

ВЫСЫПАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2017 г. Г. А. Базилевская^{1,*}, М. С. Калинин¹, А. Н. Квашнин¹, М. Б. Крайнев¹,
В. С. Махмутов¹, А. К. Свиржевская¹, Н. С. Свиржевский¹,
Ю. И. Стожков¹, Ю. В. Балабин², Б. Б. Гвоздевский²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), г. Москва

²Полярный геофизический институт КНЦ РАН (ПГИ), г. Апатиты (Мурманская обл.)

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

Поступила в редакцию 13.04.2016 г.

После доработки 28.04.2016 г.

С 1957 года по настоящее время ФИАН проводит регулярный мониторинг ионизирующей радиации в атмосфере Земли. В полярных широтах наблюдаются случаи вторжения в атмосферу рентгеновского излучения, генерируемого высокоэнергичными магнитосферными электронами. Эти случаи в подавляющем большинстве происходили на фоне высокоскоростных потоков солнечного ветра, тогда как возмущения магнитосферы, связанные с межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ), не эффективны для высыпаний. В работе показано, что МКВМ не приводят к ускорению электронов в магнитосфере в достаточном количестве. Благоприятные условия для ускорения электронов и последующего рассеяния в конус потерь создаются магнитными бурями с длительной фазой восстановления и с достаточно частыми интервалами отрицательной B_z компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Такие геомагнитные возмущения характерны для бурь, связанных с высокоскоростными потоками солнечного ветра.

DOI: 10.7868/S001679401702002X

1. ВВЕДЕНИЕ

Высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ) из магнитосферы являются следствием возмущений магнитосферы под действием солнечного ветра. Динамическая связь магнитосферы и солнечного ветра приводит как к ускорению электронов и пополнению внешнего радиационного пояса, так и к рассеянию электронов в конус потерь и к последующему высыпанию в атмосферу [например, Reeves et al., 2003]. Считается, что ВВЭ являются основным, но не единственным механизмом опустошения внешнего радиационного пояса [Millan and Thorne, 2007]. Деформация магнитосферы во время геомагнитных возмущений может привести к тому, что ранее замкнутые дрейфовые оболочки радиационного пояса становятся открытыми, пересекаясь с магнитопаузой, при этом электроны уходят во внешнее пространство [Shprits et al., 2006; Lazutin, 2014]. Изменения магнитосферы во время геомагнитных бурь приводят к адиабатическим перемещениям популяции электронов, которые на спутниках наблюдаются как временные уменьшения потоков частиц — так называемый *Dst*-эффект [Millan and Thorne, 2007; Лазутин, 2012]. Орбитальные аппа-

раты, наблюдающие динамику электронов в магнитосфере, не всегда могут определить, какая часть электронов высыпалась в атмосферу, для этого нужны измерения в атмосфере. Между тем, это имеет не только фундаментальный, но также прикладной интерес. Электроны оказывают критическое влияние на аппаратуру спутников, создавая электростатические поверхностные и внутренние поля, энергичные частицы повреждают элементы бортовой аппаратуры [Horne et al., 2013]. Дополнительная ионизация, создаваемая высыпавшимися электронами в ионосфере, нарушает условия распространения радиосигналов [Clilverd et al., 2008]. Энергичные электроны участвуют на высотах выше 60 км в ион-молекулярных реакциях, генерирующих нечетный азот NO_x и нечетный водород HO_x [Mironova et al., 2015]. Соединения NO_x являются долгоживущими, они участвуют как катализаторы в циклах реакций, приводящих к разрушению озона в средней атмосфере и образованию озона ниже тропопавзы. Изменения содержания озона ведут к изменениям температурного режима и динамики атмосферных вихрей. Таким образом, прослеживается влияние дополнительных потоков NO_x ,

связанных с ВВЭ, на погоду и климат [Криволуцкий и Репнев, 2009, 2012; Rozanov et al., 2012; Serpälä et al., 2015]. Кратковременное, но очень сильное разрушение озона до 90% на высотах 60–80 км может происходить при участии соединений HO_x [Andersson et al., 2014]. В течение 11-летнего солнечного цикла ВВЭ ответственны за вариации содержания озона до 34% [Andersson et al., 2014].

В последние десятилетия в научном мире предприняты большие усилия, чтобы понять природу ВВЭ. В околоземном пространстве информация о магнитосферных электронах накоплена космическими аппаратами IMP, SAMPEX, GOES, POES, КОРОНАС-Ф, ВЕРНОВ/РЭЛЕК. В 2012 г. были запущены 2 аппарата Van Allen probe [Spence et al., 2013], главная задача которых — количественно обосновать процессы накопления и потерь частиц в радиационных поясах. Проведены специальные кампании баллонных измерений MAXIS, MINIS, BARREL [Millan et al., 2002; Woodger et al., 2015], чтобы регистрировать ВВЭ одновременно в магнитосфере и в атмосфере. Результатом этих исследований стало выявление большой вариабельности потоков электронов в радиационном поясе, отражающей сложность и многообразие процессов их ускорения и потерь. В настоящее время многие вопросы, относящиеся к происхождению наблюдаемых ВВЭ и классификации их основных характеристик, остаются открытыми.

Физический институт имени П.Н. Лебедева (ФИАН) обладает долговременным рядом данных о высыпаниях магнитосферных электронов в атмосферу, охватывающих наблюдения с 1961 г. по настоящее время. Необходимо осмыслить эти данные в рамках современных представлений о ВВЭ. В данной работе изучается связь ВВЭ, зарегистрированных ФИАН, с сопутствующими характеристиками солнечного ветра.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

В 1957 г. ФИАН начал долговременный эксперимент по изучению потоков заряженных частиц в атмосфере Земли [Чарахчян, 1964; Stozhkov et al., 2009], который продолжается до настоящего времени. Целью эксперимента является мониторинг вторичных космических лучей (КЛ) на разных широтах и высотах в атмосфере и исследование влияния солнечной активности на космическое излучение. Основной вклад в наблюдаемые потоки частиц дают галактические космические лучи (ГКЛ), но на высоких широтах фиксируются также возрастания потоков частиц, связанные с вторжениями в атмосферу солнечных космических лучей (СКЛ) и высыпаниями магнитосферных электронов [Bazilevskaya and Svirzhevskaya, 1998; Makhmutov et al., 2003]. Детек-

тор, поднимаемый радиозондом на аэрологических оболочках, состоит из 2 газоразрядных счетчиков, прослоенных алюминиевым фильтром. Регистрируется темп счета верхнего счетчика (протоны с энергией $E \geq 5$ МэВ, электроны с $E \geq 200$ кэВ, мюоны с $E \geq 1$ МэВ, рентгеновское излучение с $E \geq 20$ кэВ) и телескопа (протоны с $E \geq 30$ МэВ, электроны с $E \geq 5$ МэВ и мюоны с $E \geq 15$ МэВ). Галактические КЛ при прохождении через атмосферу генерируют ядерно-электромагнитные каскады и образуют переходную кривую (зависимость интенсивности частиц от глубины в атмосфере) с максимумом на высотах ~ 18 –24 км. Солнечные КЛ с энергиями меньше 1 ГэВ поглощаются в атмосфере за счет потерь на ионизацию, в сумме с ГКЛ они дают излучение, практически монотонно уменьшающееся с глубиной в атмосфере. Как ГКЛ, так и СКЛ дают вклад в темпы счета одиночного счетчика и телескопа. Электроны, высыпающиеся из магнитосферы, поглощаются на высотах 50–70 км и непосредственно не регистрируются радиозондом. Но они генерируют тормозное рентгеновское излучение, которое детектируется одиночным счетчиком при конверсии рентгеновского фотона в стальной стенке счетчика. Чувствительность счетчика к рентгеновскому излучению не превышает 1%, но этого оказалось достаточно для надежной регистрации ВВЭ. С 1961 г. по настоящее время было зарегистрировано более 500 случаев ВВЭ. Радиозонд может подняться до высот ~ 30 км, на эти высоты проникает рентгеновское излучение с энергией ~ 500 –1000 кэВ. В то же время мы иногда регистрируем ВВЭ на высотах < 20 км, куда могут проникнуть рентгеновские кванты, генерированные электронами с энергией выше 5 МэВ.

За редким исключением, ВВЭ зарегистрированы в северных полярных широтах, в основном в Мурманской обл. (параметр Мак Иллвайна $L = 5.5$). Измерения проводятся также в Антарктиде, но с 1963 г. по настоящее время там зарегистрировано только 11 случаев ВВЭ, т.к. пункт наблюдения, станция Мирный находится в полярной шапке ($L \sim 20$). Таким образом, в эксперименте ФИАН мы наблюдаем ВВЭ из внешнего радиационного пояса (ВРП) Земли. В течение нескольких лет измерения ВВЭ производились в Норильске и Тикси, но данный анализ охватывает только измерения в Мурманской области [Makhmutov et al., 2016].

Важно подчеркнуть, что в отличие от космических аппаратов, которые фиксируют сброс электронов как в атмосферу, так и в межпланетную среду, мы наблюдаем только ВВЭ в атмосфере. Наши измерения регистрируют вторичное излучение в основном от электронов с $E > 1$ МэВ; место наблюдений остается практически постоянным (68.92° N , 33.05° E с 1957 г. по 2002 г., 67.55° N , 33.33° E с 2002 г. по настоящее время); местное

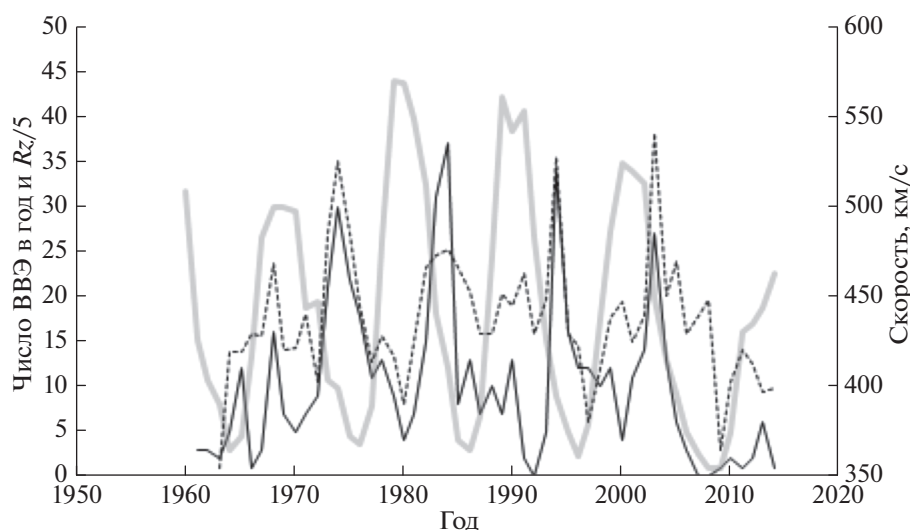


Рис. 1. Годовые значения числа высыпаний высокоэнергичных электронов в атмосферу в Мурманской обл. (сплошная черная линия), среднегодовой скорости солнечного ветра (пунктирная линия) и числа солнечных пятен в масштабе 1/5 (светло-серая линия).

время наблюдений в разные периоды было 8–11 LT или 13–18 LT. Радиозонд находился на высотах, куда проникают рентгеновские кванты от ВВЭ, не более получаса. Запуски радиозондов проводились ежедневно с 1957 по 1991 г. С 1991 г. по настоящее время запуски радиозондов производятся 3 раза в неделю.

Анализ зависимости частоты ВВЭ от фазы 11-летнего цикла показал, что максимальное число случаев ВВЭ наблюдается на фазе спада солнечной активности [Bazilevskaya and Svirzhevskaya, 1998; Makhmutov et al., 2003, 2005]. Аналогичное поведение обнаруживают коротирующие высокоскоростные потоки солнечного ветра (СВ), тогда как возмущения, связанные с корональными выбросами массы (КВМ), наиболее часто происходят в фазе максимума 11-летнего цикла [Richardson and Cane, 2012]. В данной статье мы пытаемся понять, почему возмущения, связанные с корональными выбросами массы, не эффективны для генерации ВВЭ. Это может быть следствием либо недостаточного ускорения, либо недостаточного рассеяния высокоэнергичных электронов в конус потерь.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В анализ вошли данные 3-минутных усреднений темпа счета гейгеровского счетчика для ВВЭ, вошедших в Каталог [Makhmutov et al., 2016]. Подтверждением тесной связи между высокоскоростными потоками СВ и ВВЭ служит рис. 1, где показан временной ход частоты ВВЭ, скорости солнечного ветра V ([ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/](http://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/)

[omni/low_res_omni/](http://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/)) и числа солнечных пятен (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>). На рисунке видна корреляция со скоростью СВ: коэффициент корреляции $R(\text{ВВЭ}, V) = 0.69$. Хотя в годы максимума солнечной активности случаи ВВЭ также наблюдаются, в целом, корреляция с числом солнечных пятен отсутствует: $R(\text{ВВЭ}, R_z) = -0.11$. Следует заметить, что начиная с 1991 г. частота запусков радиозондов сократилась до 3-х раз в неделю, так что уменьшению числа ВВЭ в последние годы нельзя придавать значения. Этот вопрос будет обсуждаться в дальнейших работах.

Для исследования связи ВВЭ с различными характеристиками СВ ([ftp://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/](http://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/)) использовался метод наложения эпох, где за нуль-день принимался день регистрации ВВЭ. Параллельно такой же анализ был выполнен для геомагнитных возмущений, связанных с КВМ [<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>]. Принятое в литературе название таких возмущений ICME — межпланетные КВМ (МКВМ). Результаты анализа представлены на рис. 2–5, где левые панели относятся к ВВЭ, а правые панели — к МКВМ. Последние, согласно [Richardson and Cane, 2012], включают в себя магнитные облака и сопутствующие области сжатия солнечного ветра.

Следует отметить, что результаты, относящиеся к ВВЭ (левые панели), включают в себя все случаи ВВЭ, в том числе и те, хотя и немногочисленные, которые были связаны с МКВМ. В результаты на правых панелях вошли случаи ВВЭ, если они совпадали с МКВМ, но таких случаев было мало, согласно рис. 1. Кроме того, результаты, относящиеся к ВВЭ (левые панели), охваты-

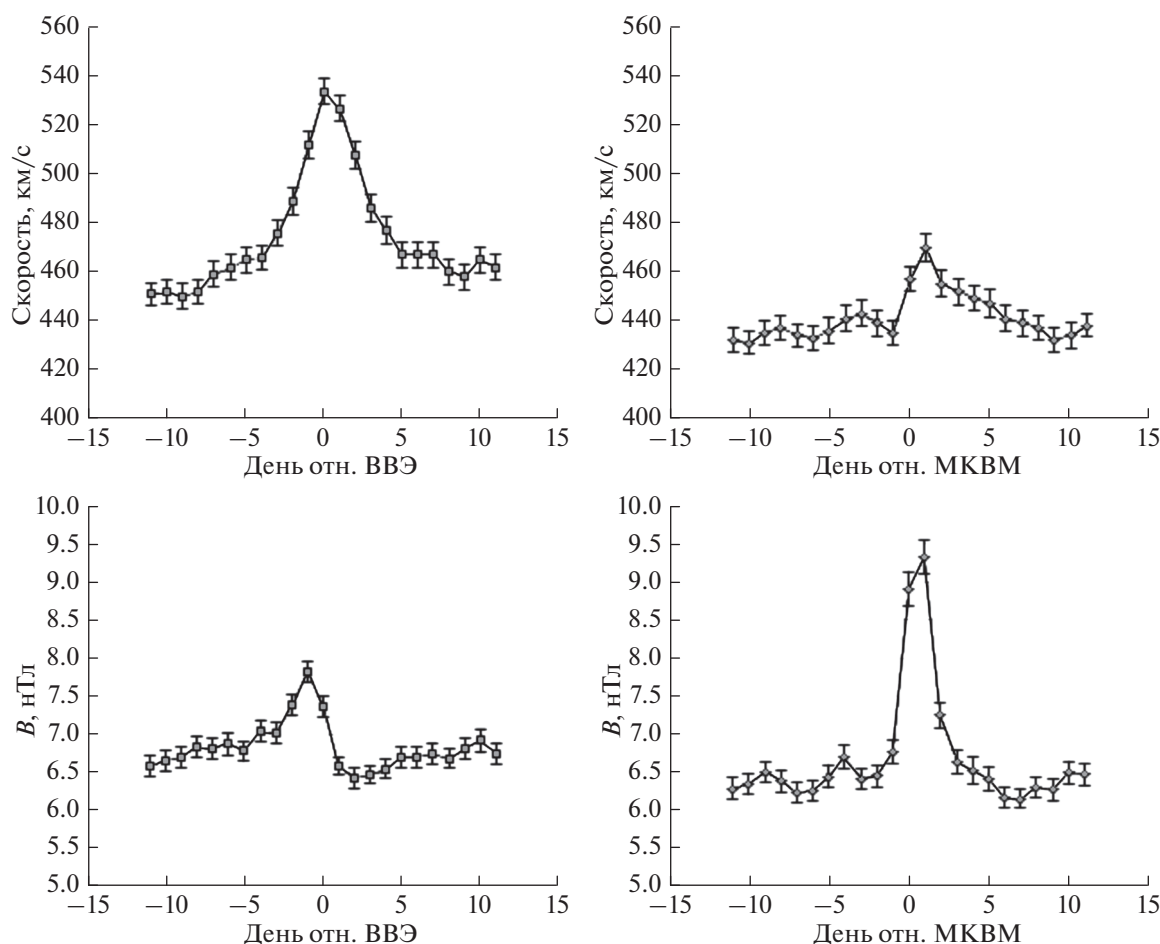


Рис. 2. Результаты метода наложения эпох для высыпаний высокоэнергичных электронов (ВВЭ, слева) и для возмущений, связанных с корональными выбросами массы, (МКВМ, справа). Верхние панели — скорость солнечного ветра V , нижние панели — индукция межпланетного магнитного поля B .

вают период времени с 1965 г. (начало регулярных наблюдений солнечного ветра), а результаты, относящиеся к МКВМ (правые панели) — период времени с 1996 г., включенный в каталог МКВМ. Обработка массива ВВЭ с 1996 г. ухудшает статистическую точность результатов, но не меняет их качественно. Рисунки 2–5 демонстрируют свойства возмущений солнечного ветра, эффективные (слева) и неэффективные (справа) для ВВЭ, и показывают, что эти свойства различны.

Характеристики солнечного ветра, связанные с ВВЭ, обладают известными свойствами высокоскоростных потоков [например, Borovsky and Denton, 2006; Yermolaev et al., 2015]: сильным увеличением скорости, V , и умеренным повышением индукции ММП, B , тогда как для МКВМ соотношение V и B обратное (рис. 2). В день прохождения МКВМ наблюдается скачок плотности и давления СВ (рис. 3, правые панели). На верхней левой панели рис. 3 видно уменьшение плотности СВ, отражающее область разрежения за фронтом высокоскоростного потока. В действительности

перед высокоскоростным потоком СВ тоже существует положительный скачок плотности, но он не проявился на рис. 3 из-за малой длительности. Давление вблизи ВВЭ слабо возрастает (рис. 3), а температура солнечного ветра увеличивается значительно, тогда как для МКВМ изменение температуры почти не заметно (рис. 4, верхние панели).

Существенная разница наблюдается в поведении B_z компоненты межпланетного магнитного поля (рис. 4, нижние панели): для ВВЭ оно падает сильнее и медленнее возвращается на невозмущенный уровень. Этот факт свидетельствует о более благоприятных условиях пересоединения магнитосферного и межпланетного магнитных полей, сопутствующих ВВЭ [Owens et al., 2005]. Индекс Dst (верхние панели рис. 5) варьирует сильнее для МКВМ; известно, что эти возмущения чаще связаны с мощными магнитными бурями [Richardson and Cane, 2012]. В этом случае наблюдается резкое уменьшение Dst в нулевой день и достаточно быстрое возвращение к невозму-

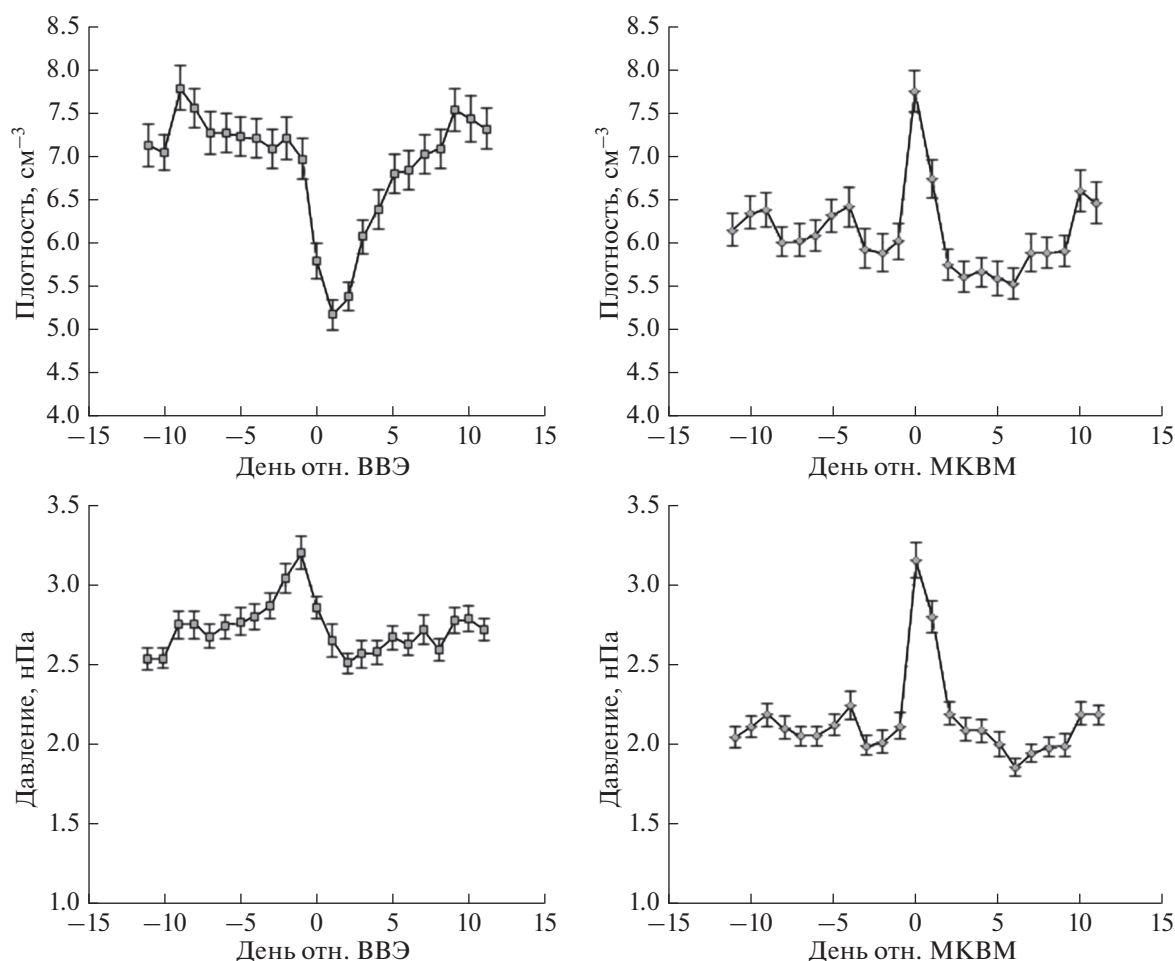


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для плотности плазмы (верхние панели) и давления (нижние панели).

щенному уровню. Вариация Dst для ВВЭ имеет очень широкую форму. Это происходит потому, что несколько ВВЭ имеют место в пределах 10 дней, дата одного и того же события используется как нуль-день, а кроме того, фигурирует в предыдущие и последующие дни при наложении эпох. Для МКВМ это происходит редко. AE -индекс, не показанный на рисунках, ведет себя аналогично Dst , но в противофазе.

Кроме параметров СВ, были обработаны данные о суточном флюенсе электронов с энергией $E > 2$ МэВ, полученные на геостационарном спутнике GOES [http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/sateenvi.html#electrons]. Эти данные могут рассматриваться как мера заполнения релятивистскими электронами внешнего радиационного пояса Земли. Результаты, показанные на нижних панелях рис. 5, можно интерпретировать следующим образом. С ВВЭ связано преимущественное пополнение внешнего радиационного пояса, т.е. процессы ускорения преобладают над процессами потерь, тогда как при МКВМ процессы накопления и потерь электронов близки к равнове-

сию, и в среднем флюенс электронов практически не меняется. Отсюда можно сделать вывод, что высыпания высокоэнергичных электронов во время геомагнитных возмущений, связанных с корональными выбросами масс, не наблюдаются в эксперименте ФИАН, потому что при этих возмущениях количество ускоренных электронов не достаточно. Дополнительное подтверждение этого можно видеть на рис. 6, где представлены нормированные распределения флюенсов электронов с $E > 2$ МэВ для дней, когда наблюдались ВВЭ, и для всех дней за время наблюдений с 1987 г. по 2014 г. В среднем ВВЭ наблюдаются при больших значениях флюенсов электронов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наполненность внешнего радиационного пояса электронами — результат конкурирующих процессов ускорения электронов и их потерь. Ускорение электронов в магнитосфере происходит за счет регулярного и стохастического механизмов [Antonova et al., 2008]. Геомагнитные воз-

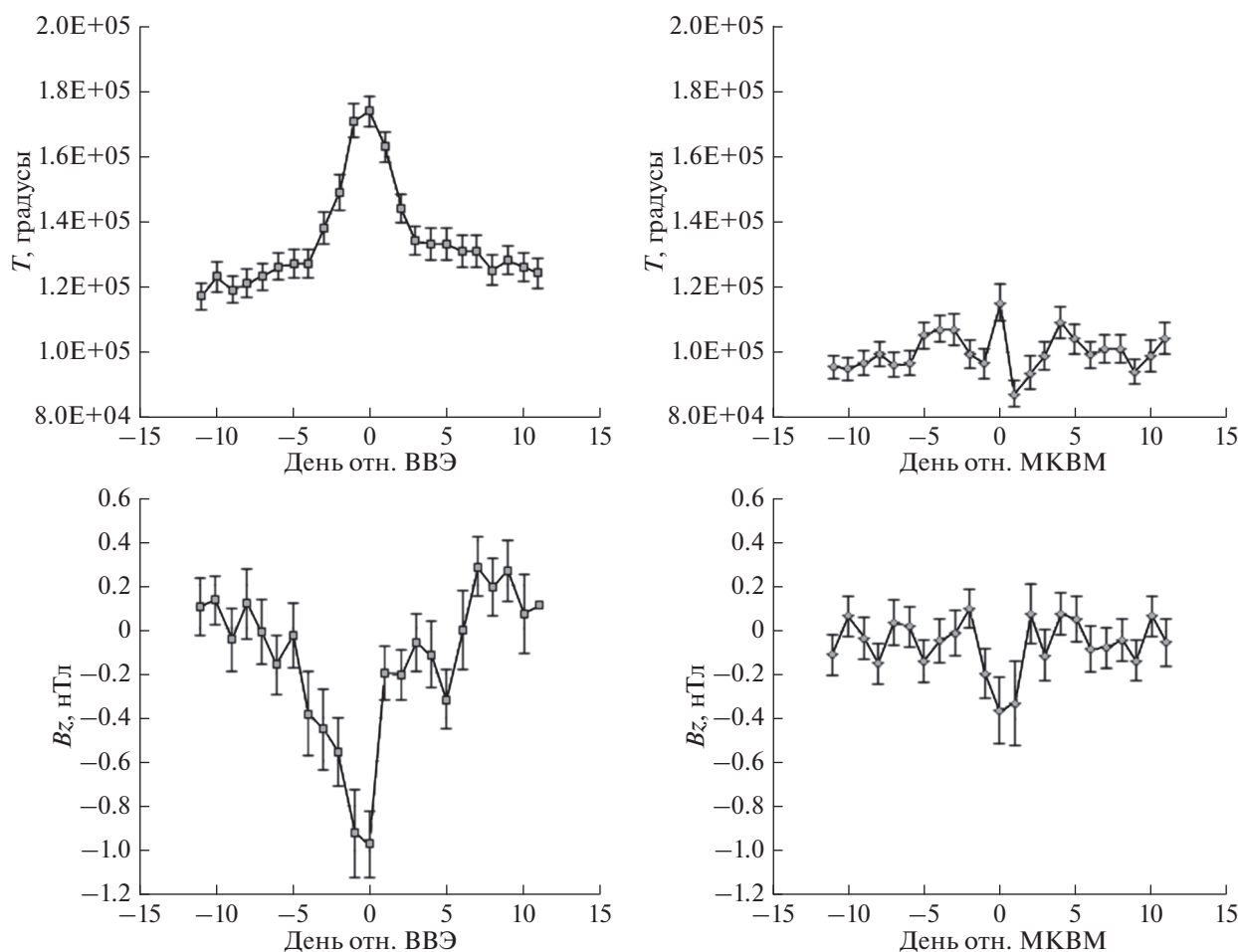


Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для температуры (верхние панели) и B_z компоненты ММП (нижние панели).

мушения приводят к регулярным изменениям интенсивности энергичных электронов во внешнем радиационном поясе, часть из которых может носить неадиабатический характер [McAdams and Reeves, 2001]. Во время главной фазы бури наблюдается Dst -эффект [Лазутин, 2012] — адиабатическое понижение наблюдаемой интенсивности электронов во время минимума Dst , которое можно видеть на нижней правой панели рис. 5 (нульдни — МКВМ). В последующие дни интенсивность электронов превосходит их уровень, наблюдаемый до бури. Это свидетельствует о вкладе неадиабатических процессов, хотя этот эффект мал. На нижней левой панели рис. 5, относящейся к ВВЭ, адиабатического понижения флюенса электронов вообще не видно, что указывает на важный вклад неадиабатических процессов уже во время главной фазы бури, приводящей к ВВЭ. Наши данные не позволяют ответить на вопрос, каков мог быть вклад регулярных и стохастических процессов ускорения. Некоторые указания дает главная особенность возмущений СВ, связанных с ВВЭ, — длительность геомагнитного

возмущения, которую демонстрируют параметры B_z , Dst и AE . Этот результат совпадает с выводом, сделанным на основе анализа трех геомагнитных бурь в работе [Sandanger et al., 2009]: значительные ВВЭ происходят во время бурь с длительной фазой восстановления (это могут быть бури, связанные с высокоскоростными потоками СВ, или с МКВМ); бури с короткой фазой восстановления не приводят к ВВЭ, из-за низкой интенсивности электронов в радиационном поясе. Согласно современным представлениям [например, Owens et al., 2005], отрицательное поле B_z обеспечивает пересоединение магнитных силовых линий магнитосферы и ММП, а VB_z , где V — скорость солнечного ветра, является мерой энергии, переданной солнечным ветром магнитосфере. Энергия, которую получает магнитосфера из солнечного ветра, расходуется на генерацию волн, которые могут ускорять электроны, а также рассеивать их, приводя к высыпаниям в атмосферу. Пологий ход Dst индекса в дни после наблюдения ВВЭ (верхняя левая панель рис. 5) отражает тот факт, что ВВЭ происходят в течение нескольких

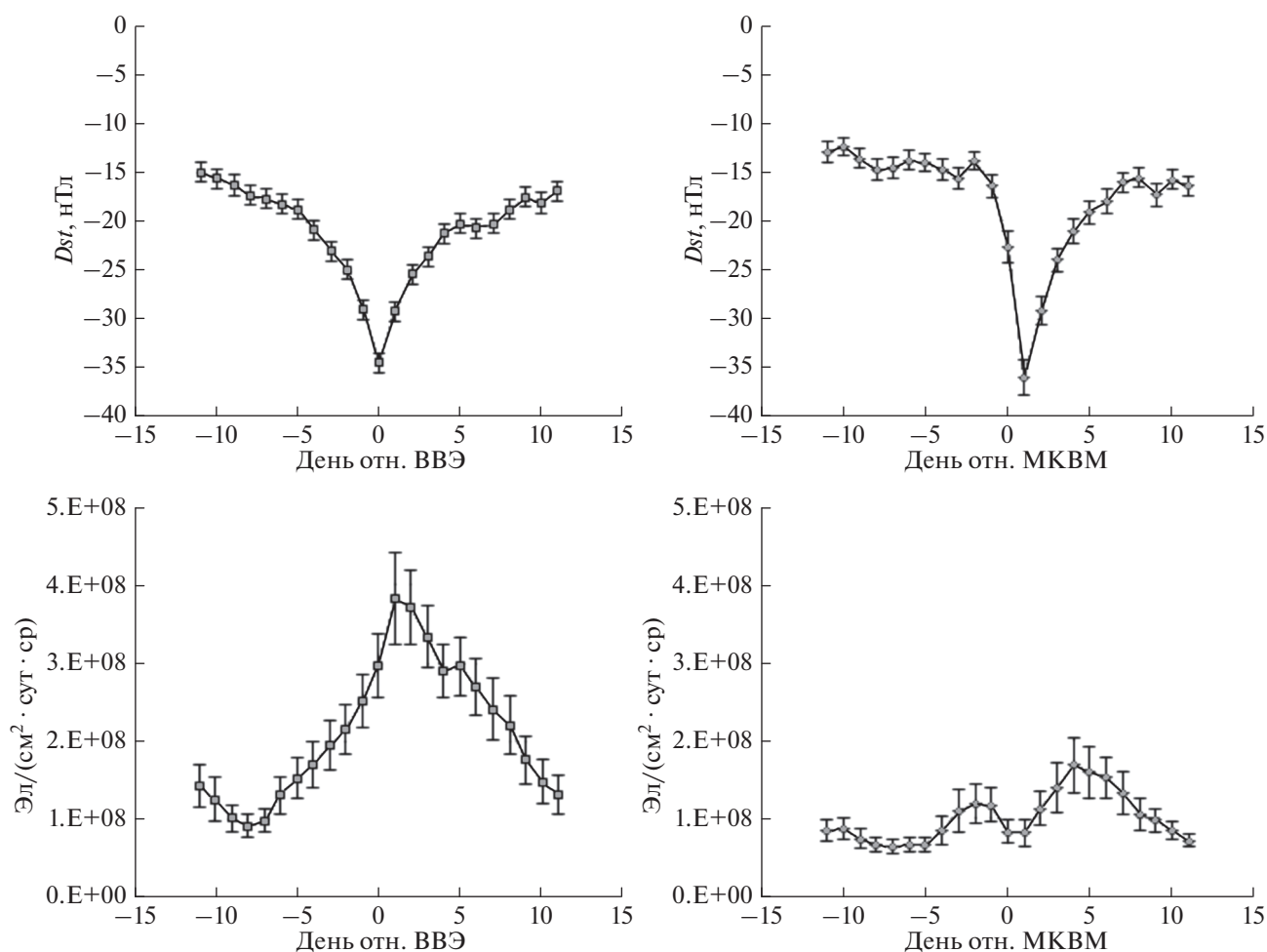


Рис. 5. То же, что на рис. 2, но для *Dst*-индекса (верхние панели) и флюенса электронов с $E > 2$ МэВ по измерениям геостационарного спутника GOES (нижние панели).

дней после главной фазы, в чем можно убедиться, анализируя конкретные случаи ВВЭ.

Геомагнитное возмущение развивается в результате усиленного поступления энергии СВ в магнитосферу на фоне отрицательного значения B_z компоненты ММП. При этом генерируются в магнитосфере или заносятся из ММП разные типы волн ОНЧ и УНЧ диапазона, в частности, шипения, хоры и электромагнитные ион-циклотронные волны [Thorne et al., 2013]. В результате взаимодействия волна-частица все эти типы волн могут ускорять электроны или рассеивать их в конус потерь. Процесс ускорения за счет взаимодействия волна-частица может протекать в течение нескольких суток [Rodger et al., 2010]. Большинство сценариев предполагает, что в ускорении участвуют в основном хоры, а рассеяние происходит в основном при взаимодействии с электромагнитными ион-циклотронными волнами [Lorentzen et al., 2000; Horne et al., 2009].

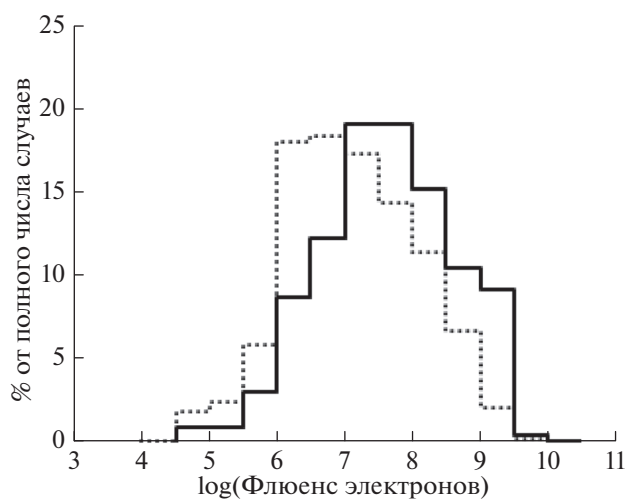


Рис. 6. Распределение величин флюенсов электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите. Сплошная линия — флюенс в день ВВЭ, пунктир — флюенс во все дни измерений в 1987–2014 гг.

В накопленной базе данных ФИАН о ВВЭ могут присутствовать высыпания разного происхождения. Но в среднем, наиболее вероятным механизмом, приводящим к высыпаниям, является ускорение электронов на волнах, генерируемых в магнитосфере во время длительной фазы восстановления магнитной бури, и их рассеяние в конус потерь ион-циклотронными волнами. Необходимым условием ускорения являются достаточно длительные промежутки времени с отрицательным значением B_z , что обеспечивает поступление необходимой энергии в магнитосферу. Короткая длительность геомагнитных возмущений, связанных с корональными выбросами массы, не обеспечивает ускорения достаточного количества электронов и, как правило, не приводит в ВВЭ.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 16-02-00100, № 14-02-00905). Авторы выражают благодарность научным группам, предоставляющим свои данные через интернет: WDC-SILSO (Royal Observatory of Belgium, Brussels); GSFC/SPDF (OMNIWeb); NOAA NCEI (данные по электронам радиационного пояса), а также составителям Каталога МКБМ I. Richardson и H. Cane.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кривоуцкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 386 с. 2009.
- Кривоуцкий А.А., Репнев А.И. Воздействие космических энергичных частиц на атмосферу Земли // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 52. № 6. С. 723–754. 2012.
- Лазутин Л.Л. Мировые и полярные магнитные бури. Москва: МГУ. 213 с. 2012.
- Чарахчян А.Н. Исследование флуктуаций интенсивности космических лучей в стратосфере, вызываемых процессами на Солнце // УФН. Т. 83. № 1. С. 35–62. 1964.
- Andersson M.E., Verronen P.T., Rodger C.J., Clilverd M.A., Seppälä A. Missing driver in the Sun–Earth connection from energetic electron precipitation impacts mesospheric ozone // Nature communications. V. 5. № 10. 5197. 2014. doi 10.1038/ncomms6197
- Antonova E.E., Bahareva M.F., Kirpichev I.P. et al. Regular and turbulent mechanisms of relativistic electron acceleration in the magnetosphere of the Earth: Theoretical treatment and results of experimental observations // Proc. 21st ECRS. 9–12 Sep. 2008. Kosice. Slovakia. Kosice: Institute of Experimental Physics. P. 17–26. 2008.
- Bazilevskaya G.A., Svirzhetskaya A.K. On the stratospheric measurements of cosmic rays // Space Sci. Rev. V. 85. № 3–4. P. 431–521. 1998.
- Blum L., Li X., Denton M. Rapid MeV electron precipitation as observed by SAMPEX/HILT during high-speed stream-driven storms // J. Geophys. Res.: Space Phys. V. 120. № 5. P. 3783–3794. 2015. doi 10.1002/2014JA020633
- Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res.: Space Phys. V. 111. № 7. A07S08. 2006. doi 10.1029/2005JA011447
- Clilverd M.A., Rodger C.J., Brundell J. et al. Energetic electron precipitation during substorm injection events: High-latitude fluxes and an unexpected midlatitude signature // J. Geophys. Res.: Space Phys. V. 113. № 10. A10311. 2008. doi 10.1029/2008JA013220
- Horne R.B., Lam M.M., Green J.C. Energetic electron precipitation from the outer radiation belt during geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 36. № 19. L19104. 2009. doi 10.1029/2009GL040236
- Horne R.B., Glauert S.A., Meredith N.P., Boscher D., Maget V., Heynderickx D., Pitchford D. Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST // Space Weather. V. 11. № 4. P. 169–186. 2013. doi 10.1002/swe.20023
- Lazutin L.L. Problem of electron disappearance during the magnetic storm main phase: Relation to the downburst asymmetry of energetic electron radiation belt // Physics of Auroral Phenomena. Proceedings of XXXVII Annual Seminar. 25–28 Feb. 2014. Apatity. ISBN 978-5-91137-286-6. Kola Science Centre, Russian Academy of Science. P. 26–28. 2014.
- Lorentzen K.R., McCarthy M.P., Parks G.K. et al. Precipitation of relativistic electrons by interaction with electromagnetic ion cyclotron waves // J. Geophys. Res.: Space Phys. V. 105. № 3. P. 5381–5389. 2000.
- Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B. Characteristics of energetic electron precipitation into the Earth's polar atmosphere and geomagnetic conditions // Adv. Space Res. V. 31. № 4. P. 1087–1092. 2003. doi 10.1016/S0273-1177(02)00814-1
- Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I., Svirzhetskaya A.K., Svirzhetsky N.S. Long-term balloon cosmic ray experiment: Results of analysis of energetic electron precipitation events // Intern. J. Modern Phys. A. V. 20. № 29. P. 6843–6845. 2005. doi 10.1142/S0217751X05030260
- Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I., Svirzhetskaya A.K., Svirzhetsky N.S. Catalogue of electron precipitation events as observed in the long-duration cosmic ray balloon experiment // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 149. P. 258–276. 2016. http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.12.006.
- McAdams K.L., Reeves G.D. Non-adiabatic response of relativistic radiation belt electrons to GEM magnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 28. № 9. P. 1879–1882. 2001.
- Millan R.M., Lin R.P., Smith D.M., Lorentzen K.R., McCarthy M.P. X-ray observations of MeV electron precipitation with a balloon-borne germanium spectrometer // Geophys. Res. Lett. V. 29. № 24. 2194. P. 47/1–4. 2002. doi 10.1029/2002GL015922
- Millan R.M., Thorne R.M. Review of radiation belt relativistic electron losses // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. № 3. P. 362–377. 2007. doi 10.1016/j.jastp.2006.06.019
- Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F., Bazilevskaya G.A. et al. Energetic particle influence on the Earth's atmosphere // Space Sci. Rev. V. 194. № 1–4. P. 1–96. 2015. doi 10.1007/s11214-015-0185-4
- Owens M.J., Cargill P.J., Pagel C., Siscoe G.L., Crooker N.U. Characteristic magnetic field and speed properties of interplanetary coronal mass ejections and their sheath regions //

- J. Geophys. Res.: Space Phys. V. 110. № 1. A01105. 2005. doi 10.1029/2004JA010814
- *Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P.* Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* V. 30. № 10. 1529. 2003. doi 10.1029/2002GL016513
- *Richardson J.G., Cane H.V.* Solar wind drivers of geomagnetic storms during more than four solar cycles // *J. Space Weather Space Clim.* V. 2. A01. 2012. doi 10.1051/swsc/2012001
- *Rodger C.J., Clilverd M.A., Green J.C., Lam M.M.* Use of POES SEM-2 observations to examine radiation belt dynamics and energetic electron precipitation into the atmosphere // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* V. 115. № 4. A04202. 2010. doi 10.1029/2008JA014023
- *Rozanov E., Calisto M., Egorova T., Peter T., Schmutz W.* Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate // *Surveys in Geophys.* V. 33. P. 483–501. 2012. doi 10.1007/s10712-012-9192-0
- *Sandanger M.I., Søråas F., Sørbo M., Aarsnes K., Oksavik K., Evans D.S.* Relativistic electron losses related to EMIC waves during CIR and CME storms // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 71. № 10–11. P. 1126–1144. 2009. doi 10.1016/j.jastp.2008.07.006
- *Seppälä A., Clilverd M.A., Beharrell M.J. et al.* Substorm-induced energetic electron precipitation: Impact on atmospheric chemistry // *Geophys. Res. Lett.* 42. № 19. P. 8172–8176. 2015. doi 10.1002/2015GL065523
- *Shprits Y.Y., Thorne R.M., Friedel R. et al.* Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* V. 111. № 11. A11214. 2006. doi 10.1029/2006JA011657
- *Spence H.E., Reeves G.D., Baker D.N. et al.* Science goals and overview of the radiation belt storm probes (RBSP) energetic particle, composition, and thermal plasma (ECT) suite on NASA's Van Allen probes mission // *Space Sci. Rev.* V. 179. P. 311–336. 2013. doi 10.1007/s11214-013-0007-5
- *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Makhmutov V.S., Svirzhevskaya A.K.* Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere // *Adv. Space Res.* V. 44. № 10. P. 1124–1137. 2009. doi 10.1016/j.asr.2008.10.038
- *Thorne R.M., Li W., Ni B. et al.* Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus // *Nature.* V. 504. P. 411–419. 2013. doi 10.1038/nature12889
- *Woodger L.A., Halford A.J., Millan R.M. et al.* A summary of the BARREL campaigns: Technique for studying electron precipitation // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* V. 120. № 6. P. 4922–4935. 2015. doi 10.1002/2014JA020874
- *Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Yu.* Dynamics of large-scale solar wind streams obtained by the double superposed epoch analysis // *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, V. 120. № 9. P. 7094–7106. 2015. doi 10.1002/2015JA021274