

УДК 550.380.12

ВЫСЫПАНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ И ЭЛЕКТРОНЫ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

© 2017 г. Г. А. Базилевская¹, *, М. С. Калинин¹, М. Б. Крайнев¹, В. С. Махмутов¹,
А. К. Свиржевская¹, Н. С. Свиржевский¹, Ю. И. Стожков¹, М. В. Филиппов¹,
Ю. В. Балабин², Б. Б. Гвоздевский²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт
имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Полярный геофизический институт
Кольского научного центра Российской академии наук

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

В ходе многолетних измерений потоков ионизирующего излучения в атмосфере Земли, проводимых в ФИАН, зарегистрировано более 500 случаев рентгеновского излучения, генерированного в атмосфере высыпавшимися электронами внешнего радиационного пояса. Высыпания электронов тесно связаны с высокоскоростными потоками солнечного ветра, частота которых максимальна на спаде 11-летнего цикла солнечной активности так же, как частота высыпаний. В работе рассмотрены связи между высыпаниями электронов, наблюдаемыми в полярной атмосфере, высокоскоростным солнечным ветром и потоками релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе.

DOI: 10.7868/S0367676517020077

ВВЕДЕНИЕ

Внешний радиационный пояс Земли является весьма динамичным образованием, содержание электронов с энергией $E > 2$ МэВ может увеличиваться и уменьшаться на порядок за время 1–2 суток. Причиной являются возмущения магнитосферы под действием солнечного ветра. На фоне отрицательного значения B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) в магнитосфере возникают условия как для ускорения электронов, так и для рассеяния их в конус потерь, например [1]. Одним из механизмов опустошения пояса являются высыпания электронов в атмосферу Земли, но возможен также уход электронов в межпланетное пространство, когда под влиянием возмущения ранее замкнутые дрейфовые оболочки радиационного пояса становятся открытыми, пересекаясь с магнитопаузой [2, 3]. Кроме того, во время магнитной бури имеют место адиабатические уменьшения популяции электронов — так называемый Dst-эффект [4]. При наблюдениях на спутниках трудно отделить эффекты высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ) в атмосферу от других причин уменьшения наблюдаемых потоков частиц. Между тем помимо фундаментального интереса к процессам ускорения и потерь электронов во внешнем радиационном поясе ВВЭ имеют прикладное значение: энергичные

электроны повреждают элементы бортовой аппаратуры [5], нарушают условия распространения радиосигналов [6], участвуют в ион-молекулярных реакциях, генерирующих нечетный азот NO_x и нечетный водород HO_x [7]. Долгоживущие соединения NO_x участвуют в циклах реакций, приводящих к разрушению озона в средней атмосфере и образованию озона ниже тропопаузы, что приводит к изменениям температурного режима и динамики атмосферных вихрей. В течение 11-летнего солнечного цикла ВВЭ ответственны за вариации содержания озона до 34% [8].

Начиная с 1957 г. ФИАН проводит регулярные измерения потоков заряженных частиц в атмосфере Земли от уровня моря до высот ~30 км. Хотя группа ФИАН наблюдала ВВЭ в нескольких пунктах, в данной работе рассмотрены только ВВЭ, зарегистрированные в Мурманской области (параметр МакИллвайна $L = 5.5$), что позволяет измерять высыпания из области радиационного пояса, близкой к той, где осуществляется мониторинг потоков электронов с $E > 2$ МэВ геостационарным спутником GOES, $L = 6.6$ [9]. В данной работе обсуждаются связи между потоками релятивистских электронов на геостационарной орбите и ВВЭ, зарегистрированными группой ФИАН в Мурманской области.

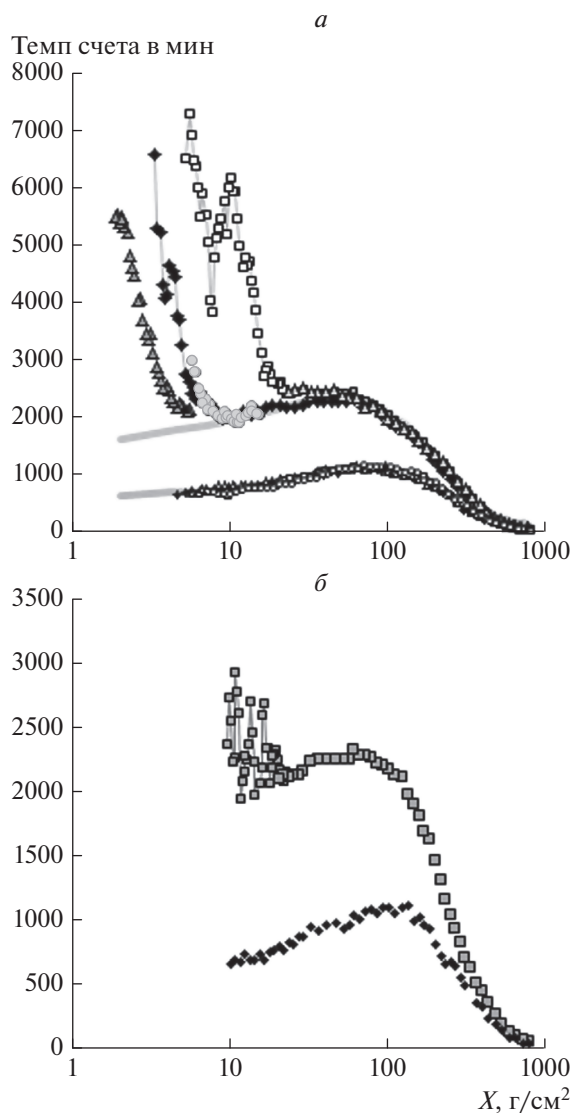


Рис. 1. Темп счета радиозонда во время ВВЭ в Мурманской обл. в зависимости от остаточного давления атмосферы X . Верхние кривые — показания одиночного счетчика, нижние кривые — показания телескопа, умноженные на 3. *a* — ромбы — 17.09.2003 г., квадратики — 19.09.2003 г., треугольники — 22.09.2003 г., кружки — 26.10.2003 г. Серые линии — среднесуточные значения темпа счета; *б* — измерения 30.07.2003 г. Видны быстрые флуктуации темпа счета.

ДАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения в атмосфере Земли проводятся стандартным радиозондом космических лучей [10]. Детекторами служат гейгеровский счетчик и телескоп из двух счетчиков. Электроны, выпадающие из магнитосферы, поглощаются на высотах более 50 км, но они генерируют тормозное излучение, которое регистрируется одиночным счетчиком, чувствительным к рентгеновскому излучению ($E > 20$ кэВ) с эффективностью $\sim 1\%$. Повышение темпа счета радиозонда во время

ВВЭ отличается от эффекта вторжения в атмосферу солнечных протонов отсутствием возрастания на телескопе и сильными вариациями потока частиц, что можно видеть на рис. 1, где показаны примеры ВВЭ, зарегистрированные в 2003 г. Повышение темпа счета, как правило, начинается при подъеме зонда на высоты более 30 км. Вычитая из данных одиночного счетчика фон, образованный галактическими космическими лучами, оцененный по результатам предыдущих полетов радиозонда, мы получаем зависимость темпа счета от давления остаточной атмосферы. В случае плавной зависимости мы предполагаем, что изменения потока частиц связаны с поглощением в атмосфере, и можем оценить спектр электронов, падающих на границу атмосферы. С 1961 г. группа ФИАН зарегистрировала более 500 случаев ВВЭ, каталог которых опубликован в [11] и представлен на сайте [12].

ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ, ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ФЛЮЕНСЫ РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В РАДИАЦИОННОМ ПОЯСЕ

Максимальная частота случаев ВВЭ наблюдается на фазе спада 11-летнего цикла солнечной активности [13–15]. Аналогичное поведение обнаруживают коротящиеся высокоскоростные потоки солнечного ветра (СВ), тогда как возмущения, связанные с корональными выбросами массы (КВМ), наиболее часто происходят в фазе максимума 11-летнего цикла [16]. Применение метода наложения эпох с нуль-днями, когда наблюдались ВВЭ, показало, что в окрестностях нуль-дней происходит быстрое наполнение пояса электронами. Если в качестве нуль-дней рассматривать дни прихода возмущений, связанных с КВМ и представленных в [17], то процессы накопления и потерь электронов близки к равновесию, и в среднем флюенс электронов невысок и мало меняется. Этим, по-видимому, объясняется неэффективность возмущений, связанных с КВМ, в генерации ВВЭ. Соответствующий результат найдется в стадии опубликования.

Переходя от статистических исследований к непосредственным данным измерений, рассмотрим период второй половины 2003 г., когда наблюдалась высокая частота ВВЭ. На рис. 2 дни наблюдения ВВЭ отмечены вертикальными отрезками. На панелях (*a*, *б*, *в*, *г*) приведены соответствующие среднесуточные значения скорости солнечного ветра V , Dst-индекса, B_z -составляющей ММП и суточного флюенса электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите [9]. Кроме того, на рис. 2г треугольниками представлено минимальное остаточное давление, достигнутое радиозондом X_{min} . В большинстве случаев ВВЭ на-

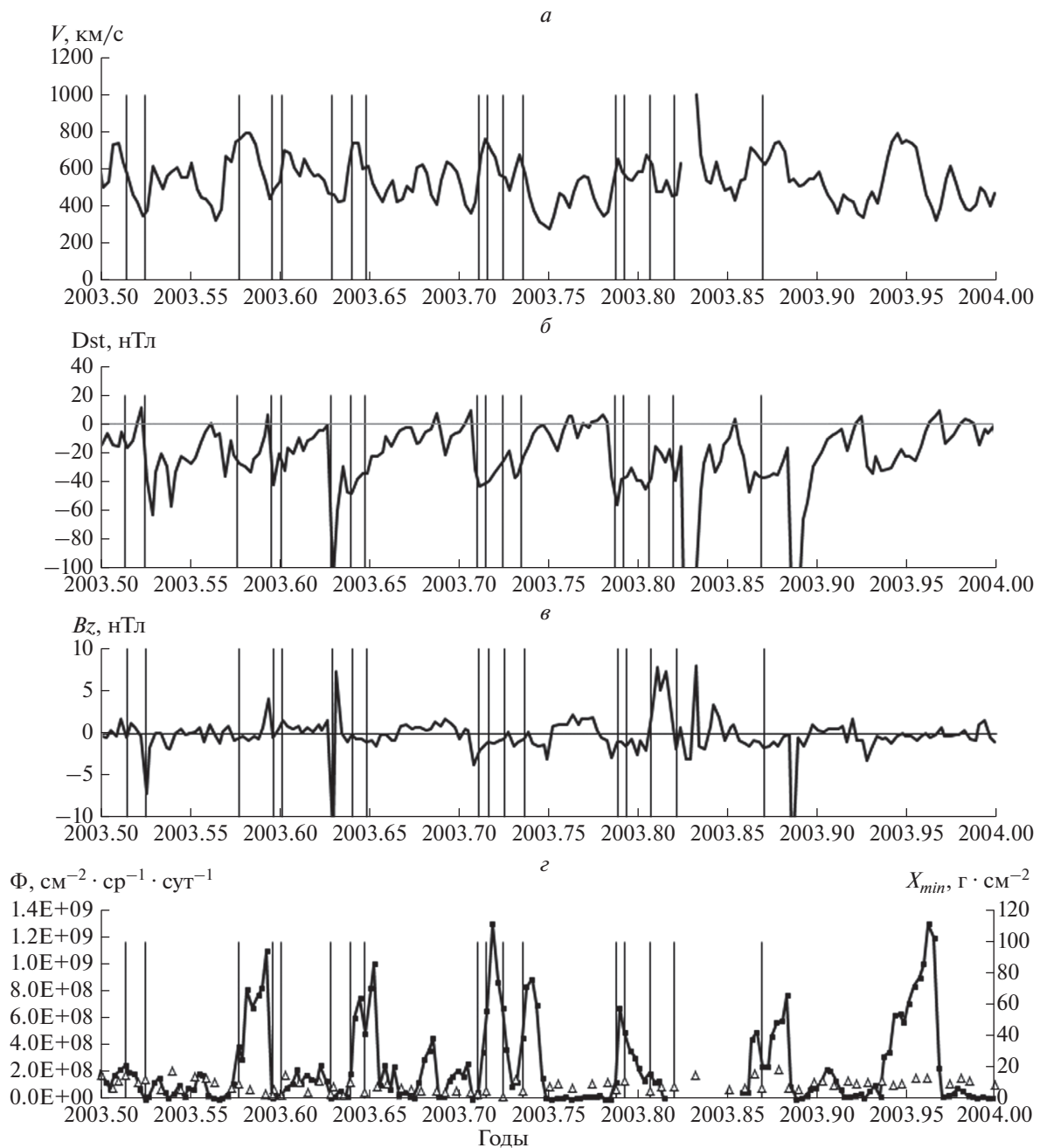


Рис. 2. Среднесуточные значения: *a* — скорости солнечного ветра, *б* — Dst-индекса, *в* — B_z -компоненты ММП, *г* — флюенсов электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите. Вертикальными отрезками обозначены дни, когда наблюдались ВВЭ. Треугольники на панели *г* — минимальное остаточное давление, достигнутое радиозондом (X_{min}).

блюдаются, когда $X_{min} \leq 20$ г · см⁻². На рис. 2 видно, что ВВЭ происходят, за редкими исключениями, на фоне высокой или возрастающей скорости солнечного ветра (рис. 2*a*); большей частью, на фазе восстановления Dst-возмущения (рис. 2*б*); при отрицательном или флуктуирующем B_z (рис. 2*в*); в периоды высоких флюенсов (Φ) релятивистских электронов на 6.6 Re (рис. 2*г*). Такая ситуация наблюдается с июля по

ноябрь 2003 г. Однако в декабре 2003 г., когда флюенсы электронов были велики, высыпаний не наблюдалось, хотя было достаточно измерений на больших высотах (треугольники на нижней панели, $X_{min} \leq 20$ г · см⁻²). Поведение Dst-индекса и особенно B_z -компоненты ММП было в этот период гораздо спокойнее, чем в периоды частых ВВЭ. Тем не менее флюенсы электронов в декабре 2003 г. достигли самого высокого значения

за обсуждаемый период и затем резко упали за время порядка 1 сут.

По современным представлениям например [18, 19], геомагнитное возмущение развивается в результате усиленного поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу при отрицательном значении B_z -компоненты ММП. При этом генерируются в магнитосфере или заносятся из ММП разные типы волн ОНЧ- и УНЧ-диапазонов, в частности шипения, хоры и электромагнитные ион-циклотронные волны [20]. В результате взаимодействия волна—частица все эти типы волн могут ускорять электроны или рассеивать их в конус потерь.

Наши результаты хорошо согласуются с этим сценарием до середины ноября 2003 г. В конце 2003 г. мы видим наполнение и быстрое опустошение пояса электронов, но не регистрируем ВВЭ, хотя количество измерений не уменьшилось. Это может быть объяснено преимущественным выходом электронов из пояса в ММП через магнитопаузу [2, 3, 21, 22].

Наши измерения позволяют оценить потоки и энергетический спектр ВВЭ [11]. Согласно этим оценкам, потоки высыпавшихся в атмосферу электронов с $E > 2$ МэВ на много порядков меньше потерь электронов пояса, которые видны на рис. 2г. Это также может служить указанием на то, что ВВЭ в атмосферу не являются основным механизмом опустошения внешнего радиационного пояса Земли, хотя недостаток наблюдаемых нами ВВЭ может быть связан с неблагоприятным местным временем наблюдения [3] или с другими причинами, которые требуют дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высыпания высокоэнергичных электронов в атмосферу Земли, зарегистрированные в Мурманской области с 1961 г., происходят на фоне высокоскоростных потоков солнечного ветра, в основном на фазе восстановления Dst-индекса и, как правило, тесно связаны с потоками электронов с $E > 2$ МэВ на геостационарной орбите. Нарушения этой связи могут быть объяснены сбросом электронов из пояса не в атмосферу, а в межпланетное пространство.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 16-02-00100, 14-02-00905). Мы благодарны администрации NOAA NCEI, предоставляющей через интернет данные по электронам радиационного пояса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P. // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. № 10. P. 1529. doi 10.1029/2002GL016513
2. Shprits Y.Y., Thorne R.M., Friedel R. et al. // *J. Geophys. Res.* A. 2006. V. 111. № 11. A11214. doi 10.1029/2006JA011657
3. Lazutin L.L. // *Physics of Auroral Phenomena. Proc. 38th Annual Seminar.* PGI. 2014. P. 26.
4. Лазутин Л.Л. Мировые и полярные магнитные бури. М.: Изд-во МГУ, 2012. 213 с.
5. Horne R.B., Glauert S.A., Meredith N.P. et al. // *Space Weather.* 2013. V. 11. № 4. P. 169. doi 10.1002/swe.20023
6. Clilverd M.A., Rodger C.J., Brundell J. et al. // *J. Geophys. Res.* A. 2008. V. 113. № 10. A10311. doi 10.1029/2008JA013220
7. Mironova I.A., Aplin K.L., Arnold F. et al. // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 194. № 1–4. P. 1. doi 10.1007/s11214-015-0185-4
8. Andersson M.E., Verronen P.T., Rodger C.J. et al. // *Nature commun.* 2014. V. 5. № 10. P. 5197. doi 10.1038/ncomms6197
9. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/sateenvi.html#electrons>.
10. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al. // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. № 10. P. 1124. doi 10.1016/j.asr.2008.10.038
11. Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. et al. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016. V. 149. P. 258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.12.006>
12. http://sites.lebedev.ru/DNS_FIAN/show.php?page_id=479.
13. Bazilevskaya G.A., Svirzhevskaya A.K. // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 85. № 3–4. P. 431.
14. Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B. // *Adv. Space Res.* 2003. V. 31. № 4. P. 1087. doi 10.1016/S0273-1177(02)00814-1
15. Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I. et al. // *Int. J. Mod. Phys. A.* 2005. V. 20. № 29. P. 6843. doi 10.1142/S0217751X05030260
16. Richardson J.G., Cane H.V. // *J. Space Weather Space Clim.* 2012. V. 2. A01. doi 10.1051/swsc/2012001
17. <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>.
18. Horne R.B., Lam M.M., Green J.C. // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. № 19. L19104. doi 10.1029/2009GL040236
19. Kessel M. // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. № 6. P. 5549. doi 10.1002/2016JA022472
20. Thorne R.M., Li W., Ni B. et al. // *Nature.* 2013. V. 504. P. 411. doi 10.1038/nature12889
21. Alves L. R., Da Silva L. A., Souza V. M. et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. № 3. P. 978. doi 10.1002/2015GL067066
22. Mauk B.H., Cohen I.J., Westlake J. H., Anderson B.J. // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. № 9. P. 4081. doi 10.1002/2016GL068856