

УДК 53.05

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В АТМОСФЕРЕ

© 2023 г. В. С. Махмутов^{1, 2, *}, Е. А. Маурчев^{3, 4, **},
Г. А. Базилевская^{1, ***}, И. А. Миронова^{5, ****}

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

²Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

⁴Полярный геофизический институт, Апатиты (Мурманская обл.), Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ),
Санкт-Петербург, Россия

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

**e-mail: maurchev1987@gmail.com

***e-mail: bazilevskayaga@lebedev.ru

****e-mail: irini.mironova@gmail.com

Поступила в редакцию 19.03.2023 г.

После доработки 05.04.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Проведение Физическим институтом им. Лебедева (ФИАН) регулярных измерений потоков заряженных частиц в атмосфере Земли позволило зарегистрировать с 1963 г. более 500 случаев высыпаний энергичных электронов в северных полярных широтах. Полученные экспериментальные данные представляют собой единственную в мире базу данных о высыпаниях электронов, зарегистрированных непосредственно в земной атмосфере. Первичные потоки высыпающихся электронов поглощаются в верхних слоях атмосферы. Однако, генерируемые ими потоки вторичных фотонов могут проникать глубоко в атмосферу, иногда до высот ~20 км, доступных для баллонных измерений ФИАН. В работе представлена новая методика восстановления энергетического спектра высыпающихся электронов, разработанная на основе моделирования методом Монте-Карло процесса распространения электронов в атмосфере. Показана применимость методики для накопленных экспериментальных данных и представлены новые результаты для отдельных событий, зарегистрированных в атмосфере.

DOI: 10.31857/S0016794023600564, EDN: ZYFLKA

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерения космических лучей на баллонах в атмосфере на разных широтах, проводимые Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН с 1957 г., позволили создать уникальную однородную экспериментальную базу данных как о галактических и солнечных космических лучах, так и о высыпаниях магнитосферных электронов в полярную атмосферу Земли [Bazilevskaya et al., 1991, 1998; Stozhkov et al., 2009; Makhmutov et al., 2016]. В мире нет другой долговременной (на протяжении 20–24 циклов солнечной активности) однородной экспериментальной базы данных о высыпаниях электронов в полярной области, зафиксированных непосредственно в атмосфере на высотах значительно ниже орбит спутников [Bazilevskaya

et al., 2020; Makhmutov et al., 2006, 2016]. Следует отметить, что интерес к изучению высыпаний энергичных электронов возник в мире в конце 1950-х годов. Были проведены десятки кратковременных измерений различной аппаратурой рентгеновских всплесков в атмосфере, связанных с высыпанием электронов из внешнего радиационного пояса [Andreson, 1958; Winckler et al., 1962]. Значительный вклад в измерения тормозного излучения на баллонах во время геомагнитных возмущений был внесен участниками проекта SAMBO [Lazutin et al., 1985]. В настоящее время продолжают исследования этого явления, например, проведено несколько одновременных наблюдений за высыпаниями электронов в атмосфере и на спутниках, таких как MAXIS, MINIS и BARREL

[Millan et al., 2013; Woodger et al., 2015]. Результаты этих исследований важны для изучения процессов, происходящих в земной магнитосфере, а также необходимы в исследованиях явлений, наблюдаемых в атмосфере на разных высотах. Так, дополнительная ионизация, создаваемая потоками высыпавшихся электронов, приводит к заметным изменениям в составе средней атмосферы, включая образование оксидов водорода и азота, с последующей потерей озона в стратосфере и мезосфере на высотах 30–80 км [например, Arsenovic et al., 2016; Sinnhuber et al., 2012; Mironova et al., 2019; Grankin et al., 2023]. При этом, для построения адекватных физико-химических моделей различных процессов необходимо определение энергетических спектров высыпавшихся электронов на границе атмосферы.

В данной работе:

- 1) кратко представлена информация об изменениях космических лучей в атмосфере, проводимых сотрудниками ФИАН (ДНС ФИАН) во время высыпаний электронов;
- 2) изложены основные характеристики новой методики RUSCOSMICS [Maurchev et al., 2019, 2021a, b, 2022], разработанной на основе моделирования методом Монте-Карло процесса распространения энергичных электронов в атмосфере и предназначенной для восстановления спектра высыпавшихся электронов на границе атмосферы;
- 3) показана применимость методики для накопленных экспериментальных данных и представлены новые результаты для отдельных событий, зарегистрированных в атмосфере.

2. ИЗМЕРЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Начиная с Международного геофизического года (1957 г.) Физический институт им. П.Н. Лебедева проводит регулярные измерения космических лучей в атмосфере [Charakhchyan, 1964; Bazilevskaya et al., 1991; Bazilevskaya and Svirzhevskaya, 1998]. Наблюдения проводятся с помощью радиозондов, поднимаемых в атмосферу средних и полярных широт до высот 30–35 км на легких метеорологических баллонах. Радиозонд (детектор) состоит из двух счетчиков Гейгера, расположенных в виде телескопа с алюминиевым фильтром толщиной 7 мм (2 г/см^2), разделяющим эти счетчики. Одиночный счетчик чувствителен к электронам ($E > 200 \text{ кэВ}$), протонам ($E > 5 \text{ МэВ}$) и рентгеновскому излучению ($E > 20 \text{ кэВ}$; чувствительность $\sim 1\%$), а телескоп регистрирует электроны ($E > 5 \text{ МэВ}$) и протоны ($E > 30 \text{ МэВ}$). Эффективность регистрации заряженных частиц близка к 100%. Данные о темпе счета частиц и об остаточном давлении воздуха передаются на наземный приемник. Известно, что высыпавшиеся электроны поглощаются в верхних слоях атмо-

сферы (на уровнях, соответствующих остаточной атмосфере в несколько г/см^2). Однако они генерируют рентгеновские лучи, которые могут проникать довольно глубоко в атмосферу и могут быть обнаружены одиночным счетчиком, чувствительным к рентгеновским лучам, но не телескопом. В случае высыпаний электронов увеличение скорости счета одиночного счетчика (но не телескопа) более чем на 30% наблюдалось на высоте более 20 км, по крайней мере, в течение 10 мин. В $\sim 75\%$ зарегистрированных высыпаний рентгеновские лучи проникали на глубину $\sim 25 \text{ км}$, причем треть из них регистрировалась на высотах выше 30 км. Таким образом, мы в основном имеем дело с высыпаниями электронов с энергиями выше нескольких сотен кэВ [Makhmutov et al., 2001]. На рис. 1 (слева) приведен пример зарегистрированного высыпания 7 июля 2003 г. (08:51–09:43 UT): скорость счета одиночного счетчика (1) увеличивается начиная с высот более 24 км (остаточная атмосфера $X < 30 \text{ г/см}^2$), темп счета телескопа на этих высотах (3; кружки) соответствует фоновому уровню, зарегистрированному накануне 5 июля 2003 г. (4; треугольники). Разности скорости счета одиночного счетчика во время высыпания 7 июля 2003 г. (кружки; 1) и скорости счета счетчика в спокойный период накануне 5 июля (фоновые измерения, треугольники; 2) на уровнях остаточной атмосферы $X < 30 \text{ г/см}^2$, представляют собой спектр поглощения тормозных фотонов в земной атмосфере (рис. 1, справа). В данном событии он удовлетворительно описывается функцией $\Delta N(X) = 10245 - \exp(-X/7.3)$, с величиной достоверности $R^2 = 0.8704$.

Каким образом, исходя из зарегистрированного спектра поглощения фотонов в атмосфере, определить энергетический спектр высыпавшихся электронов на границе атмосферы?

Рассмотрим степенной спектр высыпавшихся электронов на границе атмосферы в виде

$$N_{\text{el}} = A_1 E^{-\gamma}. \quad (1)$$

Тогда общее число электронов в интервале энергий от 20 кэВ до некоторой энергии E_{max} можно определить из соотношения

$$N_{\text{el}}(>20 \text{ кэВ}) = \int_{20}^{E_{\text{max}}} A_1 E^{-\gamma} dE. \quad (2)$$

Для нормировки серии результатов расчетов можно использовать нормировку $N_{\text{el}}(>20 \text{ кэВ}) = 1$. В этом случае параметр спектра электронов A_1 может быть записан как

$$A_1 = (-\gamma + 1) / (E_{\text{max}}^{(-\gamma+1)} - 20^{(-\gamma+1)}). \quad (3)$$

Для перехода от энергетического спектра высыпавшихся электронов к наблюдаемому спектру поглощения фотонов в атмосфере (и наоборот),

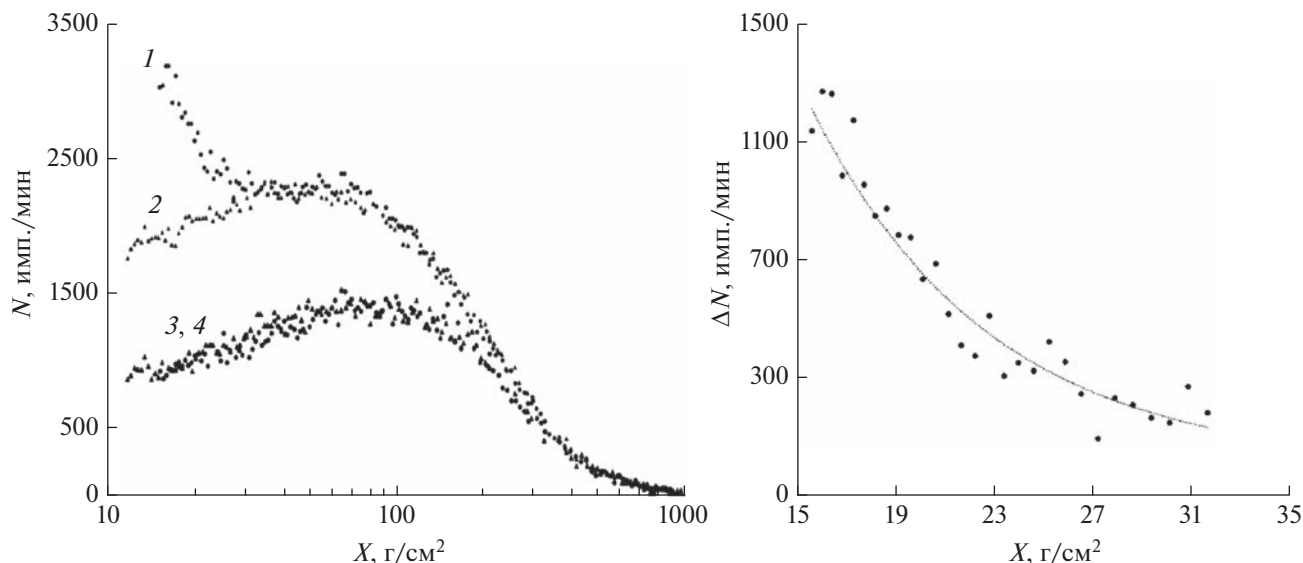


Рис. 1. Пример события выпадения электронов, наблюдаемого в стратосфере. Слева — одноминутные значения скорости счета одиночного счетчика (N) во время выпадения 7 июля 2003 г. (кружки; 1) и в спокойных условиях 5 июля 2003 г. (треугольники; 2) в зависимости от глубины остаточной атмосферы (X). Данные телескопа (3) и (4) соответствуют измерениям 7 июля (кружки) и 5 июля 2003 г. (треугольники) соответственно. Для удобства представления данных темп счета телескопов увеличен в 4 раза. Справа — спектр поглощения фотонов в атмосфере во время выпадения электронов 7 июля 2003 г.

необходимы детальные расчеты процессов распространения потоков электронов и тормозного излучения в земной атмосфере. Это позволит установить энергетические спектры вторичных частиц и их угловые распределения на необходимых уровнях атмосферы (высоты или остаточной атмосферы). В результате будет рассчитан спектр поглощения рентгеновского излучения (фотонов) в атмосфере, например, в виде аппроксимирующей функции

$$N_{\text{ph}} = \Delta N(x) = C_1 \exp(-X/X_0), \quad (4)$$

где C_1 и X_0 — константы; X — остаточное давление (атмосферная глубина) в атмосфере.

В конечном итоге, можно установить необходимые соотношения между характеристиками первичного спектра выпадящих электронов (коэффициенты A_1 , γ и E_{max}) и параметрами спектра поглощения фотонов в атмосфере C_1 и X_0 . Для этого нами были проведены расчеты с использованием нового программного комплекса RUSCOSMICS, основанного на GEANT4.

3. МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ВЫПАДАЮЩИХСЯ ЭЛЕКТРОНОВ В ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

Расчеты в операционной системе Ubuntu Linux проведены с использованием нового программного комплекса RUSCOSMICS по методу Монте-Карло, основанного на GEANT4 [Agostinelli et al., 2003; Maurechev et al., 2019, 2021a, b, 2022; [https://](https://ruscsmics.ru/FIANRSCSM/)

ruscsmics.ru/FIANRSCSM/]. При этом использовалось описание стандартных классов физических процессов, включающее ионизацию, образование тормозного излучения, аннигиляцию электронов и позитронов, однократное и многократное рассеяние частиц, фотоэффект и комптоновское рассеяние фотонов, образование электрон-позитронных пар. К процессам неупругого рассеяния первичных электронов относятся диссоциация молекул, возбуждение и ионизация атомов и молекул. Эти процессы уменьшают величину первичного потока электронов.

Фотоны (с энергиями в диапазоне 0.01–20 МэВ), распространяющиеся в атмосфере, участвуют в следующих физических процессах.

1. Фотоэлектрический эффект, при котором испускается электрон, вследствие поглощения фотона атомом атмосферы. Этот эффект существенен при энергиях фотонов $E_{\text{ф}} < 200$ кэВ.

2. Когерентное (томсон-рэлеевское) рассеяние, при котором происходит отклонение фотонов атомными электронами. Этот процесс также дает вклад в сечение взаимодействия при низких энергиях.

3. Некогерентное (или комптоновское) рассеивание, при котором фотон рассеивается атомными электронами и передает ему часть энергии, достаточную для создания свободного электрона. Этот эффект является основным в области энергий 0.1–5 МэВ.

4. Процесс рождения электрон-позитронных пар в поле атомного ядра и в поле атомных элект-

тронов. Этот процесс возможен лишь при энергиях $E_{\text{ф}} > 1.022 \text{ МэВ}$ ($E > 2E_0$, E_0 — масса покоя электрона). Рожденные при этом электроны, проходя через атмосферу, создают тормозное излучение и ионизируют атомы среды. Позитрон рожденной пары аннигилирует и создает поток фотонов.

Важно отметить, что в исследуемой области энергий падающих электронов (и, соответственно, рожденных фотонов) $E = 0.2 \text{ МэВ}$ — несколько МэВ, основным процессом, сопровождающим прохождение тормозных фотонов, которые образуются потоком падающих электронов, является комптон-эффект.

— В расчетах потоки электронов, позитронов и рентгеновского излучения оценивались с учетом их энергетических и угловых распределений на нескольких уровнях атмосферного давления (или высотах).

— Первичный источник частиц в модели реализован в исходном коде с наследованием класса G4V User Primary Generator Action. Он реализуется в виде точечного источника, расположенного на границе модели атмосферы, с возможностью задания как изотропного, так и нормального углового распределения нисходящего потока в полушарии. Рассмотрено изотропное и вертикальное распределения электронов на границе атмосферы.

— Расчет прохождения моноэнергичного потока электронов с энергией в диапазоне от 20 кэВ до 30 МэВ. В действительности энергия высыпавшихся электронов редко превышает 20 МэВ.

— Первичный спектр высыпавшихся электронов был задан в степенном виде (1).

Показатель наклона спектра γ выбирался от 1 до 5, с шагом 0.5. При каждом значении γ были рассчитаны истории прохождения через атмосферу от 10^6 до 2.5×10^6 электронов.

— В расчетах использовалась модель земной атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002], которая позволяет получить плотность, температуру и массовое соотношение кислорода, азота, гелия и аргона. Вывод результатов расчетов проведен для высот атмосферы от 20 км до 100 км. Диапазон давлений, в котором, в основном, наблюдаются потоки рентгеновского излучения в наших измерениях, в атмосфере, в большинстве случаев не выходит за пределы $1\text{--}30 \text{ г/см}^2$.

— Возможно использование плоской или сферической геометрии атмосферы; соответственно вся атмосфера, в зависимости от выбранной геометрии разбивается на совокупность множества плоских или сферических однородных слоев. Для каждого слоя рассчитывается плотность воздуха и его состав, в соответствии с выбранной моделью атмосферы. Число слоев и их высотное распределение определяется заданием уровней атмосферы, на которых необходимо получить промежу-

точные расчетные данные процесса распространения частиц.

— Выбор оптимальной величины пробега различных частиц в воздухе (параметр 'cut in range'), меньше которой частицы выбывают из результирующей статистики, позволяет существенно уменьшить время вычислений.

В результате проведения большого цикла расчетов на базе RUSCOSMICS определены результирующие соотношения между параметром спектра поглощения фотонов (X_0) в интервале давлений $1\text{--}30 \text{ г/см}^2$ и показателем первичного степенного энергетического спектра электронов (γ) при различных величинах максимальной энергии электронов (рис. 2). Наблюдаемый разброс точек зависит от разнообразия заданных параметров, а также от количества расчетных циклов и не является систематическим. Результаты существенно не изменяются при включении нормального распределения высыпавшихся электронов и E_{max} до 20 МэВ.

На рис. 3, для примера, представлено сравнение энергетических спектров высыпавшихся электронов, полученных с применением новой методики, по данным одновременных измерений на ст. Апатиты 7 июля 2003 г. (09:05–09:33 UT) и 25 августа 2003 г. (08:51–09:43 UT) в атмосфере на баллонах в атмосфере (сплошные линии) и на спутнике POES-16 (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/>). Изучение высыпаний магнитосферных электронов — одна из главных задач спутников серии POES. В 2003 г. на орбите в околоземном пространстве находились 3 аппарата (POES-15, 16, 17), разнесенные по долготе на $\sim 100^\circ$. Угол наклона солнечно-синхронной орбиты 98.7° , высота 822 км, период обращения 101.5 мин (средние значения). Сопоставление результатов измерений, сделанных в определенном географическом пункте, с данными спутников представляет трудности из-за быстрого перемещения спутников в пространстве и сильной пространственной и временной изменчивости потоков высыпавшихся электронов [Bazilevskaya et al., 2021].

POES-16 — ближайший спутник в момент регистрации высыпания электронов на баллоне в атмосфере (ст. Апатиты, Мурманская обл.). В каждом случае взяты данные измерений спутника за 1 мин (3 измерения со скважностью 16 с). Расстояние между баллоном и спутником 7 июля 2003 г. больше 2500 км, а 25 августа 2003 г. — около 800 км (рис. 3). Учитывая вариабельность потоков высыпавшихся электронов в пространстве и времени и короткое время сбора данных на спутнике (вследствие большой орбитальной скорости), можно считать согласие результатов определения спектров из измерений в атмосфере и на спутнике удовлетворительным.

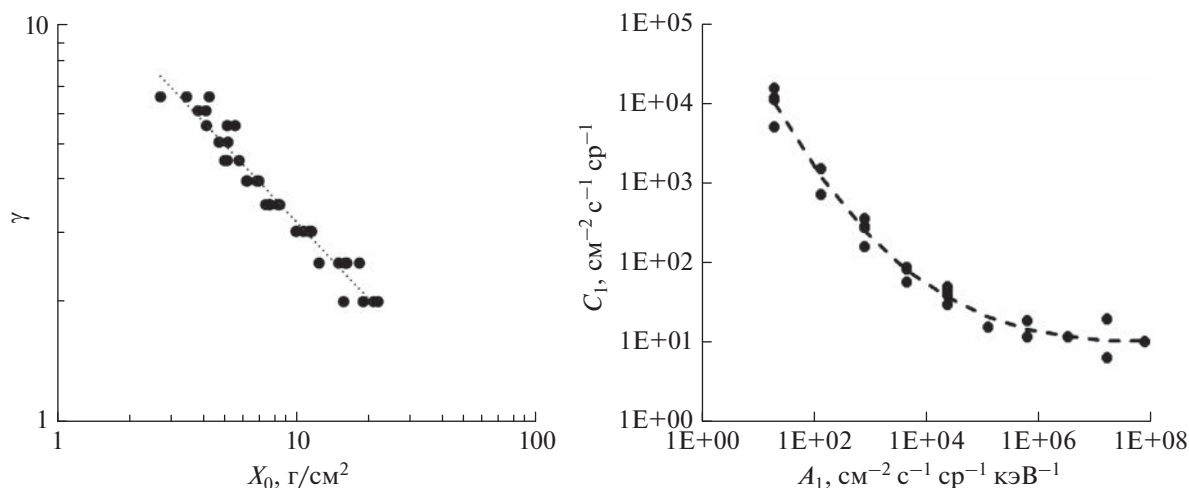


Рис. 2. Результаты расчетов: слева — зависимость параметра спектра поглощения фотонов X_0 в атмосфере от показателя степенного спектра высыпавшихся электронов γ . Справа — соотношение параметра спектра поглощения фотонов C_1 в атмосфере и параметра спектра высыпавшихся электронов A_1 .

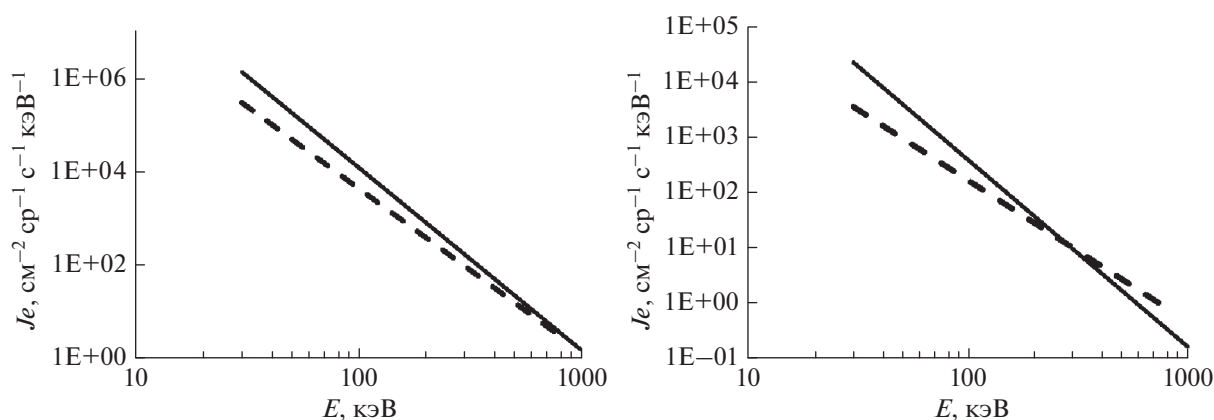


Рис. 3. Сравнение энергетических спектров высыпавшихся электронов, полученных по данным одновременных измерений 7 июля 2003г. (09:05–09:33 UT; слева) и 25 августа 2003г. (08:51–09:43 UT; справа) на баллонах (сплошные линии) и на спутнике POES-16 (штриховые линии).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый метод, на основе программного комплекса RUSCOSMICS, использующий моделирование Монте-Карло (GEANT4), позволяющий описать распространение высыпавшихся электронов и фотонов в атмосфере. Метод учитывает эволюцию углового распределения и энергетических спектров электронов и рентгеновских фотонов в атмосфере. Получены количественные соотношения между параметрами падающего первичного электрона потока в верхней части атмосферы и характеристиками вторичных потоков рентгеновского излучения на различных уровнях в атмосфере. Показана возможность определения энергетических спектров первичных электронов с использованием нового кода RUSCOSMICS из данных измерений ФИАН на баллонах в атмосфере. Получено удовлетворительное согласие энергетических спектров электронов, по данным изме-

рений на баллонах с результатами измерений высыпаний электронов на борту спутника POES-16 в условиях совпадения во времени и близкого расположения детекторов в пространстве.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим исследователей, представляющих через Интернет данные спутника POES о потоках электронов (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа была выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-55-12020), the Deutsche Forschungsgemeinschaft (grant no. SI 1088/7-1). Г.А. Базилевская и И.А. Миронова поддержаны грантом Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 22-62-00048).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Agostinelli S., Allison J., Amako K. et al.* Geant4 — a simulation toolkit // Nucl. Instrum. Meth. A. V. 506. № 3. P. 250–303. 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- *Anderson K.A.* Soft radiation events at high altitude during the magnetic storm of August 29–30, 1957 // Phys. Rev. V. 111. P. 1397–1405. 1958.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.111.1397>
- *Arsenovic P., Rozanov E., Stenke A., Funke B., Wissing J., Mursula K. et al.* The influence of middle range energy electrons on atmospheric chemistry and regional climate // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 149. P. 180–190. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.04.008>
- *Bazilevskaya G.A., Krainev M.B., Stozhkov Yu.I., Svirzhetskaya A.K., Svirzhevsky N.S.* Long-term Soviet program for the measurement of ionizing radiation in the atmosphere // J. Geomagn. Geoelectr. V. 43 (Suppl.). P. 893–900. 1991.
https://doi.org/10.5636/jgg.43.Supplement2_893
- *Bazilevskaya G.A., Svirzhetskaya A.K.* On the stratospheric measurements of cosmic rays // Space Sci. Rev. V. 85. P. 431–521. 1998.
- *Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B., Makhmutov V.S., Stozhkov Y.I., Svirzhetskaya A.K., Svirzhevsky N.S., Gvozdevsky B.B.* Temporal characteristics of energetic magnetospheric electron precipitation as observed during long-term balloon observations // J. Geophys. Res. — Space. V. 125. № 11. e28033. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028033>
- *Bazilevskaya G.A., Dyusembekova A.S., Kalinin M.S., Krainev M.B., Makhmutov V.S., Svirzhetskaya A.K., Svirzhevsky N.S., Stozhkov Yu.I., Tulekov E.A.* Comparison of the results on precipitation of high-energy electrons in the stratosphere and on satellites // Cosmic Res. V. 59. № 1. P. 24–29. 2021.
<https://doi.org/10.1134/S0010952521010020>
- *Charakhchyan A.N.* Investigation of stratosphere cosmic ray intensity fluctuations induced by processes on the Sun // Usp. Fiz. Nauk. V. 83. P. 35–62. 1964.
- *Grankin D., Mironova I., Bazilevskaya G., Rozanov E., Egorova T.* Atmospheric Response to EEP during Geomagnetic Disturbances // Atmosphere. V. 14. № 2. P. 273. 2023.
<https://doi.org/10.3390/atmos14020273>
- *Lazutin L.L., Khrushchinsky A.A., Kozelova T.V. et al.* SAMBO-GEOS: On three-dimensional substorm dynamics — A case study for 4 March 1979 // Adv. Space Res. V. 5. № 4. P. 171–174. 1985.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90134-6](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90134-6)
- *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B., Storini M.* Long-term cosmic ray experiment in the atmosphere: energetic electron precipitation events during the 20–23 solar activity cycles // Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf., Hamburg, SH. P. 4196–4199. 2001.
- *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Desorgher L., Flückiger E.* Precipitating electron events in October 2003 as observed in the polar atmosphere // Adv. Space Res. V. 38. № 8. P. 1642–1646. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.01.016>
- *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I., Svirzhetskaya A.K., Svirzhevsky N.S.* Catalogue of Electron Precipitation Events as Observed in the Long-Duration Cosmic Ray Balloon Experiment // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 149. P. 258–276. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.12.006>
- *Maurchev E.A., Mikhalko E.A., Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.* RUSCOSMICS Software Package as a tool for estimating the Earth's atmosphere ionization rate by cosmic ray protons // B. Russ. Acad. Sci. Phys. V. 83. № 5. P. 653–656. 2019.
<https://doi.org/10.3103/S1062873819050241>
- *Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B.* Modeling the transport of Solar Cosmic Ray Proton Fluxes through Earth's Atmosphere for the GLE42 and GLE44 Events // B. Russ. Acad. Sci. Phys. V. 85. P. 273–276. 2021a.
<https://doi.org/10.3103/S1062873821030151>
- *Maurchev E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Mikhalko E.A., Gvozdevsky B.B.* Calculating the Rate of Ionization during a GLE Event with a Global Model of Earth's Atmosphere and Estimating of the Contribution to this Process from Galactic Cosmic Ray Particles with $Z > 2$ // B. Russ. Acad. Sci. Phys. V. 85. P. 277–281. 2021b.
<https://doi.org/10.3103/S1062873821030163>
- *Maurchev E.A., Mikhalko E.A., Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B.* Estimated equivalent radiation dose at different altitudes in Earth's atmosphere // Sol-Terr. Phys. V. 8. № 3. P. 27–31. 2022.
<https://doi.org/10.12737/stp-83202204>
- *Millan R.M., McCarthy M.P., Sample J.G. et al.* The balloon array for RBSP relativistic electron losses (BARREL) // Space Sci. Rev. V. 179. P. 503–530. 2013.
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-9971-z>
- *Mironova I., Artamonov A., Bazilevskaya G., Rozanov E., Makhmutov V., Mishev A., Karagodin A.* Ionization of the polar atmosphere by energetic electron precipitation retrieved from balloon measurements // Geophys. Res. Lett. V. 46. P. 990–996. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2018GL079421>
- *Picone J.M., Hedin A.E.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. V. 107. № A12. P. 1468. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
- *Sinnhuber M., Nieder H., Wieters N.* Energetic Particle Precipitation and the Chemistry of the Mesosphere/Lower Thermosphere // Surv. Geophys. V. 33. P. 1281–1334. 2012.
<https://doi.org/10.1007/s10712-012-9201-3>
- *Stozhkov Y.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., Kvashnin A.N., Makhmutov V.S., Svirzhetskaya A.K.* Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere // Adv. Space Res. V. 44. № 10. P. 1124–1137. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.038>
- *Winckler J.R., Bhavsar P.D., Anderson K.A.* A study of the precipitation of energetic electrons from the geomagnetic field during magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 67. № 10. P. 3717–3735. 1962.
<https://doi.org/10.1029/JZ067i010p03717>
- *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. V. 120. P. 4922–4935. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020874>
- <http://www.cern.ch/geant4>
- <https://ruscosmics.ru/FIANRSCSM/>
- <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/>