

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.014

## ВЫСЫПАНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, СВЯЗАННЫЕ С ОСЛАБЛЕНИЕМ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАЙОНЕ ЮЖНО-АТЛАНТИЧЕСКОЙ АНОМАЛИИ, ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 10 – 17 ОКТЯБРЯ 2017 Г.

Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов, Т.А. Попова, А.А. Любич

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

**Аннотация.** В работе по данным спутников серии NOAA POES изучаются высыпания релятивистских (>800 кэВ) электронов (ВРЭ) наблюдаемые в верхней ионосфере Земли, связанные с ослаблением напряженности магнитного поля в районе Южно-Атлантической (Бразильской) аномалии. ВРЭ регистрировались во время геомагнитной бури 10 – 17 октября 2017 г., которая сопровождалась многочисленными суббурями. Показано, что несмотря на меньшую максимальную интенсивность (потоки  $10^3 - 10^4$  (см<sup>2</sup> с ср)<sup>-1</sup>) по сравнению с другими высыпаниями (связанными с ЭМИЦ и свистовыми волнами, а также с питч-угловой диффузией в области большой кривизны силовых линий геомагнитного поля), их вклад в опустошение радиационного пояса может быть существенным. Отчасти это обусловлено их большей продолжительностью (20-220 с). Проведен анализ влияния суббуревой активности на частоту появления таких ВРЭ.

### Введение

Высыпания релятивистских (>800 кэВ) электронов (ВРЭ), наблюдаемые в ионосфере и магнитосфере Земли, делятся на три группы, каждая из которых имеет свой механизм образования и характерные особенности [Yahnin *et al.*, 2016, 2017]. Высыпания 1й группы связаны с нарушением 1-го адиабатического инварианта вследствие малого радиуса кривизны силовых линий в ночном секторе [Sergeev and Tsyganenko, 1982; Imhof *et al.*, 1991]. Эти высыпания наблюдаются вблизи границы изотропии потоков энергичных электронов. ВРЭ 2й группы всегда наблюдаются одновременно с интенсивными высыпаниями энергичных электронов. По-видимому, они связаны с возбуждением очень низкочастотных (ОНЧ) волн. ВРЭ 3й группы, сопровождаемые высыпаниями локализованных энергичных протонов (>39 кэВ), связаны с электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами [Yahnin *et al.*, 2016]. Все эти ВРЭ являются локализованными (продолжительность пролета низкоорбитального спутника через их область 6-30 с) и довольно интенсивными (с максимальными потоками до  $10^6$  (см<sup>2</sup> с ср)<sup>-1</sup>). Кроме представленных выше наблюдаются ВРЭ, связанные с ослаблением напряженности магнитного поля в районе Южно-Атлантической аномалии. Поскольку эта аномалия существует всегда, то ВРЭ, регистрируемые над ней, тоже должны наблюдаться всегда при наличии энергичных частиц в магнитосфере. В данной работе изучаются такие ВРЭ во время геомагнитной бури 10 – 17 октября 2017 г., которая сопровождалась многочисленными суббурями. Рассмотрено влияние суббуревой активности на частоту появления ВРЭ, связанных с ослаблением напряженности магнитного поля в районе Южно-Атлантической аномалии.

### Данные

Для определения потоков высыпающихся и захваченных (с питч-углами вблизи 0° и 90°, соответственно) электронов использованы данные низкоорбитальных спутников NOAA POES, оснащенных детектором протонов и электронов средней энергии (Medium Energy Proton and Electron Detector, MEPEDE) [Evans and Greer, 2004]. Потоки электронов с энергией ~1 МэВ определялись по данным канала Р6 протонного телескопа, изначально предназначенного для регистрации протонов с энергиями >6,9 МэВ. Как показано в работе Yando *et al.* [2011], этот канал имеет близкую к номинальной чувствительность к электронам с энергией >800 кэВ, т.е. он может быть использован для измерения этих частиц в отсутствие протонов с энергией >6,9 МэВ. Отсутствие таких протонов контролируется по малости потока в канале Р5, который нечувствителен к электронам. Магнитное поле, рассчитанное на орбите спутников по модели IGRF, также взято из данных NOAA (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

### Наблюдения и результаты

Вариации потоков высыпающихся и захваченных энергичных электронов в зависимости от интенсивности напряженности магнитного поля в окрестности спутника, над Южно-Атлантической аномалией показаны на рис. 1 и рис. 2 для вечернего и утреннего секторов местного локального времени (MLT), соответственно. Наблюдаемые высыпания (рис. 1, справа) имеют малую интенсивность (потоки  $10^3 - 10^4$  (см<sup>2</sup> с ср)<sup>-1</sup>) и

большую продолжительность (до 3 минут). По-видимому, они возникают благодаря попаданию энергичных частиц в дрейфовый конус потерь в искаженном магнитном поле [Blake et al., 2001]. На рис. 1 слева наклонной линией показано изменение магнитного поля в окрестности спутника в южном полушарии. Вертикальная линия соответствует широте максимального потока как высыпающихся, так и захваченных релятивистских электронов, показанных на рис. 1 справа для трёх последовательных пролетов спутника NOAA-15 в вечернем секторе при близких значениях MLT.

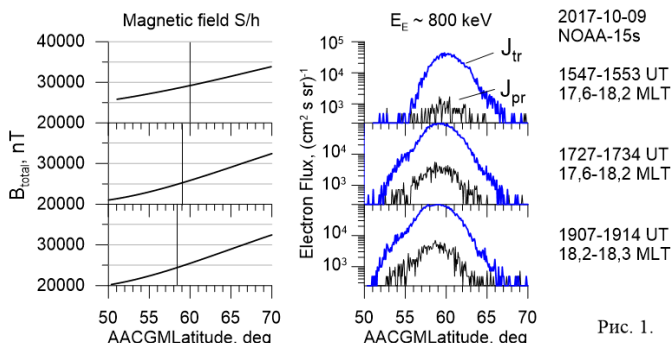


Рис. 1.

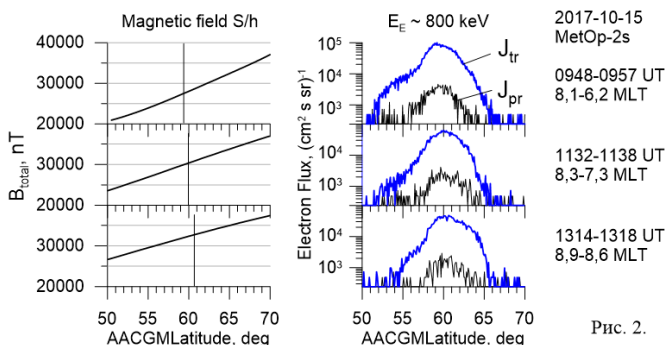


Рис. 2.

происхождением аномалии магнитного поля. Поскольку эти ВРЭ имеют как общий механизм, так и сходные характеристики, их можно отнести к отдельной (4й) группе.

На рис. 3 показаны: количество (отдельно по полушариям и общее) (рис. 3а), широта (рис. 3б) и интенсивность (поток рис. 3в) высыпаний во время умеренной (SYM-H=-65 nT) магнитной бури. Широта определялась как среднее значение за сутки по всем событиям выбранного интервала, при любых значениях MLT и напряженности магнитного поля.

Интенсивность высыпаний определялась по данным только одного спутника — MetOp-1. Постоянство орбиты спутника в геоцентрической солнечно эллиптической системе координат позволяет проводить измерение потока в определённом месте пространства, в одинаковое время суток (UT), при одинаковых значениях магнитного поля  $V_{tot}$  и широты AACGMLat. Это важно, поскольку величина магнитного поля в области аномалии оказывает большое влияние на интенсивность ВРЭ 4 группы (см. рис. 1 и 2).

В соответствии со свойствами орбиты MetOp-1, поток в утреннем секторе (7,3-7,5 MLT) определялся около 07:30 UT, поток в вечернем секторе (21,1-21,6 MLT) — около 21:30 UT. Интенсивность высыпаний изменялась одинаково в обоих секторах (рис. 3в).

В начале главной фазы (до 12 октября 2017) все перечисленные параметры уменьшались. Например, количество ВРЭ 4 группы уменьшилось в 4 раза. Широта наблюдения ВРЭ, также

Видно, что уменьшение широты максимального потока, измеренного на спутнике, соответствует уменьшению величины магнитного поля.

Чем меньше величина магнитного поля в окрестности спутника, тем больше поток ВРЭ.

Широтный размер области высыпаний на спутнике NOAA-15 в 1907-1914 UT составил ~10 градусов.

Подобная картина наблюдается и во время трех пролетов спутника MetOp-2 в южном полушарии в утреннем секторе (рис. 2).

Величина максимального потока от пролета к пролету смещается на большие широты, магнитное поле при этом увеличивается, а интенсивность ВРЭ уменьшается.

Известно, что ранее изученные три группы высыпаний наблюдаются при усилении геомагнитной активности. Рассмотрим связь с активностью высыпаний, обусловленных своим

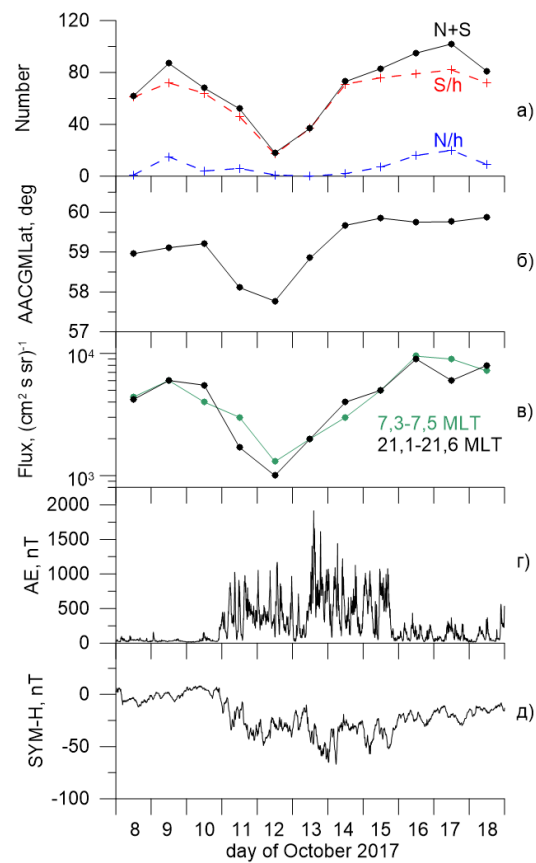


Рис. 3.

уменьшилась до минимума 12 октября (рис. 3б). Поток за это же время уменьшился на порядок (рис. 3в). После 12 октября количество, широта и интенсивность ВРЭ 4 группы непрерывно увеличивались и к концу события достигли более высоких значений, чем в начале. Это увеличение началось еще во время уменьшения индекса SYM-H, т. е. до окончания главной фазы бури.

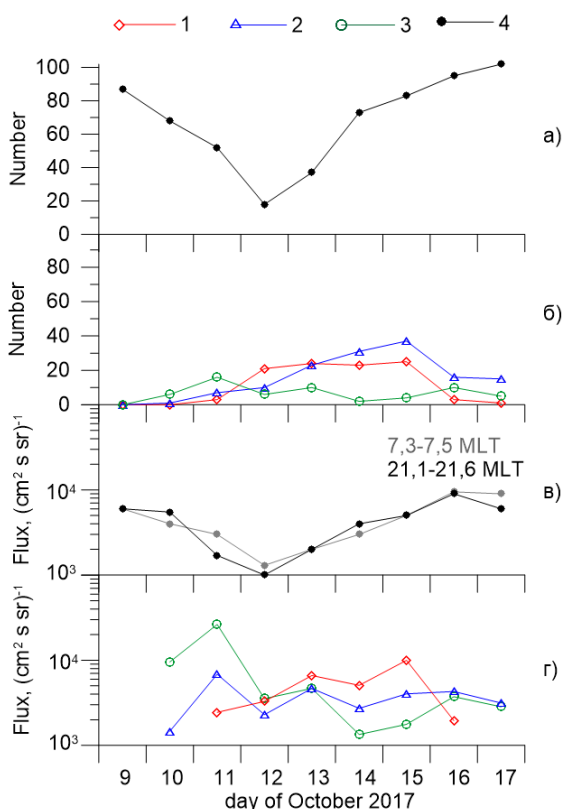


Рис. 4

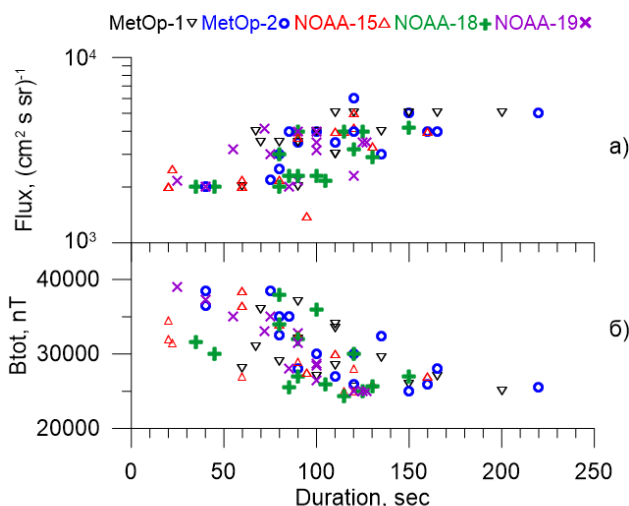


Рис. 5.

### Обсуждение и выводы

В работе исследованы высыпания релятивистских электронов, регистрируемые над областью Южно-Атлантической магнитной аномалии в течение интервала 8-18 октября 2017 г., включающего магнитную бурю. Это неинтенсивные ( $10^3 - 10^4$   $(\text{cm}^2 \text{ с ср})^{-1}$ ) и продолжительные (до 3 минут) ВРЭ. Их общий механизм и сходные характеристики дают основание отнести их к отдельной 4й группе, отличающейся от ранее изученных трёх групп [Yahnin et al., 2016, 2017]. Поскольку ВРЭ 4 группы связаны с магнитной аномалией, расположенной в южном полушарии, то и наблюдаются эти высыпания, в основном, здесь же, в южном

Поскольку высыпание всех упомянутых групп частиц осуществляются из «одного резервуара» внешнего радиационного пояса, представляет интерес сравнить их количество и интенсивность в рассматриваемом интервале (рис. 4).

Количество зарегистрированных высыпаний 4й группы показано на рис. 4а, а на рис. 4б – остальных трёх групп (обозначения групп показаны сверху). В то время, когда растет количество ВРЭ 2й и 3й групп, имеющих максимальную интенсивность (рис. 4г), количество ВРЭ 4й группы уменьшается (рис. 4а) как и поток высыпающихся частиц. Возможно, это происходит за счет высыпавшихся энергичных электронов в первых трёх группах, что привело к уменьшению общего количества энергичных частиц в радиационном поясе и, соответственно, к уменьшению числа частиц, попадающих в дрейфовый конус потерь. После 12 октября во время сильной суббулевой активности (см. рис. 3г), по-видимому, появились новые частицы, что могло способствовать росту количества и интенсивности ВРЭ 1й, 2й и 4й групп. При этом количество ВРЭ 3й группы не увеличилось, а их интенсивность заметно уменьшилась по сравнению с той, которая была в начале магнитной бури. Вероятно, это обусловлено ослаблением кольцевого тока в вечернем секторе, где генерируются наиболее интенсивные ЭМИЦ волны, ответственные за высыпания 3й группы.

Анализ продолжительности ВРЭ 4 группы проведен для 15 октября по данным наблюдения высыпаний на пяти спутниках (рис. 5).

Продолжительность пролета спутника через область высыпаний, связанных с изменением напряженности магнитного поля в области аномалии, определялась по уровню потока  $10^3$   $(\text{cm}^2 \text{ с ср})^{-1}$ . Она характеризует широтный размер области высыпаний.

Широтный размер и интенсивность (поток) увеличиваются с уменьшением напряженности магнитного поля в окрестности спутника (рис. 5).

полушарии (рис. 3а). Важно, что они могут наблюдаться не только во время усиления геомагнитной активности, но и в спокойные периоды, имея при этом меньшую интенсивность [Яхнина и др., 2023]. Сравнение количества зарегистрированных ВРЭ 4й группы в один и тот же период времени по данным одних и тех же спутников с количеством ранее изученных ВРЭ 1й, 2й и 3й групп показало явное преимущество (в разы) ВРЭ 4й группы. Это преобладание по суточному числу наблюдений сохраняется даже во время главной фазы бури, когда количество и интенсивность ВРЭ 4й группы снижаются.

Другой особенностью ВРЭ 4й группы является их большая протяженность по широте (продолжительность пролета спутника через область высыпаний до 3 минут) в отличие от локализованных ВРЭ 1й, 2й, 3й групп, для которых продолжительность пролета составляет до 30 секунд.

Интенсивность ВРЭ 4 группы остается невысокой на протяжении всего рассмотренного интервала, но при этом она сравнима со средней интенсивностью ВРЭ 1 и 2 групп. Отметим, что в конце возмущенного интервала, когда и количество, и интенсивность ВРЭ 1, 2, 3 групп сильно уменьшились, для ВРЭ 4 группы эти показатели остались высокими (рис. 4а, в).

Механизм формирования ВРЭ 4 группы предполагает наличие достаточного количества энергичных частиц в радиационном поясе. В искаженном магнитном поле энергичные частицы попадают в дрейфовый конус потерь и высыпаются. Отметим, что заполнение дрейфового конуса потерь может происходить за счет всех механизмов, обуславливающих высыпания 1й, 2й и 3й групп. Увеличение количества и интенсивности высыпаний 4-й группы в конце главной и во время восстановительной фазы бури могло быть связано с дополнительным ускорением электронов до релятивистских энергий за счет разных факторов и, в частности, за счет повышенной суббулевой активности.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что высыпания релятивистских электронов, связанные с ослаблением напряженности магнитного поля в районе Южно-Атлантической аномалии, могут вносить существенный вклад в потери частиц из радиационного пояса.

**Благодарности.** Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 22-62-00048. Авторы благодарят за свободный доступ к данным спутников NOAA POES и информации о параметрах солнечного ветра, об индексах активности AE и SYM-H из базы данных OMNI, полученных на сайте <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>

## Литература

- Яхнина Т.А., Попова Т.А., Любич А.А., Демехов А.Г. Проявление межполушарной асимметрии магнитного поля в потоках заряженных захваченных и высыпающихся частиц на низкоорбитальных спутниках в спокойных и возмущенных условиях // Proceedings of XLVI Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” - Apatity: Kola Science Center RAS. 2023. P. 80-83. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2023.46.017>
- Blake J.B., Inan U.S., Walt M., Bell T.F., Bortnik J., Chenette D.L., Christian H.J. Lightning-induced energetic electron flux enhancements in the drift loss cone // J. Geophys. Res. 2001. V.106, No.A12. P.29733-29744. <https://doi.org/10.1029/2001JA000067>
- Evans D.S., Greer M.S. Polar orbiting environmental satellite space experiment monitor-2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Tech. Memo 1.4, Boulder, Colorado: NOAA OARL Space Environment Center, 2004.
- Imhof W.L., Voss H.D., Mobilia J., Datlowe D.W., Gaines E.E. The precipitation of relativistic electrons near the trapping boundary // J. Geophys. Res. 1991. V.96, No.A4. P.5619–5629. <https://doi.org/10.1029/90JA02343>
- Sergeev V.A., Tsyganenko N.A. Energetic particle losses and trapping boundaries as deduced from calculations with a realistic magnetic field model // Planet. Space Sci. 1982. V.30, No.10. P.999–1006. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90149-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90149-0)
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J. Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation // J. Geophys. Res. Space Physics. 2017. V.122, No.9. P.9169-9182. <https://doi.org/10.1002/2017JA024249>
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Gvozdevsky B.B., Pashin A.B. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V.121, No.9. P.8286-8299. <https://doi.org/10.1002/2016JA022765>
- Yando K., Millan R.M., Green J.C., Evans D.S. A Monte Carlo simulation of the NOAA POES Medium Energy Proton and Electron Detector instrument // J. Geophys. Res. 2011. V.116. A10231. <https://doi.org/10.1029/2011JA016671>