Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 159–161.

УДК 523.41
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-159
ORCID: 0009-0008-7667-9036

ОЦЕНКА РОЛИ МОЛЕКУЛЫ NO В ПЕРЕОХЛАЖДЕНИИ ТЕРМОСФЕРЫ ПРИ ВЫСЫПАНИИ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Г.Н. Цуриков[1], Д.В. Бисикало[2,1], В.И. Шематович[1], М.С. Бережная[1,3]

[1] Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия, tsurikov@inasan.ru
[2] Национальный центр физики и математики, Саров, Россия
[3] Казанский федеральный университет, Казань, Россия

EVALUATION OF NITRIC OXIDE ROLE IN THE THERMOSPHERE OVERCOOLING DURING AURORAL ELECTRON PRECIPITATION

G.N. Tsurikov[1], D. V. Bisikalo[2,1], V.I. Shematovich[1], M.S. Berezhnaya[1,3]

[1] Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia, tsurikov@inasan.ru
[2] National Center for Physics and Mathematics, Sarov, Russia
[3] Kazan Federal University, Kazan, Russia

Аннотация. Интенсивные высыпания электронов с энергиями до 30 кэВ во время сильных геомагнитных бурь приводят как к значительному разогреву полярной термосферы, так и к довольно существенному последующему охлаждению (предположительно за счет интенсивного образования молекул NO и их инфракрасного излучения). В докладе представлены теоретические оценки параметров электронов, при которых возможно проявление довольно редкого эффекта переохлаждения термосферы, когда ее температура и плотность на восстановительной фазе геомагнитной бури становятся меньше, чем до бури. По результатам расчетов показано, что возникновение переохлаждения полярной термосферы возможно за счет интенсивного образования NO при высыпании электронов со следующими параметрами: средняя кинетическая энергия для максвелловского распределения, E_m > 8 кэВ, плотность потока энергии, Q_0 ε 1 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. Анализ геомагнитных бурь, начавшихся 09-11-2004 (с переохлаждением) и 15-05-2005 (без переохлаждения, но с признаками сильного охлаждения, пограничный случай) показал применимость полученных оценок. Это позволяет выработать наблюдательный критерий для выявления подобных событий.

Ключевые слова: Полярная термосфера, высыпание электронов, окись азота, переохлаждение термосферы.

Abstract. Intense electron precipitation with energies up to 30 keV during strong geomagnetic storms leads to both significant heating of the polar thermosphere and a subsequent significant cooling (presumably due to the intense formation of NO molecules and their infrared radiation). This paper presents theoretical estimates of the electron parameters that can trigger a rare thermospheric overcooling phenomenon when its temperature and density during the recovery phase of a geomagnetic storm become lower than those before the storm. Calculations show that overcooling can occur due to the intense formation of NO during the electron precipitation with the following parameters: mean kinetic energy for the Maxwellian distribution, E_m > 8 keV, and energy flux density, $Q_0 \geq 1$ erg cm^{-2} s^{-1}. An analysis of geomagnetic storms with overcooling on November 9, 2004 and without it on May 15, 2005 (but with signs of strong cooling, a borderline case) demonstrated the applicability of the estimates obtained. This allows us to develop an observational criterion for identifying such events.

Keywords: Polar thermosphere, electron precipitation, nitric oxide, thermospheric overcooling.

ВВЕДЕНИЕ

Изменение тепловой и химической структуры полярной термосферы на высотах >90 км во многом связано с высыпаниями авроральных электронов (с энергиями до 30 кэВ [Mironova et al., 2015]). Эти процессы приводят к значительному повышению температуры термосферы за счет Джоулева нагрева, а также кинетических эффектов при столкновении электронов с атмосферным газом [Singh, Gerard, 1982; Zhang et al., 2012]. Помимо нагрева высыпания электронов стимулируют интенсивное образование молекул NO в полярной термосфере [Barth et al., 2003]. Окись азота эффективно охлаждает термосферу за счет ИК излучения [Kockarts, 1980]. Этот процесс вносит главный вклад в функцию охлаждения термосферы на высотах 110-300 км [Johnstone et al., 2018]. Образование NO в больших количествах во время сильных геомагнитных бурь может впоследствии частично компенсировать разогрев полярной термосферы на восстановительной фазе бури [Maeda et al., 1989; Mlynczak et al., 2003] (естественный термостат). В редких случаях наблюдается эффект переохлаждения термосферы, когда ее температура и плотность на фазе восстановления после бури может оказаться меньше, чем до бури – предположительно за счет интенсивного образования и излучения молекулы NO (см., например, анализ экстремальных геомагнитных бурь [Lei et al., 2012; Knipp et al., 2016; Ranjan et al., 2024], а также статистическое исследование [Knipp et al., 2017].

В работе дается оценка параметров электронов, при которых возможно проявление эффекта переохлаждения термосферы за счет роста концентрации NO (см. подробности в [Бисикало и др., 2026]). Эти параметры получены на основе изучения вклада высыпающихся электронов в тепловой баланс полярной термосферы. Чтобы уточнить данные параметры, в работе [Бережная и др., 2026] проведен анализ геомагнитных бурь 09-11-2004 (с переохлаждением) и 15-05-2005 (без переохлаждения, граничный случай).

УСЛОВИЯ ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ ТЕРМОСФЕРЫ

Чтобы определить условия для возникновения переохлаждения термосферы, в [Бисикало и др., 2026] была сделана оценка вклада высыпающихся электронов в тепловой баланс полярной термосферы при вариации следующих параметров: (а) средней кинетической энергии для максвелловского распределения электронов, E_m □ 1-16 кэВ, плотности потока энергии, Q_0 □ 1-3 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. Для проведения расчетов использовалась стационарная модель теплопроводности с известными источниками нагрева и охлаждения. Ограничения модели подробно описаны в [Бисикало и др., 2026]. В качестве источников использовались результаты расчетов аэрономической модели термосферы KOMPOT [Johnstone et al., 2018], полученные в [Scherf et al., 2026] при анализе геомагнитной бури 09-11-2004 с переохлаждением. Основной недостаток модели KOMPOT заключается в том, что она не учитывает источники нагрева и охлаждения термосферы, вызванные высыпанием электронов во время геомагнитных бурь. К таким источникам относятся: (а) Джоулев нагрев; (б) нагрев за счет кинетических эффектов при столкновении электронов с атмосферным газом; (в) охлаждение за счет ИК излучения молекул NO. Мы учли данные источники с помощью разработанных ранее (а) кинетической модели для взаимодействия высыпающихся электронов с атмосферным газом [Bisikalo et al., 2022] и (б) химической модели образования NO [Шематович и др., 2024].

По результатам моделирования было установлено, что наличие высокоэнергичной фракции в распределении высыпающихся электронов может значительно снизить температуру термосферы. Если средняя кинетическая энергия высыпающихся электронов, E_m ε 8 кэВ (для максвелловского распределения электронов), а плотность потока энергии электронов при этом, $Q_0 > 1$ эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$, столкновительный и Джоулев нагревы атмосферы неэффективны по сравнению с другими источниками (скорость нагрева за счет данных источников на 2 порядка меньше скорости нагрева за счет жесткого УФ излучения). В то же время термосфера эффективно теряет энергию за счет ИК излучения NO, что может привести к ее переохлаждению на величину порядка 100 К и более.

АНАЛИЗ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ 09-11-2004 И 15-05-2005

Чтобы уточнить теоретически определенные параметры электронов, при которых возникает переохлаждение термосферы, мы провели анализ образования молекулы NO в термосфере для двух геомагнитных бурь (см. подробности в [Бережная и др., 2026]). В качестве первой бури выбрано событие, начавшееся 09-11-2004. На основе анализа плотности термосферы по данным спутников CHAMP и GRACE, в работе [Scherf et al., 2026] был сделан вывод о наличии переохлаждения термосферы во время этого события (плотность термосферы на восстановительной фазе бури оказалась меньше в 2 раза, чем до бури). Мы также рассмотрели вторую бурю, начавшуюся 15-05-2005, во время которой по данным спутника GRACE наблюдались признаки сильного охлаждения, но переохлаждения не возникло. Данная буря относится к «пограничному» случаю переохлаждения, а ее анализ позволяет уточнить нижнюю границу для возникновения рассматриваемого эффекта.

Сопоставляя модельные значения высотного профиля концентрации NO с ее измерениями в термосфере, можно определить параметры высыпающихся электронов E_m и Q_0 (см., например, [Barth et al., 2004]). В данной работе было проведено сопоставление модельного профиля NO с ее глобальными измерениями инструментом SABER спутника TIMED (см. рис. 1). Аналогично методике [Barth et al., 2004] сравнение проводилось со средним высотным профилем NO в полярных широтах для восстановительной фазы бури (реакция NO на высыпания электронов происходит на следующие сутки после начала события [Barth et al., 2003]). Стоит отметить недостаток измерений TIMED/SABER в области высот 100-120 км, где достигается максимум концентрации NO.

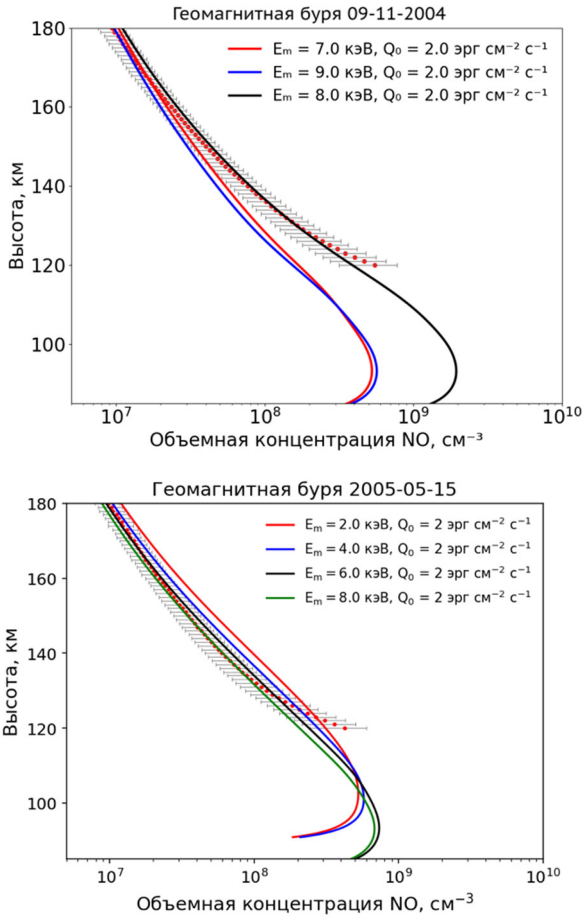

Рис. 1. Сопоставление модельных и измеренных TIMED/SABER высотных профилей концентрации NO для геомагнитных бурь 09-11-2004 (верхняя панель) и 15-05-2005 (нижняя панель) при различных параметрах E_m и фиксированном значении Q_0 (при котором достигается соответствие наблюдениям). Рисунок адаптирован из работы [Бережная и др., 2026] (Рисунки 3 и 4).

По результатам сравнения (рис. 1) было определено, что наилучшее соответствие наблюдательным данным для геомагнитной бури 09-11-2004 (с переохлаждением) достигается при E_m = 8 кэВ и Q_0 = 2 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. Для «пограничной» геомагнитной бури 15-05-2005 наилучшее соответствие данным достигается при E_m = 6 кэВ и Q_0 = 2 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. При этом распределение электронов по энергии, вероятно, имело составной характер (два распределения с E_m = 2-4 кэВ и E_m < 8 кэВ). Полученные результаты укладываются в сформированный ранее теоретический критерий для возникновения переохлаждения (E_m ε 8 кэВ, Q_0 > 1 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$).

Также отметим, что полученные параметры электронов находятся в относительно хорошем согласии с усредненными измерениями спутников DMSP, показывающими значения E_m = 7.8 кэВ и Q_0 = 1.8 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ для события 09-11-2004 и E_m = 6.2 кэВ и Q_0 = 0.9 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$ для события 2005-05-15.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных расчетов установлено, что возникновение довольно редкого явления переохлаждения полярной термосферы во время сильных геомагнитных бурь возможно при высыпании электронов с относительно высокой средней кинетической энергией максвелловского распределения Em ≥ 8 кэВ и плотностью потока энергии Q0 > 1 эрг см-2 с-1. При данных условиях электроны проникают и теряют свою энергию в более глубоких слоях термосферы (< 110 км), где их вклад в полную функцию нагрева незначителен по сравнению с другими источниками. В то же время термосфера эффективно теряет энергию за счет ИК излучения NO, что может привести к ее переохлаждению.

Полученные теоретические оценки были уточнены на основе анализа двух геомагнитных бурь: 09-11-2004, во время которой наблюдалось переохлаждение термосферы; 15-05-2005, которая сопровождалась сильным охлаждением, но переохлаждения не было зафиксировано (граничный случай). Из сравнения модельного и измеренного высотных профилей концентрации NO определены параметры высыпающихся электронов для данных событий. Для бури с переохлаждением средняя кинетическая энергия для максвелловского распределения электронов составила Em = 8 кэВ, плотность потока энергии электронов Q0 = 2 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. Для «пограничного» события - Em = 6 кэВ и Q0 = 2 эрг см$^{-2}$ с$^{-1}$. Данные параметры удовлетворяют полученному ранее теоретическому пределу для возникновения рассматриваемого эффекта. Это позволяет выработать наблюдательный критерий для выявления подобных событий, который может использоваться при составлении рекомендаций по работе низкоорбитальных ИСЗ на полярных орбитах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-12-00364-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бережная М.С., Цуриков Г. Н., Бисикало Д.В., Шематович В.И., Анализ аномального явления переохлаждения полярной термосферы во время геомагнитных бурь // Астрономический Журнал, 2026. Направлена в печать.

Бисикало Д.В., Шематович В.И., Жилкин А.Г., Цуриков Г.Н. О влиянии высыпаний электронов на тепловой баланс полярной термосферы Земли // Астрономический Журнал, 2026. В печати.

Mironova I. A., Aplin K. L., Arnold F., и др. Energetic Particle Influence on the Earth's Atmosphere // Space Science Reviews, 2015. Т. 194. С. 1–96.

Шематович В.И., Бисикало Д.В., Цуриков Г.Н., Жилкин А.Г., Нетепловые процессы образования окиси азота при высыпании авроральных электронов в верхние атмосферы планет земного типа // Астрономический Журнал, 2024. Т. 101. № 8. С. 770-794.

Barth C. A., Mankoff K. D., Bailey S. M., Solomon S. C. Global observations of nitric oxide in the thermosphere // Journal of Geophysical Research, 2003. Т. 108, С. 1027.

Barth C.A., Baker D.N., Bailey S.M. Seasonal variation of auroral electron precipitation // Geophysical Research Letters. 2004. Vol. 31. P. L04809.

Bisikalo D., Shematovich V., Hubert B. The Kinetic Monte Carlo Model of the Auroral Electron Precipitation into N_2-O_2 Planetary Atmospheres // Universe, 2022. Vol. 8, № 8. P. 437.

Johnstone C. P., Güdel M., Lammer H., Kislyakova K. G. Upper atmospheres of terrestrial planets: Carbon dioxide cooling and the Earth's thermospheric evolution // Astronomy & Astrophysics, 2018. Т. 617. С. A107.

Knipp D. J., Ramsay A. C., Beard E. D., и др. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses // Space Weather, 2016. Т. 14. С. 614–633.

Knipp D. J., Pette D. V., Kilcommons L. M., и др. Thermospheric nitric oxide response to shock-led storms // Space Weather, 2017. Т. 15. С. 325–342.

Kockarts G. Nitric oxide cooling in the terrestrial thermosphere // Geophysical Research Letters, 1980. Т. 7. С. 137–140.

Lei J., Burns A. G., Thayer J. P., и др. Overcooling in the upper thermosphere during the recovery phase of the 2003 October storms // Journal of Geophysical Research, 2012. Т. 117. С. A03314.

Maeda S., Fuller-Rowell T. J., Evans D. S. Zonally averaged dynamical and compositional response of the thermosphere to auroral activity during September 18-24, 1984 // Journal of Geophysical Research, 1989. Т. 94. С. 16869.

Mlynczak M., Martin-Torres F. J., Russell J., и др. The natural thermostat of nitric oxide emission at 5.3 μm in the thermosphere observed during the solar storms of April 2002 // Geophysical Research Letters, 2003. Т. 30. С. 2100.

Ranjan A. K., Nailwal D., Sunil Krishna M. V., Kumar A., и др. Evidence of Potential Thermospheric Overcooling During the May 2024 Geomagnetic Superstorm // Journal of Geophysical Research, 2024. Т. 129.

Scherf M., Krauss S., Tsurikov G., и др. The impact of electron precipitation on Earth's thermospheric NO production and the drag of LEO satellites // Annales Geophysicae, 2026. Т. 44. С. 209–225.

Singh V., Gerard J.-C. The thermospheric heating efficiency under electron precipitation conditions // Planetary and Space Science, 1982. Т. 30, № 11. С. 1083–1089.

Zhang B., Lotko W., Brambles O., и др. Enhancement of thermospheric mass density by soft electron precipitation // Geophysical Research Letters, 2012. Т. 39. С. L20102.