

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.036

СВЯЗЬ ПОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА УТРЕННЕГО ПОНИЖЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЯВЛЕНИЯХ ППШ С НЕОДНОРОДНЫМ ВЫСЫПАНИЕМ ПОТОКОВ ПРОТОНОВ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ

В.А. Ульев^{1*}, Д.Д. Рогов^{1,2}, А.А. Абуни², М.А. Абунина²

¹Арктический и Антарктический Научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Россия

*E-mail: vauliev@yandex.ru

Аннотация

При анализе явления поглощения типа полярной шапки 10 – 15 сентября 2017 г. обнаружен новый эффект аномального понижения поглощения в местные утренние часы (эффект УП – утреннее понижение) 13 сентября на антарктических станциях Восток и Прогресс [Ульев и др., 2019].

В данной работе проанализированы вариации интенсивности потоков протонов во время солнечного протонного события с 10 – 15 сентября и вариации поглощения на ст. Прогресс за этот же период. В эти дни определены (на основании данных спутников серии POES с полярной орбитой) значения интенсивности потоков протонов, проникающих в утренний и вечерний сектора полярной шапки отдельно. Рассчитаны коэффициенты асимметрии (утро/вечер) заполнения южной полярной шапки потоками протонов. Установлено, что 13 сентября (период наблюдения эффекта УП) коэффициент асимметрии меньше 1. Предложено физическое обоснование связи появления УП с регистрацией пониженной интенсивности ПП в утреннем секторе ПШЦ по сравнению с вечерним.

Введение

В работе [Ульев и др., 2019] описан новый эффект в явлениях ППШ: в некоторых ППШ (особенно происшедших в равноденственные сезоны года [Ульев и др., 2020]) на станциях в центральной области полярной шапки в утренние часы вплоть до местного полудня наблюдается пониженное поглощение, которое названо эффектом утреннего понижения поглощения или утренним понижением (УП). Один из основных морфологических признаков УП заключается в том, что вариация понижения поглощения во время УП не коррелирует с тенденцией изменением интенсивности ПП с энергией $E_p > 10$ МэВ, измеренных вне магнитосферы во время УП.

В статье рассмотрены данные регистрации ПП в период СПС (ППШ) 10 – 15 сентября 2017 г. на спутнике (POES-15) с полярной орбитой над утренним и вечерним секторами центральной области полярной шапки (ПШЦ). Рассчитаны коэффициенты асимметрии заполнения ПШЦ потоками протонов утреннего (Jмут) и вечернего (Jмвч) секторов Кув ($K_{ув} = J_{мут} / J_{мвч}$).

Анализ вариаций интенсивности ПП и поглощения во время СПС и ППШ 10 - 15 сентября 2017 г.

На рисунке 1а представлены вариации интенсивности ПП (Jпп) (в диапазоне энергий $E_p > 5, > 10, > 30, > 50, > 100$ МэВ) в период СПС 10-15 сентября 2017 г. [<http://satdat.ngtc.gov/sem/goes>]. Согласно [Richardson and Cane, 1996; Jiggins et al., 2019] СПС с подобными характеристиками обусловлены солнечными вспышками с выбросом корональной массы (ВКМ). Период прохождения ВКМ мимо Земли отмечен символом \leftrightarrow .

На рисунке 1б представлены экспериментальные вариации поглощения ППШ (Аэ) 10 – 15 сентября 2017 г. с эффектом УП (13 сентября) на антарктической станции Прогресс ($\Lambda' = 76.23^\circ$, $\Phi' = -74.43^\circ$). Вариации поглощения ППШ имеют суточную периодичность (повышенные / пониженные значения в местные дневные/ночные часы) как результат смены освещенности ионосферы. Штриховой черной линией показаны расчетные значения поглощения, вычисленные на основе эмпирического соотношения [Sauer and Wilkinson, 2008]. Видно, что 13 сентября в утренние часы экспериментальные значения поглощения меньше, чем расчетные ($A_{э} < A_p$). (1) Это первый из признаков идентификации УП. (2) Второй – проявление предполагаемого УП на средней фазе СПС (так называемая фаза «Reservoir») с приходом ВКМ. (3) Третий –

проявление предполагаемого УП на фазе очень медленного спада (или даже плоского характера изменения ПП) во время СПС. Период проявления эффекта УП показан значком [▲].

Отметим, что 12 сентября, как и 13 сентября ($A\alpha < A\beta$), однако 13 числа идентификация предполагаемого УП не удовлетворяет второму признаку (отсутствует приход ВКМ). 14 сентября есть небольшое понижение $A\alpha$ по сравнению с $A\beta$, однако различие очень незначительное.

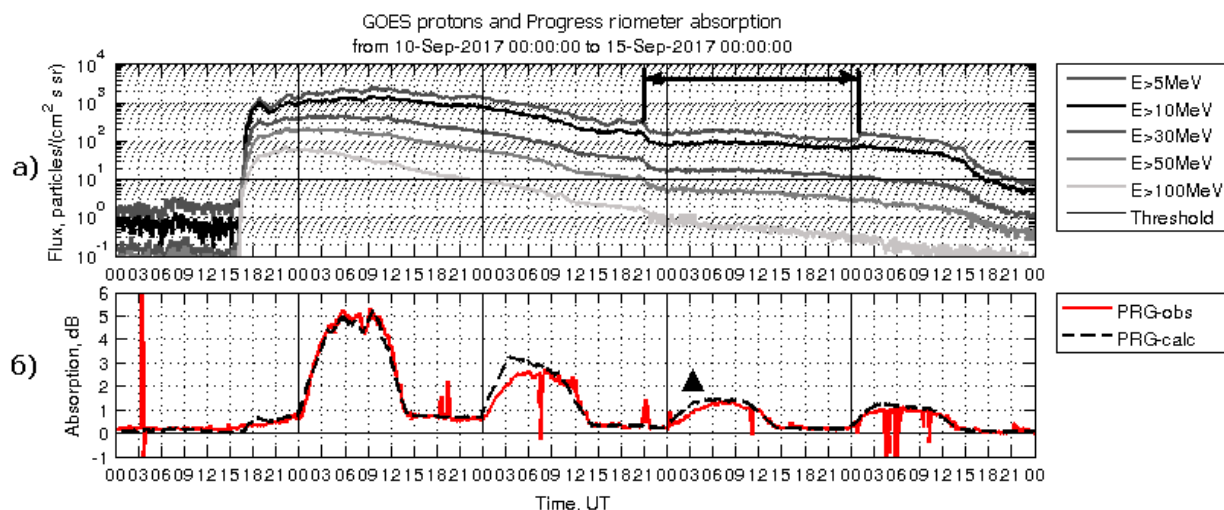


Рисунок 1. Поток протонов по данным спутника GOES (а) и поглощение на станции Прогресс (б) с 10 по 15 сентября 2017 г.

Анализ распределения интенсивности ПП в центральной области полярной шапки

При выполнении данной работы была выдвинута гипотеза о связи пониженного поглощения в период УП (в период местных утренних часов) на станциях в центральной области ПШЦ ($\Phi' \geq 60^\circ$) с пониженной интенсивностью ПП в утреннем секторе центральной области полярной шапки.

Для подтверждения этого предположения были построены проекции траекторий пролетов 5 полярных спутников серии POES над южной ПШЦ, регистрирующих потоки протонов с энергией $E_p > 6.9$ МэВ во время СПС 11 – 15 сентября 2017 г. Границы полярной шапки определены по [Dmitriev et al., 2010] для энергии протонов $E_p = 6.9$ МэВ.

Определены мгновенные значения интенсивности ПП (J_{pp}) с энергией $E_p > 6.9$ МэВ, зарегистрированные над траекториями пролетов спутников. На основе этих J_{pp} рассчитаны медианные значения интенсивности ПП отдельно по данным J_{pp} над утренней и вечерней частями траектории пролета спутника POES (соответственно J_{mut} и J_{mvch}). Определено соотношение J_{mut} и J_{mvch} и получен коэффициент асимметрии заполнения потоками протонов ПШЦ ($K_{ув} = J_{mut} / J_{mvch}$). Значения $K_{ув}$ рассчитаны для каждого пролета спутником POES-15 зоны южной полярной шапки Земли в течение СПС (по 14 значений за каждые сутки). На рисунке 2а представлена вариация СПС 10 – 15 сентября по данным GOES в нескольких диапазонах энергий. Красными линиями указаны моменты пролетов спутника POES-15, показанные на рисунках 2б и 2в.

На рисунке 2б и 2в приведены мгновенные значения J_{pp} по данным 2-х пролетов полярного спутника POES-15. На каждом рисунке две зеленые линии - границы нахождения траектории движения спутника внутри ПШЦ (границы рассчитаны по [Dmitriev et al., 2010]). Оранжевая линия делит ПШЦ на 2 сектора: утренний, левый (от зеленой до оранжевой линии) и вечерний, правый (от оранжевой до зеленой линии). Цифры около зеленых линий являются медианными значениями J_{pp} для каждого сектора отдельно. В левом верхнем углу указаны временные интервалы пролета спутника над ПШЦ.

На рисунке 2г приведены значения $K_{ув}$ за период 10 – 15 сентября. Видно следующее:

а) 11 сентября значения $K_{ув} \approx 1$, т.е. $J_{mut} \approx J_{mvch}$. Это указывает на однородное заполнение утреннего и вечернего секторов ПШЦ потоками протонов.

б) 13 сентября значения $K_{ув} < 1$, т.е. $J_{mut} < J_{mvch}$ (за исключением периодов около 10 UT и 18 – 23 UT). Это указывает на неоднородное заполнение утреннего и вечернего секторов ПШЦ потоками протонов.

Физическое обоснование связи между появлением УП и появлением ПП с пониженной интенсивностью в утреннем секторе ПШЦ

Пониженная интенсивность ПП в утреннем секторе ПШЦ в период эффекта УП может быть объяснена следующим образом. Во время мощных солнечных вспышек происходит выброс корональной массы (ВКМ)

в межпланетное пространство вместе с магнитными полями, которые образуют магнитное облако (МО). Магнитное облако состоит из замкнутых и так называемых «открытых» магнитных трубок (МТз и МТо), образующих центральную и внешнюю части. В МТз оба конца находятся в атмосфере Солнца и, таким образом, формируется магнитная трубка типа магнитной петли (МП). В МТо только один конец как правило «восточный» находится в атмосфере Солнца, а другой – в межпланетном пространстве [Pick and Vilmer, 2008; Malandraki et al., 2001, 2002].

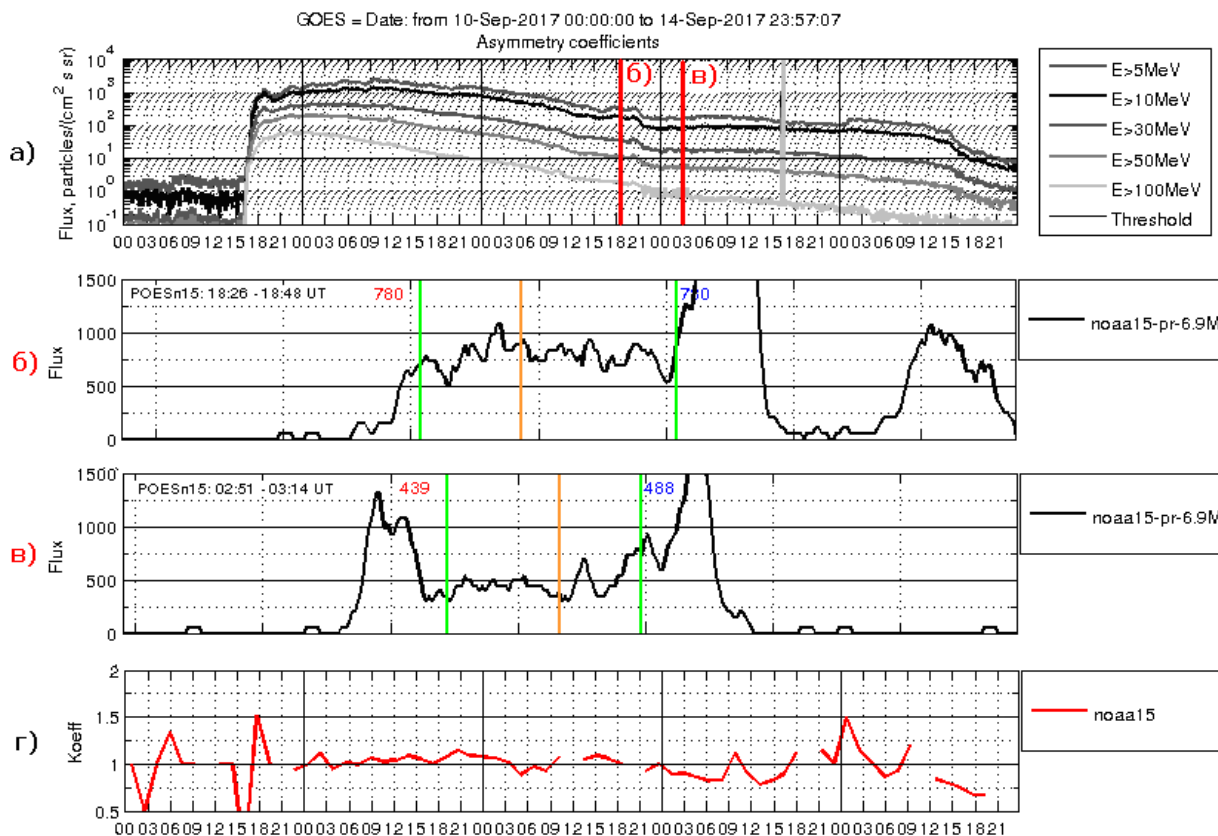


Рисунок 2. Потоки протонов по данным спутника GOES (а), вариации потоков протонов по данным спутника POES-15 около 18:40 UT 12 сентября 2017 г. (б) и около 3 UT 13 сентября 2017 г. (в), коэффициент асимметрии (утро/вечер) заполнения южной полярной шапки потоками протонов по данным спутника POES-15 (г).

Во время вспышки так же генерируются потоки протонов (ПП) в основном с энергией $E_p = 1 - 100$ MeV [Pick and Vilmer, 2008]. Часть ПП оказывается захваченной в МТз (в МП) внутри ВКМ, распространяется конвективно вместе с МТз и примерно через 24 – 48 час достигает орбиты Земли (в зависимости от гелиодолготы вспышки). В МТз (в МП) возникают два потока протонов, направленных навстречу друг другу: западный и восточный (ППзп и ППвс), если МТз (МП) расположена в плоскости эклиптики. При этом в зависимости от определенных условий в солнечной короне и в межпланетном пространстве: ППзп < ППвс или ППзп > ППвс. При этом в большинстве случаев (ППзп < ППвс) [Richardson, 1994; Richardson and Cane, 1996], особенно в МТо.

Когда МТз достигают орбиты Земли, происходит пересоединение магнитных силовых линий МТз с магнитными силовыми линиями хвоста магнитосферы (ХМ). В этом случае ПП неадиабатически (через магнитопаузу) проникают в ХМ. Если МТз находятся в плоскости эклиптики, то ППзп (ППвс) проникает в западную (восточную) сторону ХМ и высыпается в атмосферу в утреннем (вечернем) секторе ПШц [Hynds et al., 1974].

ПП ($E_p = 1 - 100$ MeV) на высотах нижней ионосферы (20 – 90 км) дополнительно ионизируют атмосферу и вызывают возрастание поглощения (А – absorption) коротких радиоволн галактического происхождения, которое регистрируется наземными высокочувствительными коротковолновыми приемниками - риометрами [Дриацкий, 1974]. Если ППзп < ППвс, то в утреннем секторе ПШц поглощение будет меньше, чем в вечернем ($A_{ут} < A_{вч}$), что и проявляется на записи риометра как утреннее пониженное поглощение, т.е. эффект УП.

ПП заполняют МТ (захватываются) и при этом формируется анизотропный ПП, состоящий из 2-х потоков протонов: западного и восточного (соответственно ППЗп и ППВс).

В равноденственные сезоны года Земля находится примерно на $\pm 7^\circ$ выше/ниже плоскости солнечного экватора. Когда в сентябре МО достигает орбиты Земли хвост магнитосферы попадает во внешнюю область МО, с МТО [Malandraki et al., 2002] в которых ППЗп \ll ППВс. Поэтому при пересоединении МТО с хвостом магнитосферы в утренний (вечерний) сектор ПШц проникают ППЗп (ППВс) соответственно малой (большой) интенсивности, которые вызывают соответственно малое утреннее / большое вечернее поглощение ППШУ < ППШВ. В результате регистрируется эффект УП.

Заключение

Исследована связь между появлением эффекта УП во время ППШ 10 – 15 сентября 2017 г. по данным риометрических наблюдений на антарктической станции Прогресс и распределением интенсивности потоков протонов в центральной области полярной шапки по данным наблюдений на полярных спутниках POES. Для этого рассчитаны значения коэффициента асимметрии заполнения потоками протонов утреннего и вечернего секторов центральной области ПШц. Сопоставление наличия УП и значений K_{uv} позволяет сделать следующие выводы: (1) в течение 13 сентября (наличие УП) значения $K_{uv} < 1$; (2) в течение 11 сентября (отсутствие УП) значения $K_{uv} \approx 1$; (3) связь между появлением УП и пониженными значениями $K_{uv} < 1$ обусловлена пониженными значениями ПП, проникающих в утренний сектор ПШц.

Предложена возможная физическая модель причинно-следственных факторов, обуславливающих связь между появлением УП и пониженными значениями K_{uv} .

Благодарности. Работа Ульева В.А. выполнена в рамках научно-исследовательских работ НИУ Росгидромета по теме 6.1 «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации и Арктики». Работа Рогова Д.Д., Абунина А.А. и Абуниной М.А. выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 20-72-10023.

Литература

- Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., Tsai L.-C. (2010). Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006, *J. Geophys. Res.*, 115, A12244, doi:10.1029/2010JA015380
- Jiggins P. et al. (2019). In Situ Data and Effect Correlation During September 2017 Solar Particle Event. *Space Weather*, 17(1): 99-117.
- Hynds R.J., Morfill G., Rampling R. (1974). A two-satellite study of low-energy protons over the polar cap during the event of November 18, 1968, *J. Geophys. Res.*, 79(10): 1332-1344.
- Malandraki O.E., Sarris E.T., Lanzerotti L.J., Trochoutsos P., Tsiropoula G., Pick M. (2002). Solar energetic particles inside a coronal mass ejection event observed with the ACE spacecraft, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64(5-6): 517-525, doi:10.1016/S1364-6826(02)00008-1
- Malandraki O.E., Sarris E.T., Lanzerotti L.J., MacLennan C.G., Pick M., Tsiropoula G. (2001). Tracing the magnetic topology of coronal mass ejection events by Ulysses/HI-SCALE energetic particle observations in and out of the ecliptic, *Space Sci. Rev.*, 97(1): 263-268, doi:10.1023/A:1011820832228
- Pick M., Vilmer N. (2008). Sixty-five years of solar radio astronomy: flares, coronal mass ejections and Sun-Earth connection, *Astronomy and Astrophysics Review*, 16(1): 1-153.
- Richardson I.G. (1994). A survey of bidirectional > 1 MeV ion flows during the HELIOS 1 and HELIOS 2 missions: observations from the Goddard Space Flight Center instruments, *Astrophys. J.*, 420: 926-942.
- Richardson I.G., Cane H.V. (1996). Particle flows observed in ejecta during solar event onsets and their implication for the magnetic field topology, *J. Geophys. Res.*, 101(A12): 27521 –27532.
- Sauer H.H., Wilkinson D.C. (2008). Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons, *Space Weather*, № 6, S12002.
- Дриацкий В.М. (1974). Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт, Гидрометеиздат, г. Ленинград.
- Ульев В.А., Рогов Д.Д., Франк-Каменецкий А.В. (2019). Эффект утренне-дневной аномалии (УДА) во время поглощения типа полярной шапки (ППШ) в сентябре 2017 г., “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLII Annual Seminar, Apatity, pp. 194-197, doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.194-197
- Ульев В.А., Рогов Д.Д., Франк-Каменецкий А.В. (2020). Сезонная зависимость появления эффекта утреннего понижения поглощения ППШ, “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLIII Annual Seminar, Apatity, pp. 135-137, doi: 10.37614/2588-0039.2020.43.033