2.4$) и на ст. Мирный в Антарктиде ($L > 10$), расположенной в области южной полярной шапки с открытыми силовыми линиями геомагнитного поля.

В работе представлен анализ высыпаний электронов по наблюдениям на ст. Мирный (Антарктида) 16.V.2022 (08:46–09:00 UT) и на ст. Долгопрудный 20.VI.2022 (12:56–13:05 UT).

Условия в межпланетной среде и геомагнитная обстановка в эти периоды были благоприятными для процессов, инициирующих высыпания электронов. Однако детальное изучение

условий, сопутствующих зарегистрированным высыпаниям на средних широтах и в Антарктиде, требует дальнейшей работы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научным группам, предоставляющим свои данные через интернет: *GSFC/SPDF (OMNIWeb)* и *WDC for Geomagnetism Kyoto*.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФИАН. ГАБ частично подержана грантом РНФ № 22-62-00048.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ripoll J.-F., Claudepierre S.G., Ukhorskiy A.Y. et al.* Particle Dynamics in the Earth's Radiation Belts: Review of Current Research and Open Questions // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2020. V. 125. Art. ID. e2019JA026735. DOI: 10.1029/2019JA026735.
2. *Xiong Y., Xie L., Pu Z. et al.* Responses of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt to geomagnetic storms // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2015. V. 120. P. 9513–9523. DOI: 10.1002/2015JA021440.
3. *Baker D.N., Jaynes A.N., Hoxie V.C., et al.* An impenetrable barrier to ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts // *Nature*. 2014. V. 515(7528). P. 531–534. DOI: 10.1038/nature13956.
4. *Fennell J.F., Claudepierre S.G., O'Brien T.P. et al.* VanAllen Probes show the inner radiation zone contains no MeV electrons: ECT/MagEIS data // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 1283–1289. DOI: 10.1002/2014GL062874.
5. *Lyons L.R., Thorne R.M.* Equilibrium structure of radiation belt electrons // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78(13). P. 2142–2149. DOI: 10.1029/JA078i013p02142.
6. *Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A. et al.* Anthropogenic space weather // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212 (3–4). P. 985–1039. DOI: 10.1007/s11214-017-0357-5.
7. *Foster J.C., Erickson P.J., Baker D.N. et al.* Observations of the impenetrable barrier, the plasmopause, and the VLF bubble during the 17 March

- 2015 storm // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2016. V. 121. P. 5537–5548. DOI:10.1002/2016JA022509.
8. *Rodger C.J., Clilverd M.A., Thomson N.R. et al.* Radiation belt electron precipitation into the atmosphere: Recovery from a geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. Art.ID A11307. DOI:10.1029/2007JA012383.
9. *Claudepierre S.G., O'Brien T.P., Looper M.D. et al.* A revised look at relativistic electrons in the Earth's inner radiation zone and slot region // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2019. V. 124. P. 934–951. DOI: 10.1029/2018JA026349.
10. *Kavanagh A.J., Cobbett N., Kirsch P.* Radiation Belt slot region filling events: Sustained energetic precipitation into the mesosphere // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2018. V. 123. P. 7999–8020. DOI: 10.1029/2018JA025890.
11. *Aplin K.L., Marlton G.J., Race V.* Stratospheric X-rays detected at midlatitudes with a miniaturized balloon-borne microscintillator- PiN diode system // *Space Weather*. 2021. V. 19. Art.ID. e2021SW002809. DOI:10.1029/2021SW002809.
12. *Babu E.M., Nesse-Tyssoy H.N., Smith-Johnsen C. et al.* Determining latitudinal extent of energetic electron precipitation using MEPED on-board NOAA/POES // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2022. V. 127. Art. ID e2022JA030489. DOI:10.1029/2022JA030489.
13. *Nesse H., Babu E.M., Salice J.A. et al.* Energetic electron precipitation during slot region filling events. // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2023. V. 128. Art.ID e2023JA031606. DOI: 10.1029/2023JA031606.
14. *Stozhkov Y.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. Iss. 10. P. 1124–1137. DOI: 10.1016/j.asr.2008.10.038.
15. *Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Миронова И.А. и др.* Атмосферные эффекты во время высыпаний энергичных электронов // *Изв. РАО. Сер. Физ.* 2021. Т. 85. № 11. С. 1650–1653. DOI:10.31857/S0367676521110223. (*Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Mironova I.A. et al.* Atmospheric Effects during the Precipitation of Energetic Electrons// *BRAS* 2021. N. 11. P. 1310. DOI: 10.3103/S1062873821110228)
16. *Mironova I.A., Sinnhuber V., Bazilevskaya G.A. et al.* Exceptional middle latitude electron precipitation detected by balloon observations: implications for atmospheric composition // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 6703–6716. DOI:10.5194/acp-22-6703-2022.
17. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I. et al.* Catalogue of electron precipitation events as observed in the long duration cosmic ray balloon experiment // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016. V. 149. P. 258–276. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.12.006.
18. *Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B. et al.* Temporal characteristics of energetic magnetospheric electron precipitation as observed during long-term balloon observations // *J. Geophys. Res. Space* 2020. V. 125. Iss. 11. Art.ID. e28033. DOI: 10.1029/2020JA028033.
19. *Makhmutov V.S., Maurice E.A., Bazilevskaya G.A. et al.* Estimation of energy spectrum of precipitating magnetospheric electrons based on bremsstrahlung X-ray fluxes recorded in the atmosphere. // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2023. V. 128. Art. ID. e2023JA031370. DOI: 10.1029/2023JA031370.
20. *Tsurutani B.T., Gonzalez W.D.* The cause of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAAs): Interplanetary Alfvén wave trains // *Planetary and Space Science*. 1987. V. 35(4). P. 405–412. DOI: 10.1016/0032-0633(87)90097-3.
21. *Kozyreva O., Myagkova I., Antonova E. et al.* Energetic electron precipitation measured by coronas-f satellite and polar magnetic disturbances: case study of December 13, 2003 // *Proc. XXXII Annual Seminar. Apatity*. 2009. P. 67–70.
22. *Bland E., Bozóki T., Partamies N.* Spatial extent of the energetic electron precipitation region during substorms // *Front. Astron. Space Sci.* 2022. V. 9. Art. ID. 978371. DOI:10.3389/fspas.2022.978371.
23. *Claudepierre S.G., O'Brien T.P., Fennell J.F. et al.* The hidden dynamics of relativistic electrons (0.7–1.5 MeV) in the inner zone and slot region // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. P. 3127–3144. DOI: 10.1002/2016JA023719.
24. *O'Brien D., Li X., Khoo L. et al.* Observations of Relativistic Electron Enhancement and Butterfly Pitch Angle Distributions at Low L(<3) // *Geophys. Res. Lett.* 2024. V. 51. Art.ID. e2023GL106668. DOI: 10.1029/2023GL106668.