

АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВРЕМЯ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2021 г. В. С. Махмутов^{1, 2, *}, Г. А. Базилевская¹, И. А. Миронова³, М. Синихубер⁴,
Е. Розанов^{3, 5}, Т. Суходолов⁵, Б. Б. Гвоздевский⁶, Н. С. Свиржевский¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)”,
Долгопрудный, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

⁴Технологический институт Карлсруэ, Институт метеорологии и изучения климата, Карлсруэ, Германия

⁵Высшая техническая школа, Мирный радиационный центр и Институт атмосферы и климата,
Физическая и метеорологическая обсерватория, Давос, Швейцария

⁶Федеральное государственное бюджетное научное учреждение “Полярный геофизический институт”,
Апатиты, Россия

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

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Представлены результаты анализа данных о выпадениях в атмосферу высокоэнергичных магнитосферных электронов и их воздействии на концентрацию оксида азота NO в атмосфере на высотах 64–90 км. Используются ряды данных о выпадениях, зарегистрированных на баллонах на полярной станции Апатиты (Мурманская обл.) в период 2002–2012 гг., и результаты измерений оксида азота NO спектрометром SCIAMACHY, установленным на борту европейского спутника ENVISAT. Рассмотрен отклик вариаций концентрации NO на отдельные случаи выпадений высокоэнергичных электронов и средний отклик на все события, зарегистрированные в атмосфере в 2002–2012 гг.

DOI: 10.31857/S0367676521110223

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние регулярные измерения потоков заряженных частиц в атмосфере Земли, проводимые сотрудниками долгопрудненской научной станции ФИАН, помимо регистрации галактических и солнечных космических лучей, позволяют наблюдать выпадения высокоэнергичных электронов (ВВЭ) с энергией выше сотен кэВ из внешнего радиационного пояса в земную атмосферу. К настоящему времени зарегистрировано более 600 случаев ВВЭ на полярных широтах (ст. Апатиты, Мурманская обл. и обсерватория Мирный в Антарктиде) [1, 2]. Высыпающиеся электроны участвуют в ион-молекулярных реакциях на высотах мезосферы и верхней стратосферы, приводящих к генерации реактивных соединений азота NO_x (N, NO, NO₂, NO₃) и водорода HO_x (H, OH, HO₂). Эти соединения участвуют в каталитических реакциях, приводящих к разрушению озона [3], причем HO_x доминируют на высотах больше 45 км, тогда как NO_x, особенно во

время полярной зимы, могут транспортироваться вниз на высоты до ~25 км и разрушать озон в стратосфере (так называемое не прямое воздействие). В свою очередь озон играет ключевую роль в радиационном балансе стратосферы, изменения его концентрации влияют на температуру и циркуляцию воздушных масс в стратосфере и тропосфере. По рекомендации Всемирной программы исследования климата WCRP выпадения высокоэнергичных частиц включены в химикоклиматические модели CMIP6 [4] как часть естественного солнечного воздействия на климат [5]. Однако последние исследования [6, 7] показали систематическую недооценку моделями CMIP6 вклада выпадающих высокоэнергичных электронов в ионизацию атмосферы на высотах ниже 60 км. Тесная связь концентрации оксида азота NO на высотах 70–75 км в полярной зоне с авроральной активностью (электронов с энергиями десятки кэВ) показана во многих работах (см., например, [8] и ссылки там). Но сопоставления концентрации NO с ВВЭ, наблюдаемыми в атмосфере, до сих

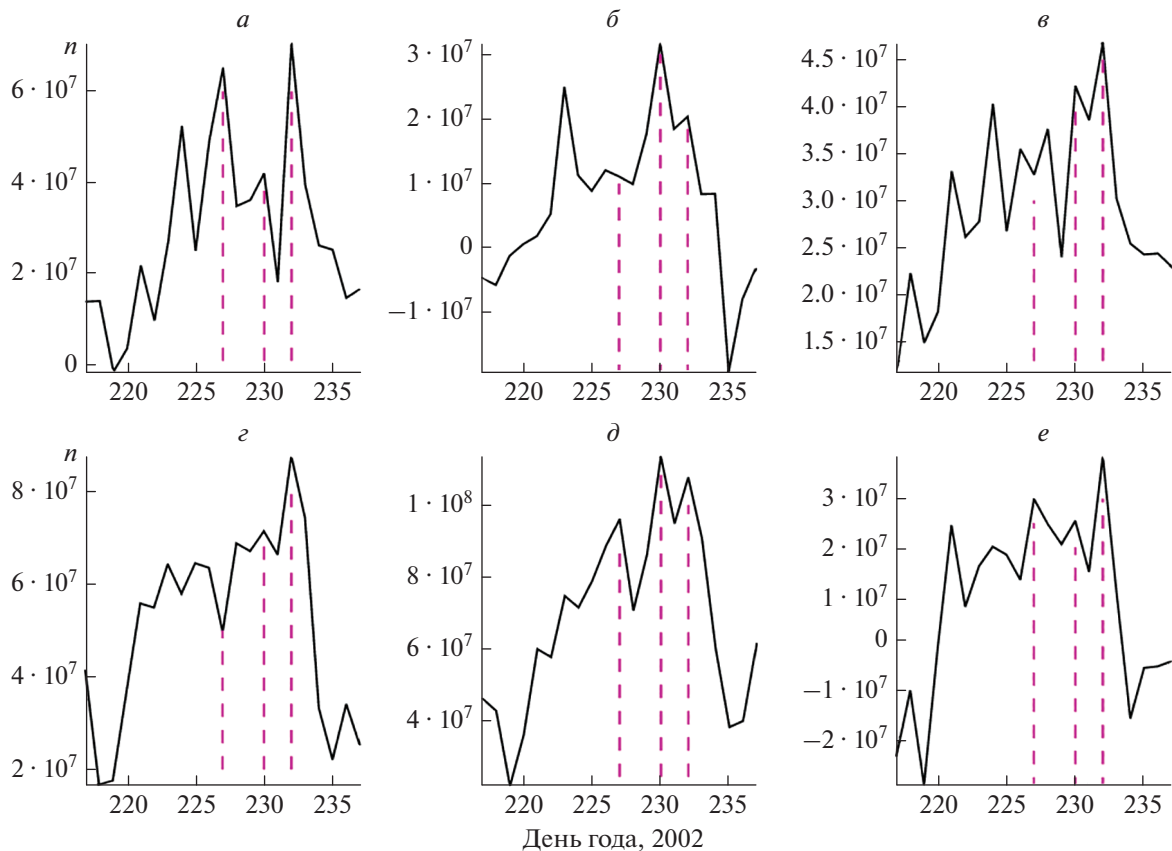


Рис. 1. Вариации концентрации оксида азота (n , см^{-3}) по данным измерений прибором SCIAMACHY на борту спутника ENVISAT в атмосфере на высотах 90 (а), 86 (б), 80 (в), 76 (г), 72 (д) и 66 км (е) в период с 6 августа 2002 г. по 26 августа 2002 г. Вертикальные штриховые линии соответствуют датам зарегистрированных высыпаний энергичных электронов на станции Апатиты (Мурманская обл.) 16, 19 и 21 августа 2002 г.

пор не проводилось. В данной работе представлены первые результаты совместного анализа данных о ВВЭ, зарегистрированных на ст. Апатиты (Мурманская обл., 67.55° с.ш., 33.33° в.д.) в период 2002–2012 гг. и данных о концентрации NO в атмосфере на высотах 64–90 км, измеренных спектрометром SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartography), установленным на борту спутника ENVISAT [8, 9]. Исследован отклик вариаций концентрации оксидов азота на отдельные случаи ВВЭ и на серию событий.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Измерения ионизирующих частиц на шаракзондах в земной атмосфере полярных и средних широт проводятся с 1957 г. по настоящее время [10]. Они позволяют измерять в атмосфере тормозное излучение электронов и таким образом регистрировать ВВЭ из внешнего радиационного пояса, хотя сами электроны поглощаются на высотах более 50 км. Энергия высыпающихся электронов

составляет сотни кэВ—несколько МэВ. Методика и результаты измерений подробно описаны в [1, 2].

Спутник ENVISAT [9] находился на солнечно-синхронной орбите с высотой ~ 800 км в 2002–2102 гг. Мы использовали усредненные за день данные о концентрации оксида азота NO на высотах 64–90 км, полученные из лимбовых наблюдений рассеянного солнечного ультрафиолетового излучения на длине волны 250 нм (NO γ -band emissions) сканирующим 8-канальным прибором SCIAMACHY. Были отобраны данные, когда спутник находился на близком расстоянии от места наблюдения ВВЭ: в пределах $\pm 1.5^\circ$ по широте и $\pm 15^\circ$ по долготе. Другая серия данных содержала величины концентрации NO, усредненные от 0° до 360° долготы, а по широте в пределах $\pm 1.3^\circ$ от места наблюдения ВВЭ. Результаты анализа мало отличались для этих двух серий, поэтому мы приводим данные только для ближайшего пролета спутника.

Для примера на рис. 1 приведены результаты измерений концентрации NO во время высыпаний 16, 19 и 21 августа 2002 г. Показаны вариации

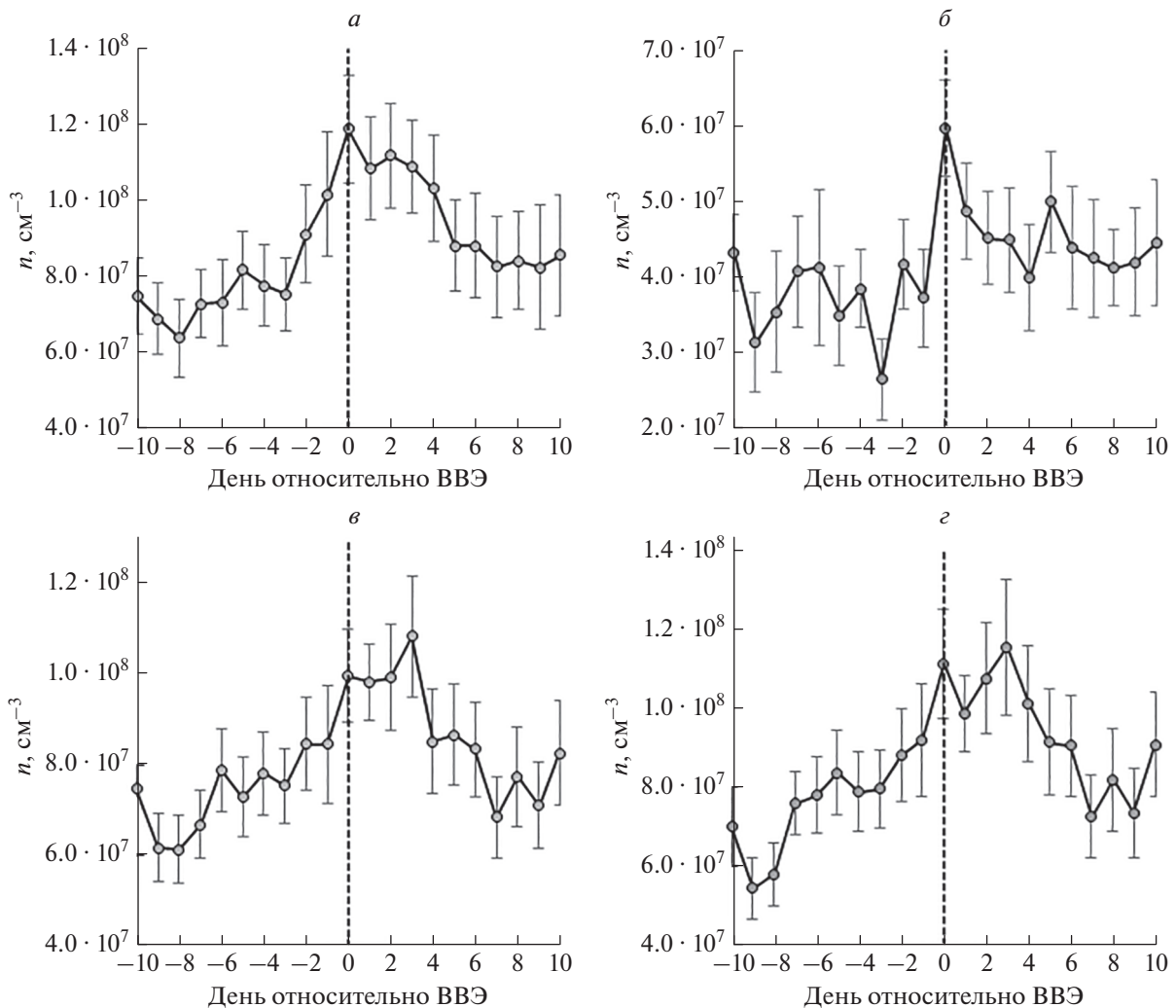


Рис. 2. Результаты применения метода наложенных эпох к данным измерений концентрации оксида азота прибором SCHIAMACY на борту спутника ENVISAT на разных высотах: 88 (а), 82 (б), 70 (в) и 68 км (г). “Ноль-день” отмечен вертикальной штриховой линией и соответствует дню регистрации высыпания магнитосферных электронов в атмосфере по данным зондовых измерений космических лучей на ст. Апатиты (Мурманская обл.) в 2002–2012 гг.

концентрации оксида азота (n , см^{-3}) по данным измерений прибором SCHIAMACY в атмосфере на высотах 90 км (рис. 1а), 86 км (рис. 1б), 80 км (рис. 1в), 76 км (рис. 1г), 72 км (рис. 1д) и 66 км (рис. 1е) в период с 6 августа 2002 г. по 26 августа 2002 г. Вертикальные штриховые линии соответствуют датам зарегистрированных высыпаний энергичных электронов на станции Апатиты (Мурманская обл.). В концентрациях NO ясно виден отклик на события ВВЭ на всех высотах. Отклик NO на авроральные высыпания [8] показывает ослабление на высотах 66 км, который мы видим на рис. 1. ВВЭ производят ионизацию атмосферы до более низких высот, чем авроральные электроны, энергия которых не превосходит десятков кэВ [6].

Мы применили метод наложения эпох, чтобы оценить средний вклад ВВЭ в концентрацию NO по данным SCHIAMACY. В качестве ноль-дней были использованы даты регистрации ВВЭ в 2002–2012 гг. в Апатитах [11], всего 64 события. На рис. 2а–2г показаны результаты метода наложения эпох для концентрации NO на высотах 88, 82, 70 и 68 км соответственно. Поведение концентрации вблизи нуля-дня имеет сглаженный максимум, т.к. события ВВЭ происходят сериями во время длительных геомагнитных возмущений [2], и соседние ВВЭ дают вклад в дни, предшествующие и последующие относительно нулевого дня. Нужно отметить, что усреднение концентрации NO за весь период измерений SCHIAMACY является лишь первым шагом в изучении связи между ВВЭ и NO в атмосфере, т.к. не учтены такие особенно-

сти, как разное время жизни NO в летний и зимний периоды, зависимость от геомагнитной обстановки, зависимость эффективности регистрации NO прибором от зенитного угла Солнца и т.п. На рис. 1 видно, что ответ NO на ВВЭ сильно меняется от одного события ВВЭ к другому. Все это предстоит исследовать в дальнейшей работе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены первые результаты сопоставления случаев высыпаний высокоэнергичных магнитосферных электронов, зарегистрированных на баллонах в стратосфере Мурманской области, с концентрацией оксида азота NO на высотах 64–90 км по измерениям прибора SCIAMACHY, установленного на борту спутника ENVISAT. Показаны возрастания концентрации NO в день ВВЭ для отдельных высыпаний и средний отклик концентрации NO на ВВЭ за весь период работы SCIAMACHY (2002–2012 гг.).

Работа проводится в рамках Германо-Российского гранта “Н-ЕРИС” финансируемого РФФИ (проект № 20-55-12020) и немецким научным фондом по гранту № SI 1088/7 (German Research Foundation DFG, SI 1088/7-1). Направления исследований были частично определены при выполнении работ по проекту International Space Science Institute (ISSI and ISSI-BJ team “Relativistic

Electron Precipitation and its Atmospheric Effects”). Е. Розанов признателен за поддержку в рамках проекта ISSI team “Space Weather Induced Direct Ionisation Effects On The Ozone Layer”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. et al.* // J. Atm. Solar Terr. Phys. 2016. V. 149. P. 258.
2. *Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S., Krainev M.B. et al.* // JGR Space Phys. 2020. V. 125. No. 11. Art. No. e2020-JA028033.
3. *Криволицкий А.А., Репнев А.И.* Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 382 с.
4. <https://www.wcrpclimate.org/wgcmcmip/wgcmcmip6>.
5. *Matthes K., Funke B., Andersson M.E. et al.* // Geosci. Mod. Dev. 2017. V. 10. P. 2247.
6. *Mironova I.A., Artamonov A.A., Bazilevskaya G.A. et al.* // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. No. 2. P. 990.
7. *Tyssøy H.N., Haderlein A., Sandanger M.I., Stadsnes J.* // JGR. Space Phys. 2019. V. 124. P. 628.
8. *Sinnhuber M., Friederich F., Bender S., Burrows J.P.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 3603.
9. *Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M. et al.* // J. Atm. Sci. 1999. V. 56. No. 2. P. 127.
10. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* // Adv. Space Res. 2009. V. 44. No. 10. P. 1124.
11. http://sites.lebedev.ru/en/DNS_FIAN/479.html.

Atmospheric effects of energetic electron precipitation

V. S. Makhmutov^{a, b, *}, G. A. Bazilevskaya^a, I. A. Mironova^c, M. Sinnhuber^d, E. Rozanov^{c, e},
T. Sukhodolov^e, B. B. Gvozdevsky^f, N. S. Svirzhevsky^a

^aLebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bMoscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

^cDepartment of Physics of Earth, Faculty of Physics, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

^dInstitute of Meteorology and Climate Research, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

^ePMOD/WRC and IAC ETHZ, Davos, Switzerland

^fPolar Geophysical Institute, Apatity, Russia

*e-mail: makhmutovvs@lebedev.ru

We present the results of the analysis of data on precipitation of high-energy magnetospheric electrons into the atmosphere and their impact on the concentration of nitrogen oxide NO in the atmosphere at altitudes of 64–90 km. Series of data on precipitation recorded on balloons at the Apatity polar station (Murmansk oblast) in the period 2002–2012 and the results of NO measurements with the SCIAMACHY spectrometer (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartography) installed on board the European satellite ENVISAT were used. The response of variations in the concentration of nitrogen oxides to individual cases of precipitation of high-energy electrons and the average response to all events recorded in the atmosphere in 2002–2012 are considered.