

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ВЫСЫПАНИЯМ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В СТРАТОСФЕРЕ И НА СПУТНИКАХ

© 2021 г. Г. А. Базилевская^{1,*}, А. С. Дюсембекова², М. С. Калинин¹, М. Б. Крайнев¹,
В. С. Махмутов¹, А. К. Свиржевская¹, Н. С. Свиржевский¹, Ю. И. Стожков¹, Е. А. Тулеков²

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Нур-Султан, Республика Казахстан

*bazilevskayaga@lebedev.ru

Поступила в редакцию 01.04.2020 г.

После доработки 03.05.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

Высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ) в атмосферу являются одним из механизмов опустошения внешнего радиационного пояса Земли. Высыпающиеся электроны генерируют тормозное излучение, которое проникает в стратосферу и регистрируется детекторами на баллонах. Однако эти наблюдения могут осуществляться только когда баллон находится на высотах больше ~20 км. Околоземные спутники *POES* постоянно регистрируют потоки высыпающихся электронов в конусе потерь, но они слишком быстро перемещаются в пространстве. В работе выполнено сопоставление ВВЭ по наблюдениям в стратосфере и на спутниках в течение 2003 г. и получены оценки числа случаев ВВЭ в Апатитах в предположении, что радиозонд непрерывно находился на высоте больше 26 км.

DOI: 10.31857/S0023420621010027

ВВЕДЕНИЕ

Баллонные измерения ионизирующей радиации в атмосфере, проводимые Физическим институтом им. П.Н. Лебедева в течение более 60 лет [1], позволяют наблюдать высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ) из внешнего радиационного пояса Земли. Эти электроны поглощаются на высотах более 50 км, но они генерируют тормозное рентгеновское излучение, которое проникает в атмосферу до высот 20 км и ниже и может регистрироваться гейгеровским счетчиком, хотя и с малой эффективностью.

Изучение ВВЭ имеет фундаментальное значение, т.к. высыпания в атмосферу является одним из механизмов опустошения радиационного пояса [2]. Другим важным механизмом потерь электронов является уход электронов в межпланетное пространство, когда под давлением солнечного ветра магнитопауза сдвигается внутрь, и электроны с прежде замкнутой магнитной оболочки дрейфуют в область открытого магнитного поля [3, 4]. Относительный вклад этих механизмов в опустошение радиационного пояса не изучен.

Не менее важным является прикладное значение ВВЭ. Высокоэнергичные электроны (killers)

повреждают аппаратуру, находящуюся на околоземной орбите. Заряженные частицы накапливаются на поверхности спутника, образуя высокие напряжения, электростатические разряды и электромагнитные помехи. Проникая через защиту, они создают заряд на внутренних компонентах приборов. Прохождение энергичной заряженной частицы через узел микроэлектронного устройства может вызвать мгновенный катастрофический отказ устройства или неконтролируемые изменения режима его работы. Потеря энергии при прохождении электрона через активную область микроэлектронного устройства накапливается в течение миссии, приводя к деградации устройства и сокращению времени службы [5]. Вызывались идеи искусственного стимулирования ВВЭ, с целью обезопасить аппаратуру космических кораблей [6, 7]. Эта идея приблизилась к своему воплощению с запуском спутника *DSX* в 2019 г. [8], который несет на борту источник волн ОНЧ диапазона, эффективно влияющих как на ускорение, так и на потери электронов пояса, например, [9]. Искусственная стимуляция, а значит и увеличение ВВЭ, выдвигает на первый план оценку воздействия ВВЭ на атмосферу Земли, связанное с дополнительной ионизацией атмо-

сферы [10]. Ион-молекулярные реакции в атмосфере приводят к образованию нечетного азота (NO_x) и нечетного водорода (HO_x), которые способствуют потере озона в стратосфере и мезосфере. Кратковременное, но очень сильное разрушение озона до 90% на высотах 60–80 км может происходить при участии нечетного водорода HO_x , что подтверждено наблюдениями на спутниках [11]. Изменения содержания NO_x , связанные с ВВЭ, могут транспортироваться в нижнюю мезосферу и в стратосферу, где они являются одним из главных факторов каталитического разрушения озона. Истощение озона нарушает радиационный баланс и активизирует динамические процессы в атмосфере. Процесс распространяется вниз путем изменения полярных ветров и атмосферных волн. Таким образом, прослеживается влияние дополнительных потоков NO_x , связанных с ВВЭ, на погоду и климат [12–15]. Моделирование [16] показало, что на 10-летней шкале с ВВЭ связаны вариации содержания озона порядка 12–24% в мезосфере и 5–7% в верхней стратосфере.

ВВЭ как фактор ионизации атмосферы рекомендованы для включения в климатические модели, входящие в Coupled Model Intercomparison Project CMIP6 [17]. Существующие климатические модели используют среднесуточные скорости ионизации атмосферы, основанные на эмпирической модели реконструкции спектров ВВЭ из ежедневных индексов A_p или D_{st} [18, 19]. Модель включает ионизацию от электронов с энергией ниже 1 МэВ, что ограничивает ее применимость на высотах ниже 50 км. В работе [20], основанной на результатах прямых измерений ВВЭ на баллонах, показано, что CMIP6 может недооценивать увеличение NO_x более чем на 100% и соответствующую потерю озона на 25%.

В настоящее время ВВЭ на баллонах могут наблюдаться только в промежутки времени, когда баллон находится на достаточной высоте. В эксперименте ФИАН это время составляет около получаса, причем измерения в настоящее время производятся не каждый день. С другой стороны, функционируют спутники (*POES*, *van Allen probe*, *Электро Л1, Л2* и *Метеор М1, М2* и др.), которые наблюдают ВВЭ в магнитосфере круглосуточно. Однако пространственно-временное распределение ВВЭ из наблюдательных данных пока не получено. В связи с этим в данной работе была поставлена задача: найти соответствие между случаями ВВЭ, измеренными на баллонах, и ВВЭ, наблюдаемыми спутниками *POES*. На основании найденного соответствия было оценено количество дней в году, когда можно было бы наблюдать

ВВЭ в пункте запуска баллонов, если бы баллон круглосуточно находился в стратосфере.

НАБЛЮДЕНИЯ

Измерения ВВЭ в стратосфере являются частью многолетнего эксперимента ФИАН по мониторингу с помощью радиозондов ионизирующей радиации в атмосфере Земли от уровня моря до высот ~30 км на разных географических широтах, включая Арктику и Антарктику. Наблюдения проводятся с конца 1950-х и неоднократно описаны [1, 21]. Как уже упоминалось, тормозное излучение высыпающихся электронов измеряется гейгеровским счетчиком. Более 90% случаев ВВЭ, наблюдаемых в атмосфере, вызывается электронами с энергией $E > 200$ кэВ. С 1961 по 2019 г. зарегистрировано более 550 случаев ВВЭ в Мурманской области [22]. В Антарктиде за это время было зарегистрировано всего 14 событий, т.к. пункт наблюдений ($66^{\circ}34' \text{ S}$, $92^{\circ}55' \text{ E}$) находится в зоне открытых силовых линий. Свойства наблюдаемых ВВЭ [23, 24] согласуются с характеристиками, полученными из измерений на спутниках, например [25] и во время кампаний по исследованию ВВЭ на баллонах [26]. В данной работе сопоставление с результатами спутников серии *POES* производится для 2003 г., когда в стратосфере было зарегистрировано 26 случаев ВВЭ. Измерения проводились в Апатитах ($67^{\circ}33' \text{ N}$, $33^{\circ}20' \text{ E}$, параметр Мак Илвайна $L \sim 5.2$, время измерений – 3 раза в неделю ~09–11 UT, ~12–14 MLT). В 2003 г. 125 радиозондов достигли высоты более 26 км (остаточное атмосферное давление $X = 20$ г/см²), ниже которой наблюдаются лишь 5% случаев ВВЭ. Радиозонд находится на этих высотах обычно в течение 10–40 мин. Из рассмотрения было исключено 27 дней, когда в стратосфере присутствовали солнечные протоны.

В 2003 г. на орбите в околоземном пространстве находились 3 аппарата серии *POES* (*NOAA-15*, *NOAA-16*, *NOAA-17*) [27], разнесенные по долготе на ~100°. Угол наклона солнечно-синхронной орбиты 98.7°, высота 822 км, период обращения 101.5 мин (средние значения). Мы использовали показания прибора MERED, который имеет 2 детектора электронов, расположенных под углом 90° друг к другу. На достаточно высоких широтах телескоп, направленный в зенит, позволяет регистрировать электроны, в основном попадающие в конус потерь [28]. Прибор дает информацию об электронах с энергией выше 30, 100, 300 кэВ (каналы E_1 , E_2 , E_3). Дополнительная информация может быть получена с протонного канала P_6 , регистрирующего протоны с энергией выше 6.9 МэВ и имеющего присчет от электронов с энергией выше ~800 кэВ. В случае нулевого счета протонного

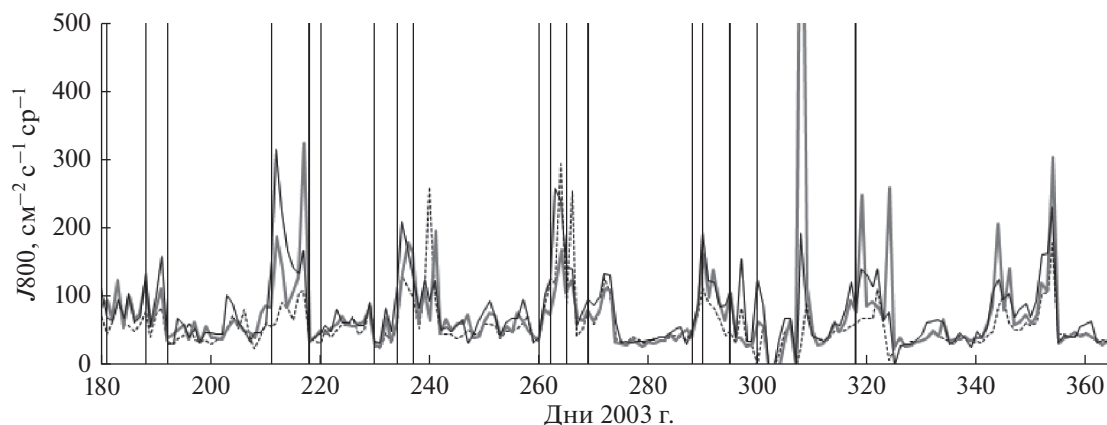


Рис. 1. Дни во второй половине 2003 г., когда в баллонных измерениях наблюдались ВВЭ — вертикальные линии. Среднесуточные значения потоков выпадающих электронов с $E > 800$ кэВ по наблюдениям на *POES 15* (пунктир), *POES 16* (серая кривая), *POES 17* (черная кривая).

канала меньших энергий (*P5*), не имеющего при-счета от электронов, канал *P6* используется для регистрации релятивистских электронов. Геометрический фактор этого канала для электронов растет от 10^{-3} см² ср при $E = 460$ кэВ до 10^{-2} см² ср при $E = 1460$ кэВ [29]. Мы обозначаем интенсивность электронов по данным этого канала как $J800$.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ВВЭ НА БАЛЛОНАХ И СПУТНИКАХ

Трудность в сопоставлении результатов двух типов измерений обусловлена тем, что запуски баллонов производятся в одном географическом пункте 3 раза в неделю в течение 10–40 мин, а спутник пролетает над этим местом за 1 минуту более 3° по широте и долготе, т.е. ~341 и ~155 км соответственно.

Тем не менее, сопоставление всех зарегистрированных на баллонах случаев ВВЭ со среднесуточными значениями потоков электронов на спутниках *POES* показало неплохое согласие, как видно из рис. 1, где представлены данные за вторую половину 2003 г. ВВЭ в стратосфере группируются в серии, коррелирующие с высокоскоростными потоками солнечного ветра и геомагнитными бурями с длительной фазой восстановления [23, 24]. Эти серии проявляются на спутниках *POES* повышенными потоками выпадающих электронов.

Нам не удалось найти случаев точного совпадения измерений ВВЭ по месту и времени на баллоне и спутниках, хотя спутник иногда пролетал в нужное время вблизи Апатит. В качестве примера близкого соответствия рассмотрим событие 28.IV.2003 г., показанное на рис. 2. Повышение

темпа счета гейгеровского счетчика при остаточном давлении ниже 20.5 г/см² (высота больше 26 км) наблюдалось в 11:20–11:37 УТ. Оно было вызвано ВВЭ, о чем свидетельствует отсутствие повышения темпа счета телескопа из 2-х счетчиков, не чувствительного к рентгеновскому излучению, например, [22]. Это ВВЭ было зарегистрировано на *POES 17*, как видно на рис. 3. Показано изменение широты и долготы проекции силовой линии, на которой находится спутник (*FLAT* и *FLON*), и потоки электронов в зависимости от времени. Во время наблюдения ВВЭ на баллоне спутник измерял потоки электронов на силовых линиях, проектировавшихся на Апатиты (изменение положения баллона во время полета не принимаем во внимание, хотя он может составлять несколько градусов). Однако точного совпадения места и времени нет: спутник проходит долготу Апатит на 4.5 мин раньше, чем широту Апатит. Таким образом, для дальнейшего сопоставления необходимо расширять область, где ожидается ВВЭ.

В настоящее время сведения о пространственных размерах области ВВЭ очень скудны [30], поэтому критерии для сопоставления результатов баллонных и спутниковых измерений ВВЭ вырабатывались методом постепенных ограничений. Параметр L был выбран между 5 и 6. Расширение *FLAT* до 66°–69° и *FLON* до 31°–36° дало совпадение измерений по времени на спутниках и баллоне в 4 случаях из 26. Расширение *FLAT* до 66°–69° и *FLON* до 10°–50° дало совпадение по времени в 14 случаях из 26. Во всех этих случаях, кроме одного, *POES* регистрировал электроны с $E > 800$ кэВ, но в этом одном событии нельзя было пользоваться данными канала *P6* из-за присутствия протонов в

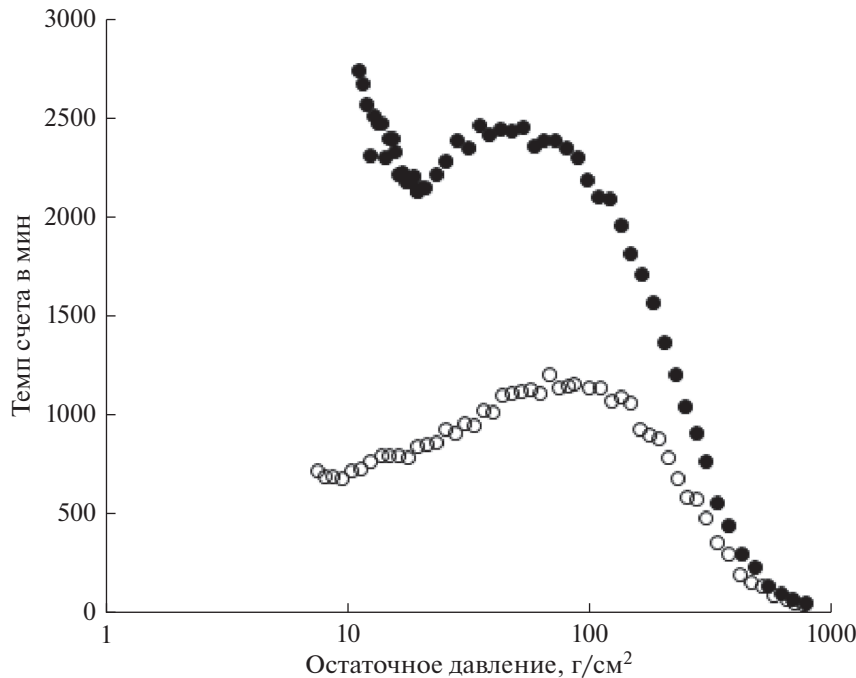


Рис. 2. Показания радиозонда в зависимости от остаточного давления 28.IV.2003 г. в Апатитах. Черные кружки — темп счета гейгеровского счетчика, светлые кружки — темп счета телескопа, умноженный на 3.

канале *P5*. Следующим шагом была выборка всех результатов *POES* при ограничениях $5^\circ \leq L \leq 6^\circ$, $66^\circ \leq FLAT \leq 69^\circ$, $10^\circ \leq FLON \leq 50^\circ$, наличии релятивистских электронов *J800* и точного времени, когда радиозонд находился на высоте более 26 км, но не регистрировал высыпания. Таких полетов зонда в 2003 г. было 125. Оказалось, что при таких ограничениях *POES 15* не регистрировал ни одного случая, *POES 16* зарегистрировал 36 случаев, *POES 17* — 53 случая, когда радиозонд находился на нужной высоте и не регистрировал ВВЭ, а на спутниках в это время ВВЭ наблюдалось. Во всех этих случаях, кроме трех, поток электронов с $E > 800$ кэВ на *POES* был $J800 < 100 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. Исключения скорее всего объясняются сильной вариабельностью потока *J800*. Из нашего анализа следует, что баллоном регистрируются практически все случаи ВВЭ, отвечающие следующим условиям на *POES*: $5^\circ \leq L \leq 6^\circ$, $66^\circ \leq FLAT \leq 69^\circ$, $10^\circ \leq FLON \leq 50^\circ$, $J800 > 100 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$. К сожалению, баллон находится на нужной высоте очень ограниченное время. Воспользовавшись найденными критериями для оценки наличия ВВЭ в стратосфере на высотах выше 26 км, мы можем с помощью данных *POES* оценить наличие ВВЭ в любое время суток в районе Апатит. Полученные оценки потоков высыпающихся электронов (рис. 4), соответствуют случаям, когда тормозное

рентгеновское излучение могло бы быть зарегистрировано в стратосфере на высотах более 26 км.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе получены первые оценки числа случаев ВВЭ в стратосфере в районе Апатит в 2003 г. при условии непрерывных наблюдений. Как и следовало ожидать, на баллонах экспериментально наблюдается лишь небольшая часть ВВЭ, присутствующих в стратосфере. Наши оценки являются сильно заниженными по следующим причинам. (1) В реальных случаях совпадений ВВЭ на баллоне и на спутнике *J800* часто было значительно ниже $100 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, т.е. ограничение на *J800* является достаточным, а не необходимым условием. (2) В действительности спутники *POES* не все время находятся в районе Апатит, значения потоков электронов получены только во время кратковременных пролетов спутников над Апатитами. Таким образом, ВВЭ в районе Апатит наблюдаются еще чаще, чем показано на рис. 4. В работе [20] ионизация в атмосфере, полученная на основании наших измерений ВВЭ в атмосфере, сравнивалась с ионизацией, рассчитанной по методике [18], рекомендованной для включения в *SMIP6* [17]. Было показано, что поскольку *SMIP6* не учитывает ионизацию ниже 50 км, это приводит к недооценке образования NO_x и влияния ВВЭ

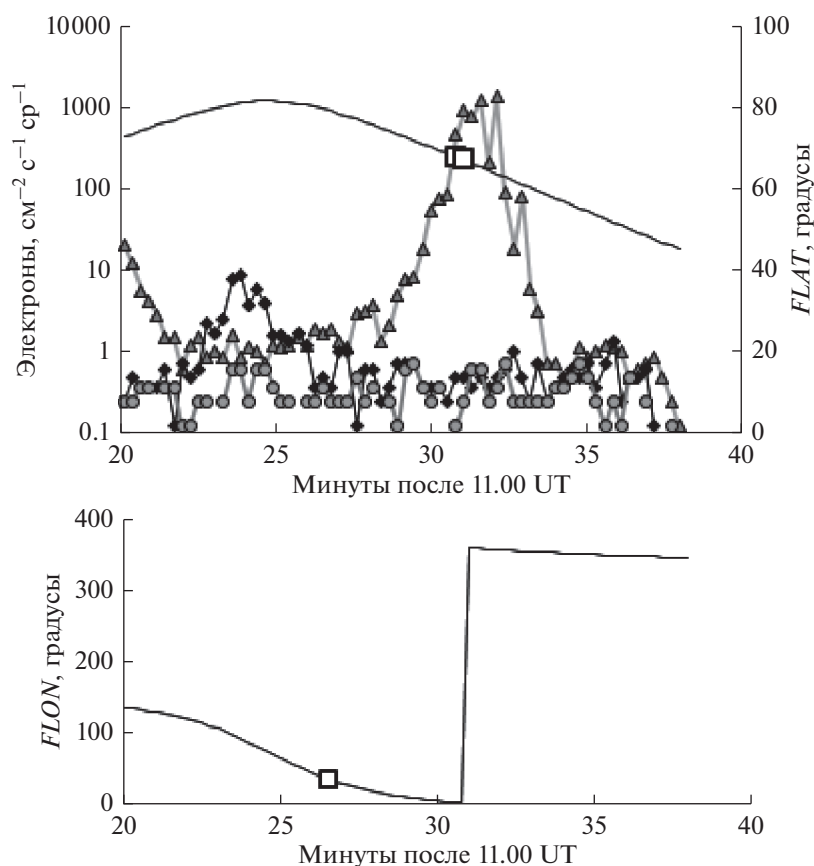


Рис. 3. Измерения на спутнике *POES 17* во время полета баллона 28.IV.2003 г. в 11.20–11.37 UT. Верхняя панель: сплошная линия – *FLAT*, большой белый квадрат – широта баллона, треугольники, ромбы и кружки – интенсивность ВВЭ с $E > 100$, > 300 , > 800 кэВ соответственно. Нижняя панель: сплошная линия – *FLON*, большой белый квадрат – долгота баллона.

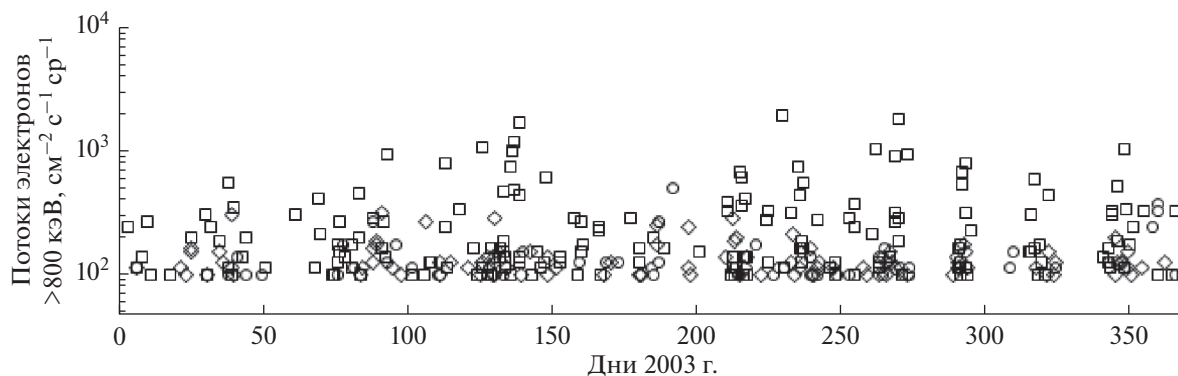


Рис. 4. Оценка потоков высыпающих электронов с $J_{800} > 100 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ на $L = 5-6$, широте $66^\circ-69^\circ$, долготе $10^\circ-50^\circ$ при круглосуточных наблюдениях согласно данным *POES 15* (кружки), *POES 16* (ромбы), *POES 17* (квадраты).

на содержание озона. В то же время отмечалось, что ВВЭ, проникающие в стратосферу – довольно редкое явление, которое, в первом приближении, можно не учитывать. Результаты данной работы показывают, что ВВЭ в стратосфере могут наблюдаться практически каждый день, т.е. примерно в 10 раз чаще, чем реально наблюдалось в нашем эксперименте. Это означает, что принятые оценки влияния ВВЭ на процессы в полярной атмосфере могут быть сильно занижены. Необходима дальнейшая работа для определения реальной частоты ВВЭ в атмосфере в другие годы и с привлечением для сравнения с баллонными наблюдениями других околоземных космических аппаратов.

Мы благодарим коллег из NOAA, предоставляющих данные спутников *POES* через интернет. Работа частично поддерживается грантом РФФИ 20-55-12020_ННИО_а. ГАБ и ВСМ признательны за стимулирующие обсуждения в рамках проекта ISSI & ISSI-BJ International Team “Relativistic electron precipitation and its atmospheric effect” под руководством И.А. Мироновой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* Longterm (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. № 10. P. 1124–1137. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.038>
2. *Millan R.M., Thorne R.M.* Review of radiation belt relativistic electron losses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. № 3. P. 362–377. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.06.019>
3. *Shprits Y.Y., Thorne R.M., Friedel R. et al.* Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2006. V. 111. № 11. A11214. <https://doi.org/10.1029/2006JA011657>
4. *Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M., Angelopoulos V.* Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms // *Nature Phys.* 2012. V. 8 № 3. P. 208–212. <https://doi.org/10.1038/nphys2185>
5. *Green J.C., Likar J., Shprits Y.* Impact of space weather on the satellite industry // *Space Weather.* 2017. V. 15. № 6. P. 804–818. <https://doi.org/10.1002/2017SW001646>
6. *Inan U.S., Bell T.F., Bortnik J., Albert J.M.* Controlled precipitation of radiation belt electrons // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A5. P. 1186. <https://doi.org/10.1029/2002JA009580>
7. *Rodger C.J., Clilverd M.A., Ulich Th. et al.* The atmospheric implications of radiation belt remediation // 2006. *Ann. Geophys.* V. 24. P. 2025–2041.
8. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dsx#launch>
9. *Jaynes A.N., Baker D.N., Singer H.J et al.* Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015. V. 120. №9. P. 7240–7254. <https://doi.org/10.1002/2015JA021234>
10. *Sinnhuber M., Nieder H., Wieters N.* Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere // *Surv. Geophys.* 2012. V. 33. P. 1281–1334. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9201-3>
11. *Andersson M.E., Verronen P.T., Rodger C.J. et al.* Missing driver in the Sun–Earth connection from energetic electron precipitation impacts mesospheric ozone // *Nature Communications.* 2014. V. 5. № 10. P. 5197. <https://doi.org/10.1038/ncomms6197>
12. *Кривоуцкий А.А., Репнев А.И.* Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009.
13. *Кривоуцкий А.А., Репнев А.И.* Воздействие космических энергичных частиц на атмосферу Земли // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2012. Т. 52. № 6. С. 723–754.
14. *Rozanov E., Calisto M., Egorova T. et al.* Influence of the precipitating energetic particles on atmospheric chemistry and climate // *Surveys in Geophys.* 2012. V. 33. P. 483–501. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9192-0>
15. *Seppala A., Clilverd M.A., Beharrell M.J. et al.* Substorm induced energetic electron precipitation: Impact on atmospheric chemistry // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 19. P. 8172–8176. <https://doi.org/10.1002/2015GL065523>
16. *Andersson M E., Verronen P.T., Marsh D.R. et al.* Polar ozone response to energetic particle precipitation over decadal time scales: The role of medium–energy electrons // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2018. V. 123. № 1. P. 607–622. <https://doi.org/10.1002/2017JD027605>
17. *Matthes K., Funke B., Andersson M.E. et al.* Solar forcing for CMIP6 (v3.2) // *Geos Model Development.* 2017. V. 10. P. 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
18. *Van de Kamp M., Seppälä A., Clilverd M.A. et al.* A model providing long-term data sets of energetic electron precipitation during geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121. № 20. P. 12520–12540. <https://doi.org/10.1002/2015JD024212>
19. *Van de Kamp M., Rodger C.J., Seppälä A. et al.* An updated model providing long-term datasets of energetic electron precipitation, including zonal dependence // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2018. V. 123. P. 9891–9915. <https://doi.org/10.1029/2017JD028253>
20. *Mironova I.A., Artamonov A.A., Bazilevskaya G.A. et al.* Ionization of the polar atmosphere by energetic electron precipitation retrieved from balloon measurements // *Geophysical Research Letters.* 2019. V. 46. № 2. P. 990–996. <https://doi.org/10.1029/2018GL079421>

21. *Чарахчян А.Н.* Исследование флуктуаций интенсивности космических лучей в стратосфере, вызываемых процессами на Солнце // УФН. 1964. Т. 83. № 1. С. 35–62.
22. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. et al.* Catalogue of electron precipitation events as observed in the long-duration cosmic ray balloon experiment. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2016. V. 149. P. 258–276.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.12.006>
23. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Квашинин А.Н. и др.* Высыпания высокоэнергичных магнитосферных электронов и сопутствующие характеристики солнечного ветра // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т. 57. № 2. С. 164–172.
<https://doi.org/10.7868/S001679401702002X>
24. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б. и др.* Характеристики высыпаний высокоэнергичных электронов и условия в магнитосфере в 1994 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. Т. 58. № 4. С. 498–508.
<https://doi.org/10.1134/S0016794018040028>
25. *Murphy K.R., Watt C.E.J., Mann I.R. et al.* The global statistical response of the outer radiation belt during geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 45. № 9. P. 3783–3792.
<https://doi.org/10.1002/2017GL076674>
26. *Millan R.M., McCarthy M.P., Sample J.G. et al.* The balloon array for RBSP relativistic electron losses (BARREL) // Space Sci. Rev. 2013. V. 179. № 1–4. P. 503–530.
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-9971-z>
27. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes>
28. *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Gvozdevsky B.B.* Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // Proc. XXXVII Annual Seminar. Apatity. P. 46–50. 2014.
29. *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>
30. *Millan R.M., the BARREL Team.* Understanding relativistic electron losses with BARREL // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73. P. 1425–1434.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.01.006>