

УДК 523.9-332, 551.521.3

НАБЛЮДЕНИЯ С БОРТА ИСЗ «МЕТЕОР-3М №1» ВЫСЫПАНИЙ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО НАГРЕВУ ИОНОСФЕРЫ 19.04.2004-26.04.2004.

В.Е. Давыдов, М.Д. Зинкина, Ю.В. Писанко

Поступила в редакцию 19.03.2015 г.

Детально исследуются наблюдавшиеся бортовой аппаратурой ИСЗ «Метеор-3М №1» события высыпаний резонансных электронов из внешнего радиационного пояса за период 19.04.2004-26.04.2004 проведения экспериментов по нагреву ионосферы установкой НААРП.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИСЗ «МЕТЕОР-3М №1», ВЫСЫПАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА, ПРОДОЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах по высокочастотному нагреву используют направленное в ионосферу излучение передатчиков, работающих на частоте $\sim 3-8$ МГц с модуляцией на более низкой частоте. Это может приводить к генерации ОНЧ-КНЧ волн («свистов»), которые распространяются в плазмосфере вдоль силовых линий геомагнитного поля и способны изменятьpitch-углы захваченных электронов радиационных поясов вплоть до высыпания этих электронов в атмосферу. Если вдоль силовой линии распространяется электромагнитное возмущение, то его воздействие на отдельные электроны, вообще говоря, невелико. Однако оно может стать значительным при определенном соотношении между частотой волны, циклотронной частотой и продольной (направленной вдоль магнитного поля) составляющей скорости частицы. В этом случае электрон «ощущает» поле волны в нужной фазе, то есть на электрон действует почти постоянная сила, поворачивающая его вектор скорости относительно направления геомагнитного поля. Если вектор скорости при этом перейдет в конус потерь, то электрон уйдет из геомагнитной ловушки в атмосферу. Энергия электрона, при которой этот процесс наиболее эффективен, оценивается величиной $\sim 30-40$ кэВ.

Цель настоящего сообщения - детальное исследование наблюдавшихся с борта ИСЗ «Метеор-3М №1» событий высыпаний резонансных (с энергией ~ 40 кэВ) электронов из внешнего радиационного пояса за период 19.04.2004-26.04.2004 проведения экспериментов по нагреву ионосферы установкой НААРП.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.

С 2002 по 2005 годы на околоземной квазикруговой полярной орбите на высоте ~ 1000 км функционировал отечественный ИСЗ «Метеор-3М №1» гидрометеорологического назначения. На борту спутника был установлен комплекс аппаратуры гелиогеофизических измерений в составе комплекса геофизических измерений КГИ-4С и аппаратуры измерения геоактивных излучений МСГИ-5ЕИ. Счетчик Гейгера МИП-1 из состава комплекса аппаратуры МСГИ-5ЕИ, разработанной в НИИЯФ МГУ, обеспечивал измерение скорости счета электронов с энергией ~ 40 кэВ с дискретностью 5 измерений в секунду. Уникальность этих данных состоит не только в том, что измерения проведены однотипным прибором за длительный период времени (больше трех лет), но определяется также и тем, что дискретность измерений составляет 0,2 секунды, что позволяет детально исследовать эффекты высыпаний резонансных электронов.

По результатам первичной обработки телеметрической информации ИСЗ «Метеор-3М №1» была построена база данных о скоростях счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ. Данные с аппаратуры МСГИ5-ЕИ передавались на Землю по радиоканалу на частоте 1.7 ГГц. Приём телеметрии проводился на специализированном пункте НЦ ОМЗ Роскосмоса, который расположен практически в черте г. Москвы со всеми вытекающими последствиями искажения телеметрии внешними помехами. Поэтому в исходной телеметрии ИСЗ «Метеор-3М №1» были и сбои. Информация счётчика МИП-1 могла регистрироваться с дискретностью 0.2 секунды в двух режимах запоминания: блоками 108 байт за 4 секунды наблюдений (этот режим действовал только в 2002 году) и блоками 508 байт за 20 секунд наблюдений. Первичная обработка телеметрической информации счётчика МИП-1 обеспечила построение массива данных измерений с дискретностью 0,2 секунды скорости счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ со специальной маркировкой, говорящей в необходимых случаях о том, что следующие 20 секунд информации получены из сбойных кадров в результате их восстановления. В процессе первичной обработки телеметрии были созданы файлы, содержащие данные измерений скорости счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ за одни сутки. Строки файлов состоят из даты, времени (UT) и 300 показаний прибора МИП-1, соответствующих одной минуте с дискретностью 0,2 секунды. Процесс вторичной обработки включал два этапа. На первом этапе использовался специализированный массив траекторных данных ИСЗ «Метеор 3М №1» для данных суток и строки файлов первичной обработки дополнялись соответствующими данной минуте географическими координатами точки измерения: высота (км), широта и долгота (градусы). На втором этапе использовалась программа IGRF, которая по географическим координатам вычисляет геомагнитные координаты точки измерения, параметр Мак-Илвайна L , модуль и компоненты вектора магнитного поля в различных системах координат. Таким образом, одна строка загрузочного файла содержит относящуюся к точке измерения информацию ИСЗ «Метеор 3М №1» за одну минуту (315 чисел). Она включает: дату и время измерений в UT; высоту (км); широту (градусы); долготу (градусы); B_{north} - направленную на север компоненту магнитного поля (Гс); B_{east} - направленную на восток компоненту магнитного поля (Гс); B_{down} - направленную к центру Земли компоненту магнитного поля (Гс); B - модуль магнитного поля, (Гс); H - горизонтальную компоненту магнитного поля (Гс); I - угол наклона магнитного поля; D - угол склонения магнитного поля; L - параметр Мак-Илвайна; X - компоненту магнитного поля (Гс); Y - компоненту магнитного поля (Гс); Z - компоненту магнитного поля (Гс); скорости счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ за одну минуту (300 значений). В названии загрузочные файлы содержат дату (номер дня, месяца и года) проведения измерений. Файлы, соответствующие единому месяцу, сгруппированы в одной директории, которая загружается в базу примерно за 3 – 4 минуты. Общий объем сформированной и загруженной базы данных Firebird составляет 2,8 Гбайт. Выбор данных из базы за одни сутки и их визуализация происходят практически мгновенно.

Для детального изучения был выбран временной интервал 19.04-26.04.2004, когда проводились эксперименты по нагреву ионосферы с помощью стенда HAARP. Стенд расположен в Гаконе на Аляске под 62.39° с.ш. и 145.15° з.д. в области дипольного геомагнитного поля ($L \approx 4.9$). В описанных в [5] экспериментах 19.04.2004-26.04.2004 изучалось сверхдальнее распространение в плазме вдоль силовых линий геомагнитного поля КНЧ/ОНЧ сигналов, генерировавшихся при воздействии модулированного радиоизлучения на область протекания аврорального электроджета. Приёмник был установлен на судне в магнито-сопряжённой точке в южном полушарии. 19.04.2004-26.04.2004 стенд работал каждый день по 13 часов (02:00-15:00 UT). Несущая частота менялась каждые полчаса с 3.25 МГц на 5.8 МГц, излучаемая мощность составляла 960 кВт. Режим излучения – односторонние повторяющиеся с односторонним интервалом сигналы, модулированные синусоидальным сигналом 1-2 кГц. Диаграмма направленности строилась в вертикальной плоскости. Энергия резонансных электронов оценивается авторами эксперимента в несколько десятков кэВ.

Для анализа мы выбрали моменты времени, когда в период проведения этих экспериментов ИСЗ «Метеор-3М №1» находился либо над стендом, либо в районе магнито-сопряжённой точки. Всего удалось найти 8 таких пролётов спутника. Данные бортовых измерений мы привязали по минуте к повторяющимся односторонним сигналам стенда. ИСЗ «Метеор-3М №1» пролетал район работающего стенда или магнито-сопряжённой точки 19.04.2004 в 04:00-04:01, в 05:44-05:45 и в 07:28-07:29; 24.04.2004 в 08:32-08:33; 25.04.2004, в 08:32-08:33 и в 10:16-10:17; 26.04.2004 в 05:36-05:37 и в 07:20-07:21. Каждый раз счётчик МИП-1 фиксировал характерные эффекты в виде резкого (более чем на порядок величины) кратковременного повышения скорости счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ.

24.04.2004 и 25.04.2004 эффекты наблюдались в одно и то же мировое время (08:32-08:33). 24.04 спутник находился в районе магнито-сопряжённой точки. Следует заметить, что изучение стимулированных высыпаний требует спокойного состояния магнитосферы, чтобы проще было разделять искусственные (связанные с генерацией стимулированных высыпаний) и естественные (связанных с повышенной геомагнитной активностью) эффекты. Поэтому такие эксперименты предпочтительнее проводить при невысокой геомагнитной активности. Однако, точный прогноз геомагнитной активности – это сложная задача и такой прогноз оправдывается не во всех случаях. Сравнение наблюдаемых в обоих случаях эффектов свидетельствует в пользу того, что возрастание геомагнитной активности ($a_p=9$, $AE=363$ 24.04.2004 и $a_p=22$, $AE=965$ 25.04.2004) влечёт за собой увеличение амплитуды «пики» примерно на порядок. Эти события представлены на рис.1. Значения скорости счёта через каждые 0,2 сек. показаны синими точками. Попадание синей точки на ось абсцисс означает, что в этот момент времени имел место сбой в исходной телеметрии. По оси абсцисс отложено мировое время, а ниже – параметр Мак-Илвайна. Сверху по горизонтали показаны географическая широта (LAT) и географическая долгота (LON) орбиты спутника. По оси ординат отложен десятичный логарифм скорости счёта.

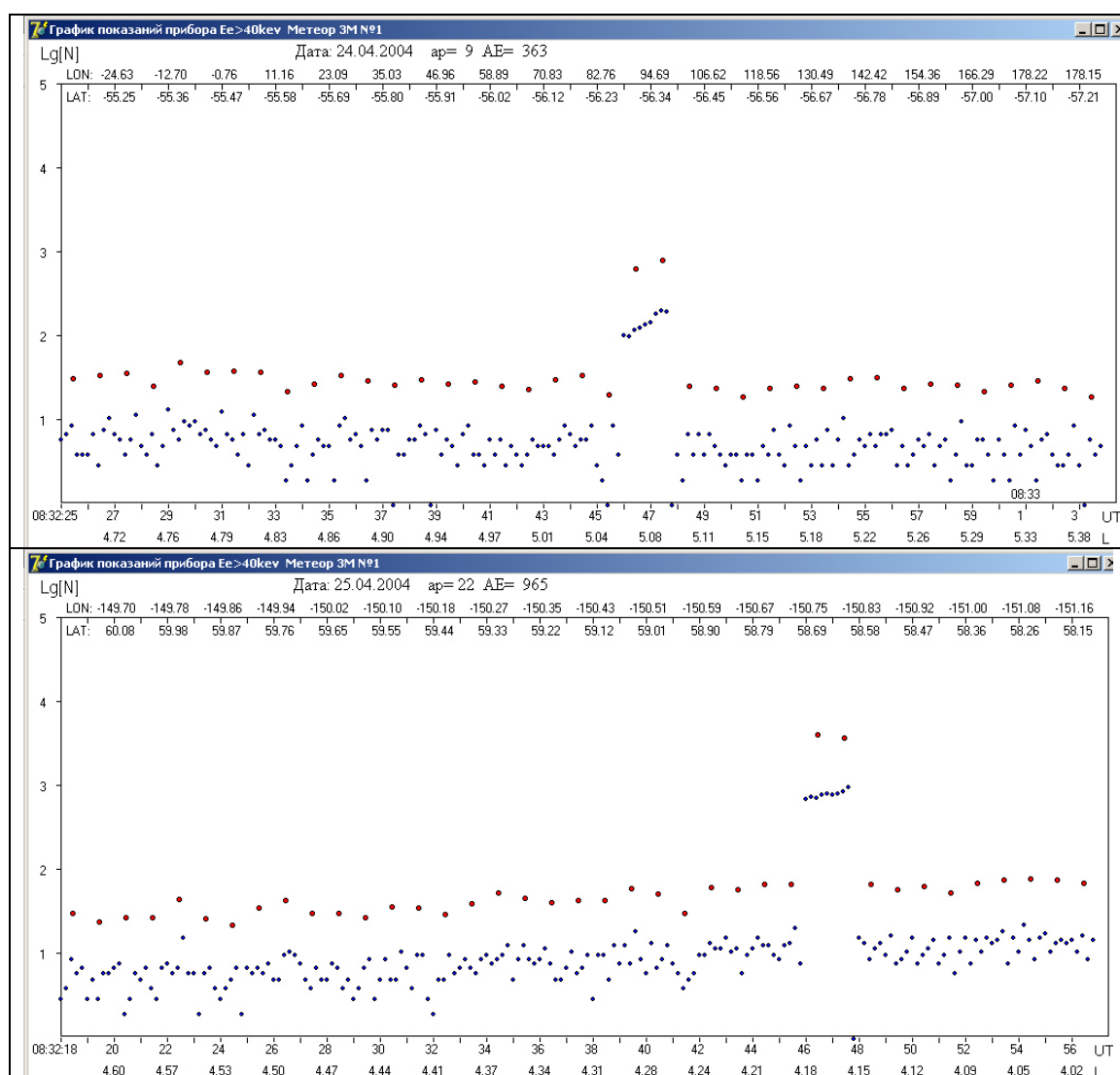


Рис.1. Показания счётчика МИП-1 за время 08:32-08:33 UT 24.04.2004 и за время 08:32-08:33 UT 25.04.2004.

19.04.2004 и 26.04.2004 эффекты дважды наблюдались примерно в одно и то же мировое время (05:44-05:45 и 07:28-07:29 19.04.2004 и 05:36-05:37 и 07:20-07:21 26.04.2004). 19.04.2004 в 05:44-05:45 и в 07:28-07:29 спутник пролетал в районе магнито-сопряжённой точки, 26.04.2004 в 05:36-05:37 и в 07:20-07:21 – над станцией. Геомагнитные условия: 19.04 в 05:44-05:45 $a_p=6$, $AE=186$,

26.04 в 05:36-05:37 $a_p=4$, AE=102, 19.04 в 07:28-07:29 $a_p=6$, AE=153, 26.04 в 07:20-07:21 $a_p=5$, AE=201. Сравнение наблюдаемых в обоих случаях эффектов подтверждает свидетельство о том, что возрастание геомагнитной активности (по a_p -индексу) влечёт за собой увеличение амплитуды пика. События представлены на рис. 2. и рис.3. Следует отметить, что сравниваются величины пиков, фиксируемые спутником как непосредственно в районе установки (в северном полушарии), так и в районе магнито-сопряжённой точки (в южном полушарии), тогда как AE-индекс рассчитывают по данным высокоширотных магнитных обсерваторий только северного полушария. Среднеширотный a_p -индекс, в такой ситуации, более адекватно отражает планетарную геомагнитную активность.

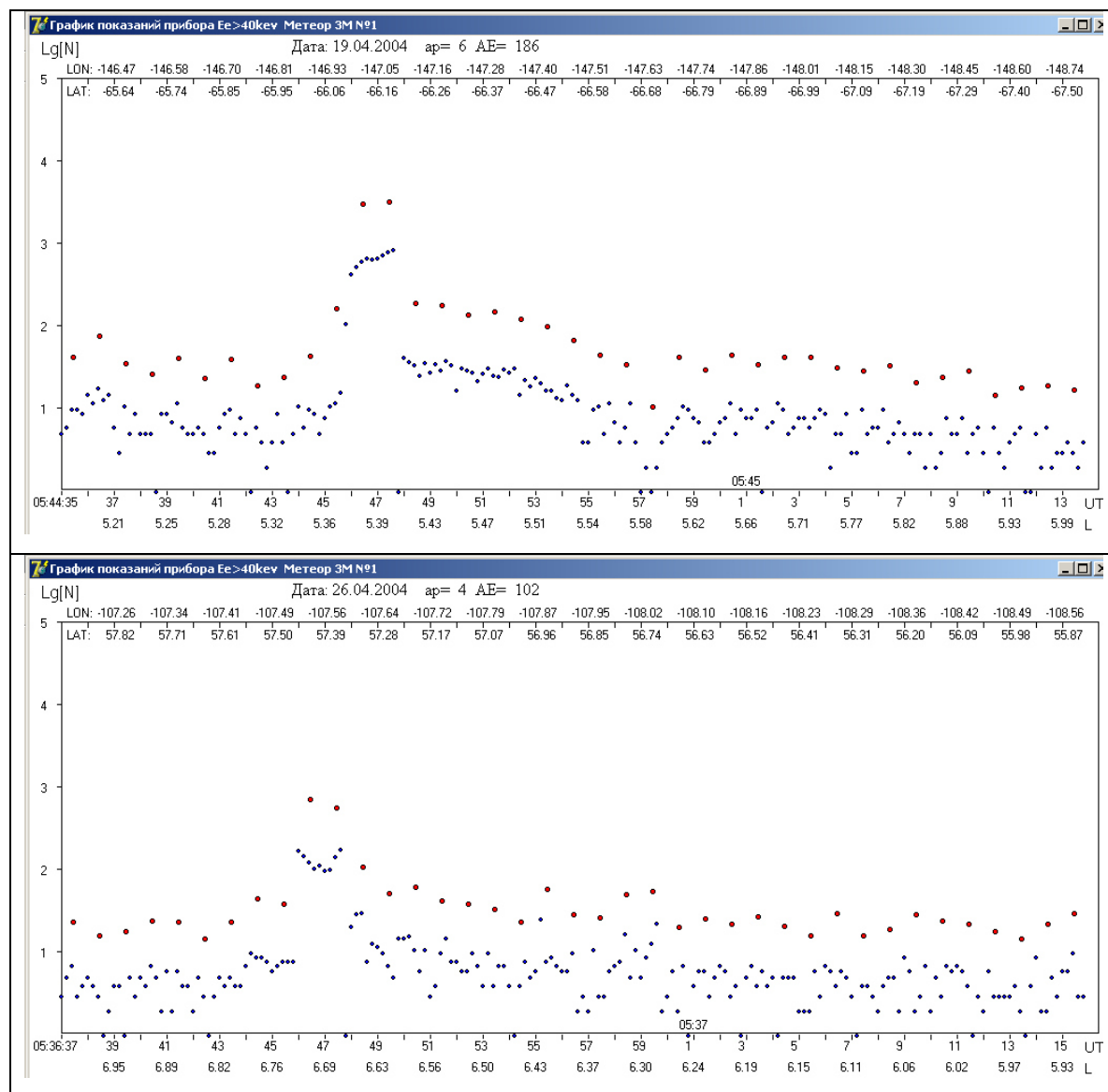


Рис.2. Показания счётчика МИП-1 за время 05:44-05:45 UT 19.04.2004 и за время 05:36-05:37 UT 26.04.2004.

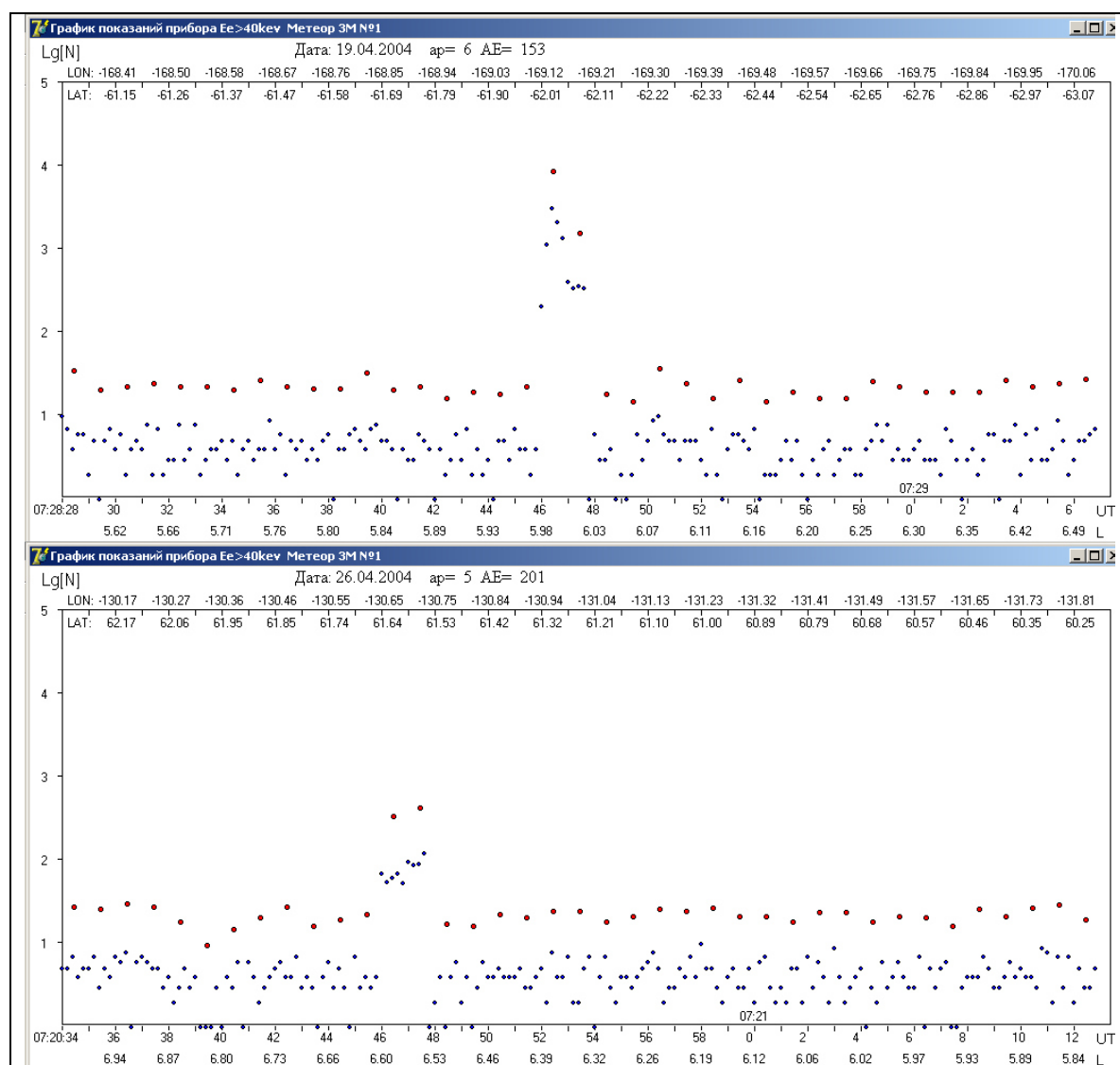


Рис.3. Показания счётчика МИП-1 за время 07:28-07:29 UT 19.04.2004 и за время 07:20-07:21 UT 26.04.2004.

Наконец, 19.04.2004 было три пролёта спутника над районом магнито-сопряжённой точки в разные моменты времени – первый пролёт 04:00-04:01 UT, второй пролёт – 05:44-05:45 UT, третий пролёт – 07:28-07:29 UT. Геомагнитные условия: $a_p=6$, $AE=159$ на пролёте 04.00-04.01 UT, $a_p=6$, $AE=186$ на пролёте 05:44-05:45 UT, $a_p=6$, $AE=153$ на пролёте 07:28-07:29 UT. События представлены на рис.4. Сравнение наблюдаемых эффектов свидетельствует о том, что скорость счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ в пике высыпания несколько возрастает с приближением к местной полуночи, что может быть связано с уменьшением поглощения радиоизлучения стенда в слое D. Геомагнитные условия за время 04:00-07:29 UT практически не изменялись.

Таким образом, во всех случаях пролёта ИСЗ «Метеор-3М №1» в районе стенда или магнито-сопряжённой точки наблюдался узкий по времени (двухсекундный) пик скорости счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ. Скорость счёта в этом пике как минимум на порядок превосходила своё фоновое значение. Возрастание геомагнитной активности по a_p -индексу влекло за собой увеличение амплитуды пика скорости счёта.

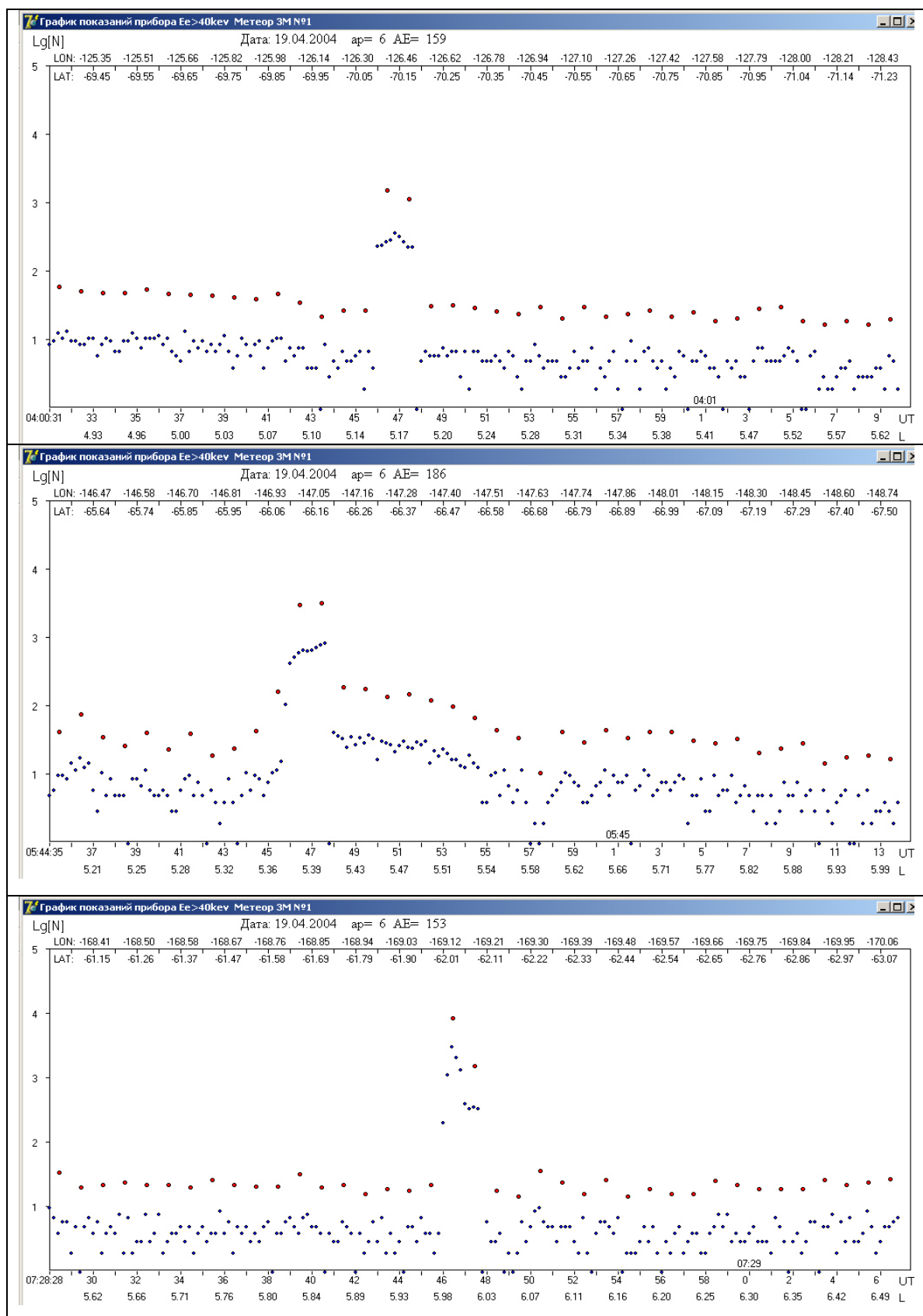


Рис.4 Показания счётчика МИП-1 19.04.2004 за время 04:00-04:01 UT, 05:44-05:45 UT, 07:28-07:29 UT.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.

Направим ось z цилиндрической системы координат вдоль геомагнитного поля. При рассмотрении различных явлений в магнитосфере Земли обычно считается, что электрическое поле имеет индукционную природу и перпендикулярно магнитным силовым линиям. Составляющая электрического поля, параллельная магнитному полю, не может быть большой, так как свободное перемещение зарядов вдоль силовых линий магнитного поля приводит к быстрому выравниванию потенциала вдоль силовой линии. Однако в определённых обстоятельствах быстрому выравниванию потенциала иногда мешают специфические плазменные процессы, например пересечение магнитной силовой линией зоны плазменной турбулентности (и аномального сопротивления), или формирование на магнитной силовой линии множества двойных электрических слоёв [3,4]. То есть даже при большой, но не бесконечной, электропроводности плазмы допускается существование продольного электрического поля E_z . Электрические токи в самых верхних слоях ионосферы и в большей части магнитосферы, в основном, параллельны магнитному полю (за исключением области вблизи экваториальной плоскости). Токи способны повлиять на движение плазмы, но всё же не настолько велики, чтобы очень сильно изменить геомагнитное поле на расстояниях от Земли, меньших 30000 км: с учётом магнитного давления от внутриземного диполя тепловое давление плазмы на орбите ИСЗ «Метеор-3М №1» значительно меньше магнитного давления. Это позволяет рассматривать плазму с полным продольным током $\{I_z, I_\phi, I_z \gg I_\phi\}$, создаваемым электронами с энергией более 40 кэВ, в бессиловом магнитном поле (электрический ток протекает вдоль магнитной силовой линии), которое имеет ϕ - и z -компоненты и является суперпозицией геомагнитного поля и поля продольного тока. На большом радиальном расстоянии r от тока ϕ -компонента магнитного поля $B_\phi = 2I_\phi/r$. Если направления электрического поля и тока совпадают, то в результате электрического дрейфа плазма движется внутрь по радиусу со скоростью:

$$\vec{v} = \frac{c}{B^2} [\vec{E} \times \vec{B}] \rightarrow v_r = -\frac{1}{c} \frac{E_z}{B_\phi} = -\frac{1}{c} \frac{E_z}{2I_\phi} r$$

Если электрическое поле антипараллельно току, то дрейф направлен наружу по радиусу. В отсутствие продольного электрического поля эффект пропадает: бессиловое магнитное поле не способствует и не противодействует сжатию тока (в бессиловом поле сила Ампера равна нулю). Как показывают наблюдения [6,9], продольные электрические поля направлены преимущественно вверх. Эффект изучался в работе [7]. Считая угол θ между магнитным полем и осью z функцией только радиуса r и учитывая, что в бессиловом магнитном поле векторы $\vec{i}$ и $\vec{B}$ параллельны, можно записать:

$$\frac{i_\phi}{i_z} = \frac{B_\phi}{B_z} = K(r) = \tan \theta$$

Учитывая также, что:

$$i_z = i_0 \cos^2 \theta, i_\phi = i_0 \cos \theta \sin \theta, i = \sqrt{i_z^2 + i_\phi^2} = i_0 \cos \theta$$

где i_0 - максимальная плотность тока в плазме, можно проинтегрировать по r компоненте уравнения Максвелла

$$\text{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{i} \rightarrow -\frac{dB_z}{dr} = \frac{4\pi}{c} i_\phi \rightarrow B_z = B_0 - \frac{4\pi}{c} \int_0^r i_\phi dr; \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r B_\phi) = \frac{4\pi}{c} i_z \rightarrow B_\phi = \frac{4\pi}{cr} \int_0^r i_z r dr$$

(где B_0 – напряжённость поля на оси) и получить уравнение на функцию $K(r)$:

$$\frac{4\pi i_0}{Kr} \int_0^r \frac{rdr}{1+K^2} + 4\pi i_0 \int_0^r \frac{Kdr}{1+K^2} = B_0 c$$

Выбирая в качестве единицы длины $b=B_0c/(4\pi i_0)$ и вводя безразмерное радиальное расстояние $x=r/b$, последнее уравнение приводится к безразмерному виду:

$$\frac{1}{Kx} \int_0^x \frac{xdx}{1+K^2} + \int_0^x \frac{Kdx}{1+K^2} = 1$$

Численное интегрирование этого уравнения [7] позволяет заключить, что характерный радиальный размер, на котором осуществляется процесс стягивания плазмы к оси, по порядку величины составляет $\sim b$. При вычислении параметра $b=B_0c/(4\pi i_0)$ (где B_0 – напряжённость поля на оси, а i_0 – максимальная плотность тока) учитываем, что B_0 [ед. СГСЭ] = $(79.6 \cdot 10^3/4\pi c) B_0$ [Гс], а плотность электрического тока в максимуме пика равна произведению заряда электрона ($e = 4.803 \cdot 10^{-10}$ ед. СГСЭ) на количество электронов с энергией ~ 40 кэВ, проходящих через единицу площади (в СГСЭ – 1 см^2) в единицу времени (в СГСЭ – секунда).

Если в течение 0.2 секунды счётчик фиксирует m импульсов, то за 1 секунду он зафиксирует $5m$ импульсов. При радиусе входного отверстия в защите счётчика МИП-1 ~ 0.5 мм площадь отверстия составляет $\pi \cdot 25 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, и если с этой площади фиксируется $5m$ импульсов в секунду, то с площади 1 см^2 будет зафиксировано $(m/5\pi) \cdot 10^4$ импульсов в секунду. Тангенс угла раствора, под которым электроны могут через отверстие в защите попадать непосредственно в счётчик, оценивается как $\sim 0.5 \text{ мм}/15 \text{ мм} = 0.033$ (из 15 мм толщина стенки кожуха составляет 1 мм, суммарная толщина прокладок – 2 мм, вогнутость входного окна счётчика – 2 мм), а сам угол $\sim 1.9^\circ$. Телесный угол при вершине прямого кругового конуса с углом раствора 1.9° составляет $2\pi(1-\cos 0.95^\circ) \approx 0.00027\pi$. При изотропном потоке частиц, если в телесном угле 0.00027π на площади 1 см^2 зафиксировано $(m/5\pi) \cdot 10^4$ импульсов в секунду, то в телесном угле 4π (то есть со всех направлений) на площади 1 см^2 было бы зафиксировано $(4\pi/0.00027\pi) \cdot (m/5\pi) \cdot 10^4$ импульсов в секунду, то есть $\sim (0.3m/\pi) \cdot 10^8$ импульсов в секунду. При движении по орбите со скоростью $\sim 7.35 \text{ км/сек}$ площадка шириной 1 см замечает площадь $\sim 7.35 \cdot 10^5 \text{ см}^2$, то есть неподвижный датчик площадью 1 см^2 зафиксировал бы со всех направлений (из телесного угла 4π) $(0.3m/7.35\pi) \cdot 10^3 \sim 13m$ импульсов в секунду. Таким образом, если в течение 0.2 секунды счётчик фиксирует m импульсов, то поток электронов из телесного угла 4π составляет $\sim 13m \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$. При величине скорости счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ в максимуме пика события, зафиксированной в течение временного интервала 0.2 сек., равной m всенаправленный поток электронов равен $13m \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1} \times 1 \text{ см}^2 = 13m \text{ сек}^{-1}$.

После попадания в счётчик Гейгера ионизирующей частицы в нём развивается газовый разряд, продолжающийся в течение некоторого времени τ . Если следующая частица попадёт в счётчик до окончания разряда, то новый разряд не произойдёт, и частица не будет зарегистрирована. Поэтому время τ называется «мёртвым временем», а число отсчётов меньше числа частиц, попадающих в счётчик (числа попаданий). Если интенсивность источника n постоянна и m – это среднее число отсчётов за единицу времени, то m и n связаны соотношением [2]:

$$m = \frac{n}{1+n\tau} \rightarrow n = \frac{m}{1-m\tau}$$

Согласно первой из этих формул, при возрастании интенсивности n число отсчётов m также растёт и при очень больших n приближается к своему предельному значению $m_{\max}=1/\tau$. Это предельное значение достигается при $n\tau \gg 1$, когда за время τ осуществляется очень много попаданий: по истечении времени τ после каждого отсчёта сейчас же происходит следующий отсчёт, так что все отсчёты следуют друг за другом через одинаковые временные интервалы τ . Оценки величины «мёртвого времени» для бортовых гейгеровских счётчиков ИСЗ «Метеор-3М №1» лежат в интервале $(1.2-1.5) \cdot 10^{-4}$ сек, и эта характеристика счётчиков оставалась достаточно стабильной в течение всего

времени работы спутника, несмотря на большую радиационную нагрузку на бортовую аппаратуру в этот период [1]. Поскольку поправка скорости счёта на мёртвое время учитывается формулой $n=m/(1-m\tau)$, где n – скорректированная скорость счёта, τ – мёртвое время, то рабочая формула для вычисления параметра b выглядит следующим образом:

$$b[с.м] \cong \frac{79.6}{4\pi^2 \times 4.803 \times 13} \times 10^{13} \frac{(1 - m[сек^{-1}] \times \tau[сек])}{m[сек^{-1}]} B[Гц]$$

При $m = 6 \cdot 10^3$, $\tau = 1.5 \cdot 10^{-4}$, $B = 0.35$ получаем в качестве оценки $b = 18.6$ км, что удовлетворительно (по порядку величины) согласуется с оценкой $7.35 \text{ км/сек} \times 2 \text{ сек} = 14.7 \text{ км}$, вытекающей непосредственно из данных наблюдений. При наблюдаемых потоках и скорости ($\sim 100000 \text{ км/сек}$) резонансных электронов их концентрация на несколько порядков величины меньше концентрации тепловых электронов космической плазмы на высотах ~ 1000 км. Это означает, что на масштабах, превышающих дебаевский радиус (несколько сантиметров), плазму можно считать электронейтральной и не учитывать пространственный заряд, вносимый высыпавшимися резонансными электронами.

Таким образом, механизм [7], предложенный первоначально для объяснения весьма распространённых в космической плазме волокнистых структур (волокнистые межзвёздные облака, корональные волокна, протуберанцы и т.д.), способен объяснить и сжатие к оси потоков высыпавшихся из внешнего радиационного пояса резонансных электронов с энергией ~ 40 кэВ. По результатам спутниковых наблюдений потоков высыпавшихся при нагреве ионосферы в эксперименте 19.04.2004-26.04.2004 резонансных электронов с энергией ~ 40 кэВ можно предложить следующий сценарий. Нагрев модулированным радиоизлучением приводил к модуляции проводимости Е-области ионосферы, где протекает авроральная электроструя. Это, в свою очередь, вызывало вариации электрического тока струи, и переменный ток излучал в магнитосферу электромагнитные волны на частоте модуляции (1-2 кГц). Связанная с распространяющимся в плазмосфере вдоль силовых линий геомагнитного поля низкочастотным электромагнитным излучением питч-угловая диффузия резонансных (~ 40 кэВ) электронов внешнего радиационного пояса способствовала высыпанию этих электронов вдоль геомагнитных силовых линий в атмосферу над областью нагрева и в районе магнитно-сопряжённой точки. Развивающаяся в процессе нагрева турбулентность ионосферной плазмы могла привести к формированию в зоне нагрева продольных электрических полей. О такой возможности свидетельствуют прямые измерения продольных электрических полей с борта ИСЗ «DEMETER» в других экспериментах по нагреву ионосферы с использованием стенда HAARP [8]. Присутствие продольных электрических полей обеспечило (за счёт электрического дрейфа) сжатие к оси потоков высыпавшихся из внешнего радиационного пояса резонансных электронов с энергией ~ 40 кэВ, зафиксированное по данным бортовых радиометрических измерений ИСЗ «Метеор-3М №1».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во всех 8 случаях пролёта ИСЗ «Метеор-3М №1» в районе стенда или магнито-сопряжённой точки в период 02:00-15:00 UT 19.04.2004-26.04.2004 наблюдался узкий по времени (двухсекундный) пик скорости счёта электронов с энергией ~ 40 кэВ. Скорость счёта в этом пике как минимум на порядок превосходила своё фоновое значение. Возрастание геомагнитной активности по a_p - индексу влекло за собой увеличение амплитуды пика скорости счёта. Узость пика скорости счёта могла быть связана с наличием на орбите продольных электрических полей, возникающих при нагреве ионосферы и обеспечивающих (за счёт электрического дрейфа) сжатие к оси потоков высыпавшихся из внешнего радиационного пояса резонансных электронов с энергией ~ 40 кэВ.

Авторы признательны Б.В. Марьину и В.М. Фейгину за создание комплекса аппаратуры МСГИ-5ЕИ, данные измерений которого использованы в нашей работе, и благодарят М.А. Савельева и П.М. Свидского за полезные обсуждения.

OUTER RADIATION BELT RESONANT ELECTRON PRECIPITATION OBSERVATIONS ONBOARD “METEOR-3M #1” SATELLITE DURING IONOSPHERE HEATING EXPERIMENT IN APRIL, 19 - APRIL, 26, 2004

Davidov V.E., Zinkina M.D., Pisanko Yu.V.

Outer radiation belt resonant electron precipitation events observed onboard “Meteor-3M #1” satellite during ionosphere heating experiment with the HAARP facility in April, 19 – April, 26, 2004 are studied in detail.

KEYWORDS: “METEOR-3M #1” SATELLITE; OUTER RADIATION BELT RESONANT ELECTRON PRECIPITATION EVENT; PARALLEL ELECTRIC FIELD.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдюшин С.И., Важенин А.А., Гинзбург Е.А., Денисова В.И., Зинкина М.Д., Минлигареев В.Т., Нусинов А.А., Пероев А.Н., Писанко Ю.В., Свидский П.М., Юдкевич И.С. Измерения характеристик потоков ионизирующих излучений околоземного космического пространства на спутнике гидрометеорологического назначения «Метеор-3М» // Специальная техника. 2014. №1. С. 44-53.
2. Гольдманский В.И., Куценко А.В., Погорельский М.И. Статистика отсчётов при регистрации ядерных частиц, М.: Физматгиз, 1959. 413 с.
3. Block L.P. Three-dimensional potential structure above auroral arcs // ESA SP-183. 1983. P.247-252.
4. Collin H.L., Sharp R.D., Shelley E.G. The occurrence and characteristics of electron beams over the polar regions // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87. P.7504-7511.
5. Inan U. S., Golkowski M., Carpenter D. L., Reddell N., Moore R. C., Bell T. F., Paschal E., Kossey P., Kennedy E., Meth S. Z. Multi-hop whistler-mode ELF-VLF signals and triggered emissions excited by the HAARP HF heater // Geophysical Research Letters. 2004. Vol. 31. P. L24805. doi:10.1029/2004GL021647.
6. Mozer F.S., Temerin M. Solitary waves and double layers as the source of parallel electric fields in the auroral acceleration region // High-Latitude Space Plasma Physics (ed. B. Hultqvist, T. Hagfors), Plenum Press. New York. 1983. P.453-460.
7. Murty G.S. Filamentary structure associated with force-free magnetic fields // Ark. f. fys. 1961. Vol. 21. P.203-212.
8. Streltsov A.V., Chang C.-L., Labenski J., Milikh G., Vartanyan A., Snyder A.L. Excitation of the ionospheric Alfvén resonator from the ground: theory and experiment // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116. P.A10221. doi: 10.1029/2011JA016680.
9. Temerin M., Cerny K., Lotko W., Mozer F.S. Observations of double layers and solitary waves in the auroral plasma // Phys. Rev. Lett. 1982. Vol. 48. P.1175-1179.