

УДК 550.385

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА С ЭНЕРГИЕЙ 1 МэВ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ 7–8 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА

© 2022 г. А. Г. Яхнин<sup>1</sup>, \*, Т. А. Яхнина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

\*E-mail: ayahnin@gmail.com

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Рассмотрены две последовательные геомагнитные бури, развивающиеся в сходных условиях, но отличающиеся присутствием в первой и отсутствием во второй буре явления резкого ослабления потока (дропаута) релятивистских электронов во время главной фазы бури. Сделан вывод, что дропаут во время второй бури скомпенсирован ускорением энергичных электронов во время мощных геомагнитных возмущений, сопровождающих бури.

DOI: 10.31857/S0367676522030279

### ВВЕДЕНИЕ

Во время геомагнитных бурь потоки релятивистских электронов внешнего радиационного пояса претерпевают существенные изменения, причины которых часто не ясны. Одной из основных повторяющихся особенностей этих изменений является так называемый “дропаут” – резкое уменьшение (часто на 1–2 порядка) относительно добуревого уровня потоков электронов во время главной фазы бури (например, [1] и ссылки в этой работе). Дропауты наиболее выражены во время интенсивных бурь, но наблюдаются также и во время слабых бурь [2–4]. Среди механизмов, приводящих к дропаутам, выделяют: 1) адиабатические вариации потока релятивистских электронов во время медленных изменений магнитного поля в магнитосфере, при которых сохраняются три адиабатических инварианта [5]; 2) потери релятивистских электронов в атмосфере Земли при рассеянии электронов в конус потерь при взаимодействии их с волнами [6]; и, 3) потери электронов на магнитопаузе (например, при сжатии магнитосферы солнечным ветром и, соответственно, при приближении магнитопаузы к Земле) [7].

В данной работе мы рассмотрим вариации потоков захваченных релятивистских электронов во время магнитосферного возмущения, произошедшего 7–8 сентября 2017 г. В начале сентября 2017 г. на Солнце имели место несколько вспышек, и в солнечном ветре сформировались несколько магнитоплазменных структур, которые при контакте с магнитосферой Земли привели к

интенсивным возмущениям. В литературе имеется серия публикаций, посвященных анализу этого интервала, в частности: событиям на Солнце и структуре солнечного ветра (см, например, [8, 9]), геомагнитным возмущениям на земной поверхности [10], процессам в магнитосфере [11] и различным аспектам космической погоды [12–14].

### ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ 7–8 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

Рассматриваемое возмущение связано с двумя интервалами очень больших значений южной компоненты межпланетного магнитного поля ( $B_z$  ММП  $\sim -30$  и  $\sim -20$  нТл) и, соответственно, состоит из двух последовательных геомагнитных бурь с интервалом между главными фазами около 12 ч. На рис. 1 показаны индексы геомагнитной активности SuperMAG [15]: индекс кольцевого тока  $SMR$  [16] – аналог стандартных  $Dst$  и  $SYM-H$  индексов, и индексы аврорального электроджета  $SMU$  и  $SML$  [17] – аналоги  $AU$  и  $AL$ , построенные по значительно большему количеству станций, чем стандартные индексы. Главная фаза первой бури началась 7 сентября около 23 UT (UT – мировое время). Минимальное значение  $SMR$  индекса ( $-148$  нТл) отмечено в 01:10 UT 8 сентября. Вторая буря началась примерно в 11:30 UT 8 сентября, а минимальное значение  $SMR$  индекса ( $-160$  нТл) отмечено в 14 UT. Обе главные фазы сопровождались суперсуббуриями – мощными возрастаниями токов в авроральной зоне [18].

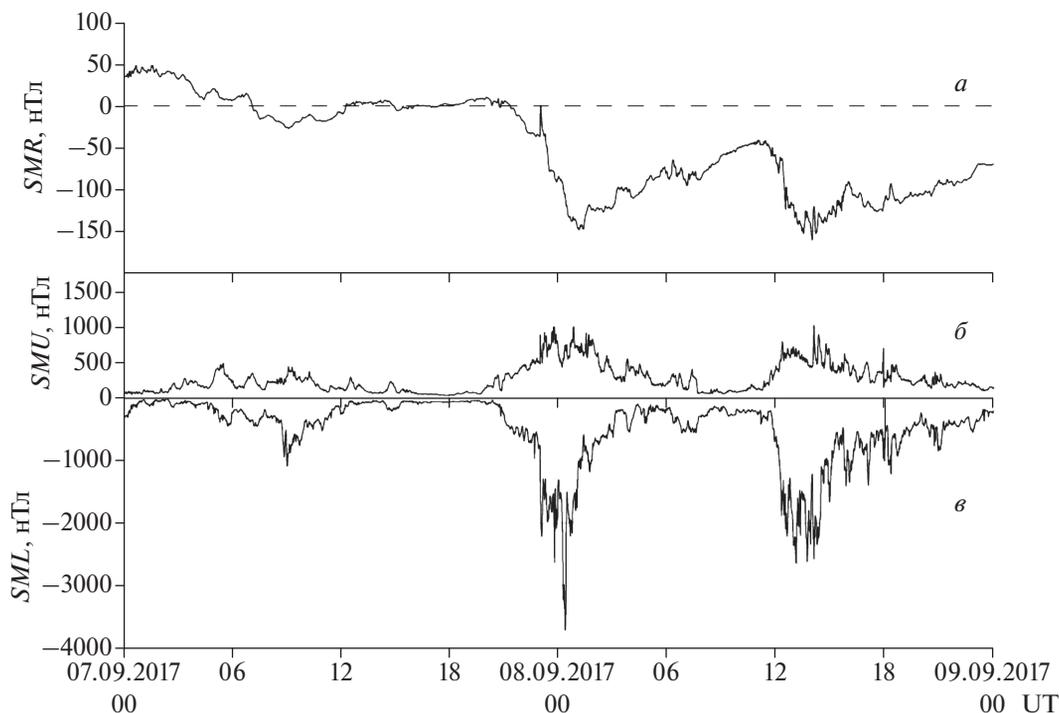


Рис. 1. Индекс интенсивности геомагнитной бури  $SMR$  (а); индексы авроральных электроджетов  $SMU$  (б) и  $SML$  (в) по данным базы данных SuperMAG.

SuperMAG индекс аврорального электроджета  $SME = SMU + |SML|$  достигал значений  $\sim 4500$  нТл во время первой бури и  $\sim 3600$  нТл во время второй бури (рис. 1).

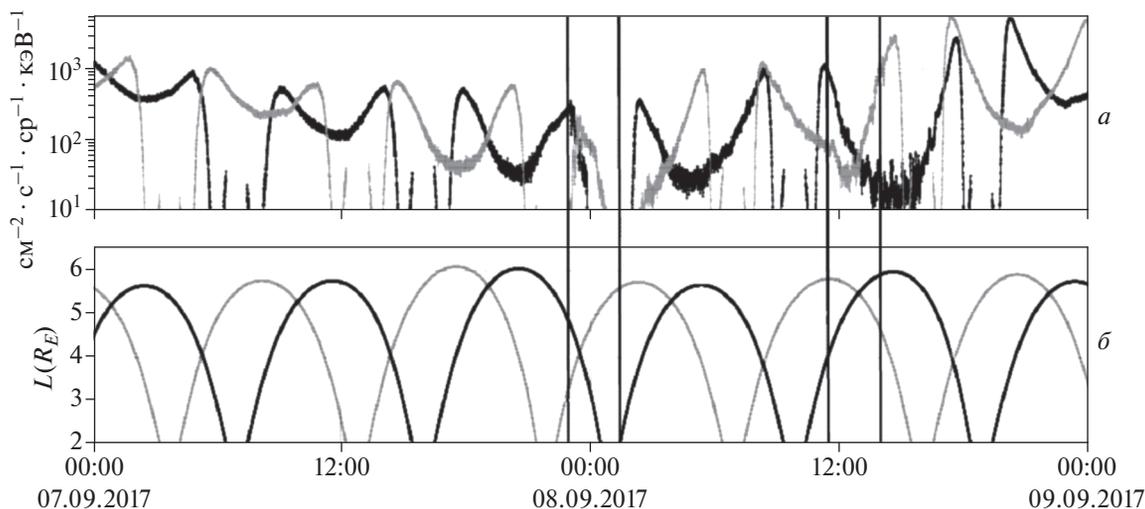
Благодаря совместному воздействию большой южной компоненты межпланетного магнитного поля и большого динамического давления солнечного ветра (см., например, данные в [10]) во время обеих бурь магнитопауза смещалась к Земле до расстояний меньших, чем  $6.6 R_E$  [12]. Такие смещения магнитопаузы к Земле были определены по данным измерений магнитного поля на двух геостационарных спутниках GOES-13 и GOES-15. Кроме этих спутников в ближней магнитосфере находились спутники Arase, THEMIS, и два спутника Van Allen Probes (VAP-A и VAP-B). Наблюдения релятивистских электронов на Van Allen Probes использованы в этой работе.

Миссия Van Allen Probes, которая заключалась в одновременных измерениях параметров плазмы и электромагнитных полей на двух идентичных спутниках, продолжалась с августа 2012 г. по октябрь 2019 г. Спутники двигались по одинаковым орбитам с задержкой около 1 ч. Орбитальный период составлял около 9 ч. Перигей —  $\sim 1.1 R_E$ , апогей  $\sim 5.8 R_E$ , наклонение орбиты  $10.2^\circ$  [19]). В рассматриваемый период спутники Van Allen Probes имели апогей в дневном секторе на  $\sim 13$  ч локального магнитного времени ( $MLT$ ).

## ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ НА СПУТНИКАХ VAN ALLEN PROBES

Использовались данные прибора MagEIS (The Magnetic Electron Ion Spectrometer) [20], входящего в состав комплекса ECT (Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma) [21]. Этот прибор измерял электроны с энергиями от 20 кэВ до 4 МэВ. На рисунках ниже будут показаны данные канала, измеряющего электроны с энергией 1078 кэВ. Кроме того, мы использовали данные прибора EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science), который измерял волновые явления в различных частотных диапазонах [22].

На верхней панели рис. 2 приведена величина потока электронов на двух спутниках в течение 7–8 сентября 2017 г. Данные со спутника VAP-A показаны черным цветом, а со спутника VAP-B — серым. На нижней панели показано расстояние  $L$  (в радиусах Земли,  $R_E$ ) от Земли до вершины силовой линии каждого спутника во время их движения. (Для определения  $L$  использована модель [23], которая для  $L < 5$  практически не отличается от “возмущенной” модели [24]. Модель для возмущенных условий не использовалась, поскольку вблизи апогея она дает значения  $L$ , не согласующиеся с наблюдениями магнитопаузы на расстояниях  $< 6.6 R_E$ ). Видно, что минимальные значения потока электронов наблюдаются в районе апогея, а



**Рис. 2.** Поток электронов с энергией 1078 кэВ, измерявшийся спутниками Van Allen Probe A (черная линия) и Van Allen Probe B (серая линия) в течение 7–8 сентября 2017 г. Потоки вблизи перегиба ( $L < 2$ , внутренний радиационный пояс) не показаны (а). Расстояние (в радиусах Земли) от вершины силовой линии магнитного поля, на которой находится космический аппарат, до Земли (б). Черная линия – для спутника VAP-A, серая – для спутника VAP-B. Две пары вертикальных линий отмечают интервалы главных фаз двух геомагнитных бурь.

максимальные – на расстояниях 4–5  $R_E$ . Поток релятивистских электронов постепенно уменьшается в течение 7 сентября. Около 23 UT (начало главной фазы первой бури) плавный характер вариаций потока сменился резким спадом, причем VAP-A на  $L = 4.8$  наблюдал его чуть раньше, чем VAP-B, который в этот момент находился на  $L = 3.7$ .

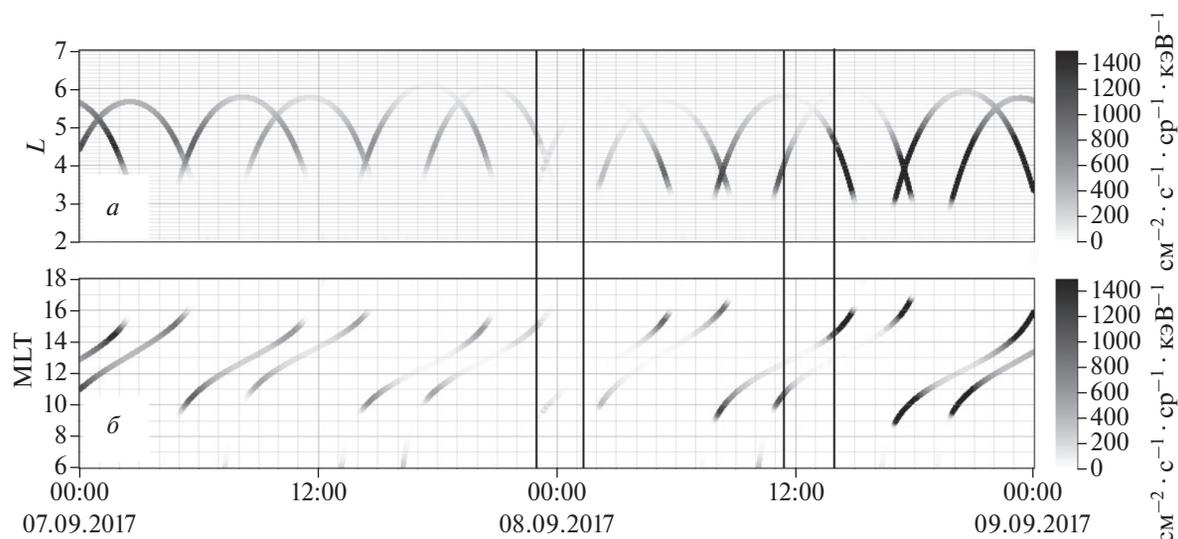
Уже с первых часов 8 сентября начался рост потоков электронов в сердцевине радиационного пояса (в области, где наблюдаются максимальные значения потока электронов). Около 11:30 UT (начало главной фазы второй бури) виден резкий спад потока электронов на спутнике VAP-B, который находился вблизи апогея ( $L = 5.8$ ), но в сердцевине радиационного пояса ( $L \sim 4$ ) поток электронов не уменьшился по сравнению с потоком, измеренным до начала второй бури.

На рис. 3 показаны те же данные, но в другом представлении, которое позволяет лучше видеть положение радиационного пояса и его динамику в пространстве. На верхней и нижней панелях показаны, соответственно, зависимости  $L$  и  $MLT$  спутника от времени UT. Градациями серого цвета показана интенсивность потока электронов. В этом представлении более наглядно видно, что до начала первой главной фазы радиационный пояс находился на  $L = 4–5$ . Дропаут во время первой главной фазы охватывает как внешнюю часть, так и сердцевину радиационного пояса. Спутники VAP наблюдали дропаут в довольно широком долготном секторе (по крайней мере от 10 до 16  $MLT$ ). На самом деле подобные вариации потоков релятивистских электронов видны и при других  $MLT$ , например, на магнитосферном спутнике Arase в

вечерне-ночном секторе (данные не показаны). Низкоорбитальные спутники NOAA POES, MetOp и Метеор-М1 также наблюдали признаки дропаута в потоках захваченных электронов в различных секторах  $MLT$  (данные не показаны). Восстановление радиационного пояса началось сразу после главной фазы первой бури, но на более низких оболочках, на  $L = 3.3–4.5$ . На рис. 3 также видно, что главная фаза второй бури совпала с уменьшением потока электронов на высоких  $L$ -оболочках, в то время как в сердцевине радиационного пояса продолжался рост потоков релятивистских электронов, начавшийся после первой бури.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Уменьшение потока релятивистских электронов является основной особенностью динамики радиационного пояса во время главной фазы геомагнитной бури. Эта особенность, наблюдается как во время интенсивных, так и во время слабых бурь, при любых типах потоков солнечного ветра. Это показано как в статистических исследованиях (см., например, [1]), так и в многочисленных исследованиях отдельных геомагнитных бурь. Как уже упоминалось, предлагались разные механизмы этого явления, которые, вероятно, действуют совместно, но в каждом конкретном случае основную роль играет механизм, для которого сформировались подходящие условия. Эти механизмы могут быть не связаны с реальными потерями электронов (как, например, уменьшение энергии электронов при понижении величины магнитного поля [5, 25, 26]). В то же



**Рис. 3.** Расстояние (в радиусах Земли) от вершины силовой линии магнитного поля, которой находится космический аппарат, до Земли ( $L$ ) и местное магнитное время ( $MLT$ ) спутника. Данные для VAP-A и VAP-B показаны вместе. Интенсивность потока электронов с энергией 1078 кэВ показана оттенками серого цвета. Две пары вертикальных линий отмечают интервалы главных фаз двух геомагнитных бурь.

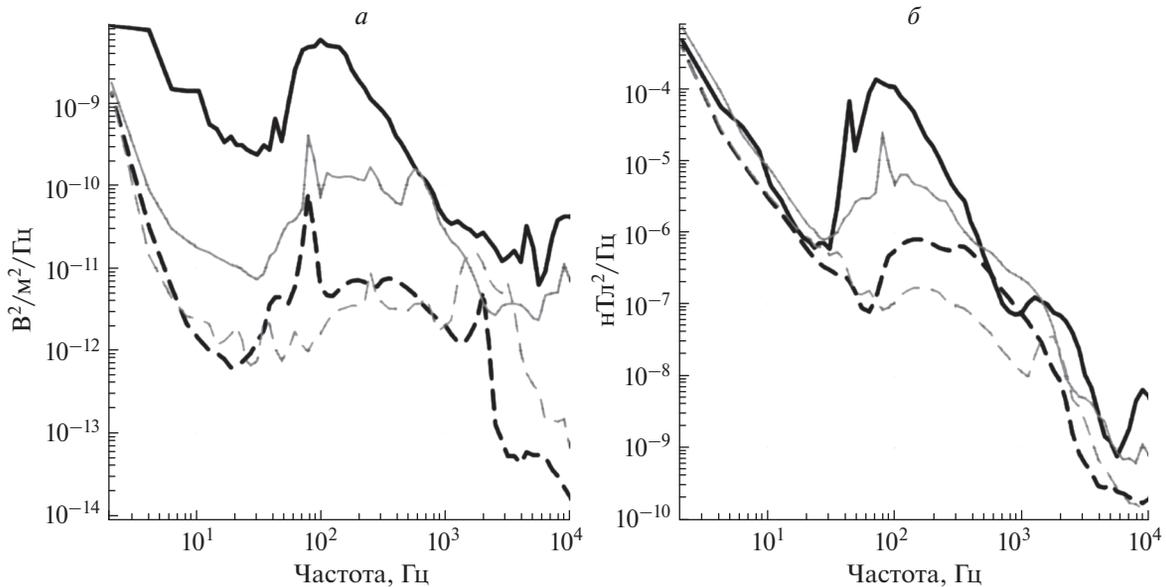
время, могут иметь место и реальные потери частиц, например, при их взаимодействии с низкочастотными волнами или при выходе дрейфовых оболочек электронов на магнитопаузу.

Известно, что после дропаута потоки могут как восстанавливаться до предбурового уровня, так и не достигать или превышать его [27]. Если в первом случае это можно объяснить адиабатическим ускорением при росте магнитного поля во время восстановительной фазы бури, то в последнем случае необходимо привлекать неадиабатические механизмы ускорения, такие как, например, ускорение электронов до релятивистских и ультрарелятивистских энергий при их взаимодействии с ОНЧ хорами (см., например [28–31]).

Рассмотренное здесь событие, представляет, как нам кажется, интерес с точки зрения совместного действия различных механизмов, определяющих динамику потоков релятивистских электронов. Заметим, что две последовательные бури имели примерно равную интенсивность и наблюдались при похожих внешних условиях. Обе бури связаны со смещениями магнитопаузы к Земле, причем до экстремально малых расстояний ( $<6.6 R_E$ ). Анализ магнитных данных геостационарных спутников (здесь не приводятся) показывает, что эти экстремальные смещения происходили за времена существенно меньшие, чем период магнитного дрейфа МэВ-ных электронов. Этот факт позволяет утверждать, что основным механизмом дропаута в первой буре является выход частиц на магнитопаузу и связанные с этим потери. Известно, что смещение магнитопаузы к Земле может вызвать уменьшение потока электронов не только на относительно больших  $L$ -оболочках, но и в

сердцевине радиационного пояса за счет радиального переноса во внешние области [7]. Интенсивность радиального переноса связана с уровнем флуктуаций магнитного поля в УНЧ диапазоне, который в данном событии был весьма высоким (см. данные об УНЧ-индексе [32] на сайте [http://ulf.gcras.ru/plot\\_ulf.html](http://ulf.gcras.ru/plot_ulf.html)). Еще одним механизмом потерь являются высыпания релятивистских электронов в атмосферу. Однако, в данных низкоорбитальных спутников NOAA POES, MetOp и Метеор-М1 (данные не показаны) во время главной фазы первой бури признаков интенсивных высыпаний не обнаружено. Кроме того, уменьшение потока в сердцевине радиационного пояса может быть связано с  $Dst$ -эффектом, при котором энергия частиц уменьшается (см., например, [26]).

Вскоре после окончания главной фазы первой бури начался рост потока МэВ-ных электронов, который в сердцевине радиационного пояса не прекратился и во время главной фазы второй бури. Потоки быстро превысили уровень, имевший место до первой бури. Это указывает на то, что кроме адиабатического ускорения, вероятно имеет место ускорение, связанное с неадиабатическими процессами. Таким процессом может быть рассеяние по энергиям при взаимодействии электронов с ОНЧ-хорами, генерация которых, в свою очередь, обусловлена инжекциями энергичных электронов во внутреннюю магнитосферу во время суббури. ОНЧ волны наблюдались на спутниках VAP в течение всего интервала 7–8 сентября (данные не показаны). Однако, до первой бури их интенсивность была небольшой и признаков ускорения (увеличения потока) релятивистских



**Рис. 4.** Усредненная мощность электромагнитных волн в течение двух двенадцатичасовых интервалов до (пунктирные линии) и после (сплошные линии) начала первой бури. Измерения на VAP-A показаны черными линиями, а на VAP-B — серыми. Мощность в электрической (а) и в магнитной (б) компоненте.

электронов не наблюдалось. Первая буря сопровождалась суперсуббурей, которая, очевидно, привела к существенной интенсификации волн. На рис. 4 показаны средние амплитуды волн в электрической и магнитной компонентах в диапазоне от 10 Гц до 10000 Гц, полученные для каждого спутника за два двенадцатичасовых интервала: до и после 23 UT 7 сентября (момент, который мы принимаем за начало первой бури). Видно, что интенсивность волн в диапазоне от  $\sim 10$  Гц до  $\sim 1$  кГц до первой бури на 1–2 порядка меньше, чем интенсивность волн в интервале после начала первой бури и до начала второй. Заметим, что взаимодействие с волнами могло происходить не только в дневном секторе, где проводились наблюдения на спутниках VAP, но также в утреннем и ночном секторах, вдоль дрейфовых траекторий инжектированных электронов. Поэтому утверждение о том, что рост потока релятивистских электронов вскоре после начала первой бури может быть связан с ускорением при резонансном взаимодействии энергичных электронов с ОНЧ волнами, представляется нам обоснованным. Рост потока электронов в сердцевине радиационного пояса происходил и во время главной фазы второй бури, которая сопровождалась новой суперсуббурей, а значит и новыми инжекциями энергичных электронов во внутреннюю магнитосферу, генерацией волн и ускорением частиц.

Поскольку параметры второй бури сходны с параметрами первой бури, мы могли бы ожидать подобный дропаут и во время главной фазы второй бури. Он мог бы быть обусловлен теми же процессами, что и во время первой бури (выход

дрейфовых траекторий на магнитопаузу, радиальный перенос, *Dst*-эффект). Более того, по данным низкоорбитальных спутников во время второй бури на  $L = 3.5\text{--}4.5$  наблюдались и высыпания электронов с энергиями  $\sim 1$  МэВ (данные не показаны), морфологические характеристики которых, согласно работе [33], указывают на то, что высыпания обусловлены взаимодействием электронов с ОНЧ/КНЧ волнами или с верхнегибридными волнами. По-видимому, ускорение на волнах в сердцевине радиационного пояса было достаточно интенсивным, чтобы преодолеть воздействие всех механизмов уменьшения потока электронов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный в данной работе пример показывает, что могут существовать интенсивные геомагнитные бури без дропаута на главной фазе. В рассмотренном случае это произошло в результате конкуренции процессов, которые, с одной стороны, приводят к уменьшению потока релятивистских электронов на главной фазе, а с другой стороны к увеличению потока за счет ускорения энергичных электронов до релятивистских энергий в процессе взаимодействия энергичных электронов с ОНЧ волнами. Причиной генерации волн, очевидно, стали инжекции частиц во внутреннюю магнитосферу во время мощных магнитосферных возмущений — суперсуббурь, сопровождающих главные фазы двух последовательных геомагнитных бурь.

Геомагнитные индексы SuperMAG получены на сайте (<https://supermag.jhuapl.edu>) Мы благо-

дарим участников проекта SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/info/?page=acknowledgement>), за данные, использованные при расчете этих индексов. Данные об УНЧ-индексе доступны на сайте Геофизического Центра РАН [http://ulf.gcras.ru/plot\\_ulf.html](http://ulf.gcras.ru/plot_ulf.html). Данные спутников NOAA POES и MetOp доступны на сайте <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/dataaccess.html>. Данные спутника Meteor-M1 доступны на сайте Центра анализа космической погоды НИИЯФ МГУ (<http://swx.sinp.msu.ru>). Данные спутников Van Allen Probes, использованные в этой работе, получены на сайтах <https://emfisis.physics.uiowa.edu/data/index> (EMFISIS) и <https://www.RBSP-ect.lanl.gov> (MagEIS). Мы благодарим руководителей и участников спутниковых проектов и разработчиков информационный сайтов за предоставленный свободный доступ к данным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borovsky J.E., Denton M.H. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. Art. No. A02201.
2. Yuan C., Zong Q. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2013. V. 118. P. 7545.
3. Gao X., Li W., Bortnik J. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 4324.
4. Wu H., Chen T., Kalegaev V.V. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2020. V. 125. Art. No. e2020JA028098.
5. Kim H.-J., Chan A.A. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. Art. No. 22107.
6. Thorne R.M. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. No. L22107.
7. Turner D.L., Ukhorskiy A.Y. // In: The dynamic loss of Earth's radiation belts. Elsevier, 2020. P. 1.
8. Scolini C., Chané E., Temmer M. et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2020. V. 247. P. 21.
9. Hajra R., Tsurutani B.T., Gurbax S., Lakhina G.S. // Astrophys. J. 2020. V. 899. P. 1.
10. Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. и др. // Геомагн. и аэронаом. 2020. Т. 60. № 3. С. 308; Despirak I.V., Kleimenova N.G., Gromova L.I. et al. // Geomagn. Aeron. 2020. V. 60. No. 3. P. 292.
11. Obana Y., Maruyama N., Shinbori A. et al. // Space Weather. 2019. V. 17. P. 861.
12. Redmon R.J., Seaton D.B., Steenburgh R. et al. // Space Weather. 2018. V. 16. P. 1190.
13. Clilverd M.A., Rodger C.J., Brundell J.B. et al. // Space Weather. 2018. V. 16. P. 704.
14. Jiggins P., Clavie C., Evans H. et al. // Space Weather. 2019. V. 17. P. 99.
15. Gjerloev J.W. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. Art. No. A09213.
16. Newell P.T., Gjerloev J.W. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. Art. No. A05215.
17. Newell P.T., Gjerloev J.W. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. No. A12211.
18. Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. // Ann. Geophys. 2015. V. 33. No. 5. P. 519.
19. Mauk B.H., Fox N.J., Kanekal S.G. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. P. 3.
20. Blake J.B., Carranza P.A., Claudepierre S.G. et al. // Space Sci Rev. 2013. V. 179. P. 383.
21. Spence H.E., Reeves G.D., Baker D.N. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. P. 1.
22. Kletzing C.A., Kurth W.S., Acuna M. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. P. 127.
23. Olson W.P., Pfizter K.A. // Magnetospheric magnetic field modeling. Annual Scientific Report. AFOSR Contract № F44620-75-C-0033, 1977.
24. Tsyganenko N.A., Sitnov M.I. // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. Art. No. A03208.
25. Antonova E.E., Stepanova M.V., Moya P.S. et al. // Earth Planets Space. 2018. V. 70. Art. No. 127.
26. Власова Н.А., Калегазев В.В., Назарков И.С. // Геомагн. и аэронаом. 2021. Т. 61. № 3. С. 316.
27. Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O'Brien T.P. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30. P. 1529.
28. Summers D., Ni B., Meredith N.P. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. No. A04207.
29. Thorne R.M. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. Art. No. L22107.
30. Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М., Нанн Д. // Геомагн. и аэронаом. 2006. Т. 46. С. 751; Detekhov A.G., Trakhtengerts V.Y., Rycroft M.J., Nunn D. // Geomagn. Aeron. 2006. V. 46. P. 711.
31. Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М., Нанн Д. // Геомагн. и аэронаом. 2009. Т. 49. С. 28; Detekhov A.G., Trakhtengerts V.Y., Rycroft M.J., Nunn D. // Geomagn. Aeron. 2009. V. 49. P. 24.
32. Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Engebretson M.J., Soloviev A.A. // RJES. 2017. V. 17. Art. No. ES1004.
33. Yahnin A. G., Yahnina T. A., Semenova N. V. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 8286.

## Features of 1 MeV electron dynamics in the outer radiation belt during geomagnetic storms on September 7–8, 2017

A. G. Yahnin<sup>a</sup>,\*, T. A. Yahnina<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

\*e-mail: ayahnin@gmail.com

Two successive geomagnetic storms are considered that develop under similar conditions, but differ in the presence (in the first storm) and in the absence (in the second storm) of sharp weakening of the flux (dropout) of relativistic electrons during the main phase of the storm. It was concluded that the dropout during the second storm was compensated by the acceleration of energetic electrons that occurred during powerful geomagnetic disturbances accompanying the storms.