

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.194-197

ЭФФЕКТ УТРЕННЕ-ДНЕВНОЙ АНОМАЛИИ (УДА) ВО ВРЕМЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ТИПА ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ (ППШ) В СЕНТЯБРЕ 2017 г.

В.А. Ульев, Д.Д. Рогов, А.В. Франк-Каменецкий

Арктический и Антарктический Научно-исследовательский институт (ААНИИ),
отдел геофизики, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mails: vauliev@yandex.ru, rogovdenis@mail.ru, al_frank@aari.ru

Аннотация. 10 - 14 сентября 2017 г. зарегистрировано явление поглощения типа полярной шапки (ППШ) на двух станциях в центре южной полярной шапки (ПШ) Восток и Прогресс. В каждый из дней ППШ в часы, близкие к местному полдню, поглощение возрастает до больших значений, а к местной полуночи – уменьшается до малых значений. Это связано с изменением освещенности ионосферы над этими пунктами. 11, 12 и 14 числа возрастание поглощения в утренние часы происходит, как обычно, сравнительно быстро. Однако 13 сентября возрастание происходит аномально медленно. Этот эффект назван утренне-дневной аномалией (УДА). Предполагается, что эффект УДА обусловлен неоднородным распределением поглощения ППШ в центре полярной шапки при асимметричном заполнении восточной и западной стороны хвоста магнитосферы анизотропными потоками солнечных протонов (ПП) из межпланетного пространства. Возможно определенную роль в появлении этой аномалии играет возникновение в утренние часы суперпозиции атмосферных волн: прежде всего приливных, а также гравитационных.

1. Введение

В сентябре 2017 г. произошло 3 явления ППШ. На рис. 1 представлены вариации следующих параметров в период третьего ППШ 10 – 15 сентября: поток протонов (ПП) в диапазоне энергий $E_p > 10$ МэВ во время солнечного протонного события (СПС) которое вызвало явление ППШ, уровень геомагнитной активности (индекс K_p), вариации поглощения ППШ на 2-х станциях в центре южной полярной шапки: Восток ($\Phi' = -83.3^\circ$) и Прогресс ($\Phi' = -74.4^\circ$). Каждый день на обеих станциях наблюдается суточная вариация поглощения: в местные дневные часы поглощение возрастает, а в местные ночные – понижается, что обусловлено соответственно наличием или отсутствием освещенности ионосферы в эти часы над пунктом наблюдения. Проведены линии, аппроксимирующие дневные значения поглощения. В целом ход поглощения соответствует изменению ПП. Видно, что 11, 12 и 14 сентября в утренние часы поглощение быстро возрастает до дневных значений как это обычно наблюдается в равноденственных явлениях ППШ. Однако 13 сентября в утренние и дневные часы поглощение возрастает аномально медленно от низких значений в местные утренние часы до более высоких значений при окончании местного дневного периода (обычный ход поглощения в эти утренние и дневные часы аппроксимирован точками). Эта медленное возрастание поглощения названо утренне-дневной аномалией (УДА). Для объяснения УДА исследован характер высывания ПП в центре полярной шапки (ПШ) и формирование анизотропных ПП в межпланетном пространстве.

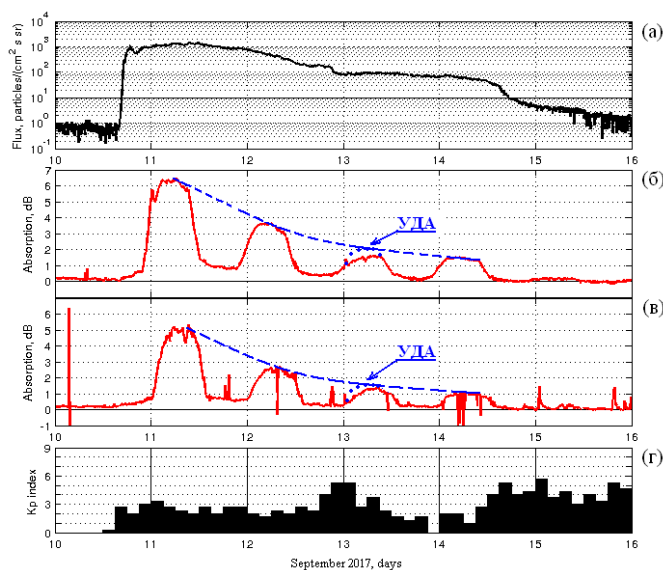


Рисунок 1. Вариации ПП ($E_p > 10$ МэВ) (а), вариации поглощения ППШ на ст. Восток (б), ст. Прогресс (в) и уровня геомагнитной активности (индекс K_p) (г) в течение 10 – 16 сентября 2017 г. УДА – период проявления эффекта утренне-дневной аномалии.

2. Анализ

2.1. Характер высыпания ПП в центре полярной шапки

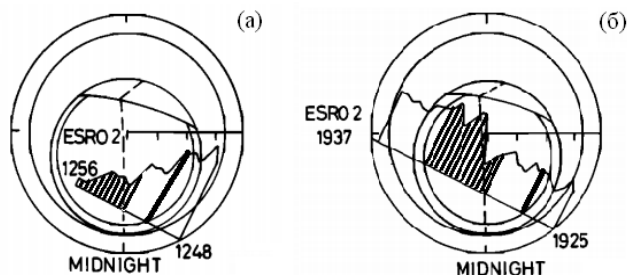


Рисунок 2. Неоднородное распределение ПП над северной полярной шапкой (ППШ) во время СПС 18 января 1978 г. при анизотропии типа ППз>ППв (а) и ППз< ППв (б). Штриховка – интенсивность ППв в вечернем (восточном) секторе ППШ. Отсутствие штриховки – интенсивность ППз в дневном (западном) секторе ППШ.

На рис. 2а и 2б представлены проекции траекторий полярного спутника на высокие широты северной полярной шапки 18 ноября 1968 г. [Hynds et al, 1974]. Длина линий, перпендикулярных траекториям пролёта спутников, пропорциональна интенсивности ПП над соответствующими участками траектории в диапазонах энергий ПП менее 30 МэВ. Период, когда спутник пролетал над вечерним сектором ППШ обозначен штрихами, а над утренним – без штрихов. Видно, что на рис. 2а интенсивность ПП над утренним сектором ППШ выше, чем над вечерним, а на рис. 2б – наоборот. Согласно расчётным данным [Hynds et al, 1974] в первом случае в межпланетном пространстве наблюдалась анизотропия ПП с преобладанием ПП с западного направления (ППз), тогда как во втором – с восточного (ППв). Такая неоднородность высыпания ПП в центре ППШ может обусловить неодинаковое поглощение ППШ в утреннем и вечернем секторах ППШ. Если ППв > ППз, то поглощение в вечернем секторе (ППШвеч) превышает поглощение в утреннем (ППШутр) секторе, т.е. ППШутр < ППШвеч, что может проявиться как эффект УДА. Таким образом можно предположить, что основную роль в появления УДА играет наличие анизотропного ПП в межпланетном пространстве.

2.2. Формирование анизотропных ПП в межпланетном пространстве

На рис. 3 [Pick and Vilmer, 2008] представлена карта структуры межпланетного магнитного поля (ММП) в проекции на плоскость эклиптики после мощных солнечных вспышек. Наряду с областью обычных силовых линий типа архимедовой спирали (обозначено 1) существует область силовых линий с петлеобразной структурой (обозначено 2). Эта структура формируется вследствие выброса в межпланетное пространство потоков корональной плазмы (Coronal Mass Ejection – CME или Выбросы Корональной Массы - ВКМ). Вместе с плазмой всплывает вмороженное магнитное поле, которое образует крупномасштабную магнитную трубку.

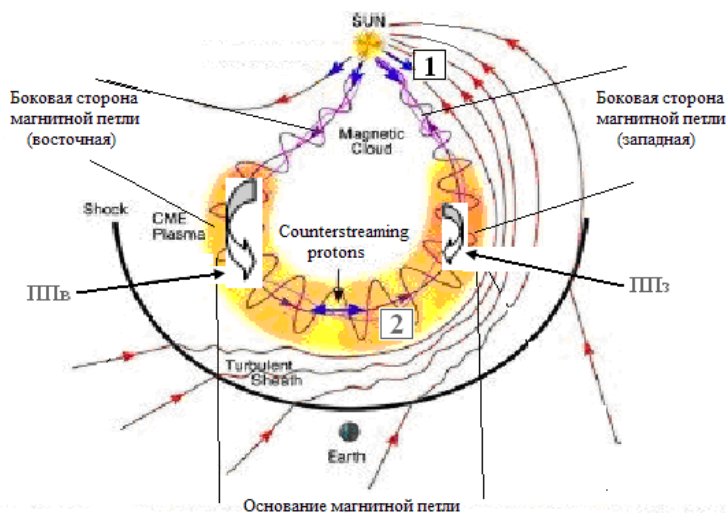


Рисунок 3. Структура ММП после сильной солнечной вспышки. 1 – невозмущённое магнитное поле; 2 – возмущённое магнитное поле (магнитная петля). Потоки протонов в восточной (ППв) и западной (ППз) сторонах магнитной петли.

Концы этой трубки остаются на Солнце. Поэтому в межпланетном пространстве формируется структура, которая называется магнитной петлей, которая в первом приближении состоит из 3-х частей: 2-х боковых (восточной и западной) вертикальных магнитных трубок (боковые стороны петли) и 1-ой горизонтальной

магнитной трубки (основание петли). По мере движения плазмы и расширения плазменного облака магнитная петля удлинится, расширится и переносится на орбиту Земли.

В начальный период после сильной вспышки в области 1 формируются однонаправленные анизотропные ПП, распространяющиеся от Солнца (анизотропная противосолнечная диффузия), а в области 2 - двунаправленные ПП. Эти ПП области 2 захвачены в магнитную петлю и движутся вместе с ней от Солнца со скоростью движения ВКМ. В плоскости эклиптики в основании магнитной петли находятся ПП, которые движутся «с востока на запад» (ППв) и «с запада на восток» (ППз). При этом ППв и ППз могут быть неодинаковыми вследствие различной структуры боковых сторон петли и различия условий генерации этих ПП в начальной части (в короне Солнца) боковых трубок. Поэтому в области 2 в основании магнитной петли ПП может быть двунаправленным анизотропным типа ППз = ППв, или ППв > ППз, или ППв < ППз.

2.3. Экспериментальные данные регистрации анизотропных ПП

Наличие анизотропных ПП в ММП (вблизи орбиты Земли) в период, когда спутник находится внутри ВКМ, зафиксировано экспериментально [Richardson, 1994]. На рис. 4б показан временной ход интенсивности ПП в диапазонах энергий $E_p = 1.1 - 2.1$ МэВ и $3.1 - 21$ МэВ во время СПС 2 - 7 января 1978 г. Штриховыми вертикальными линиями ограничен период, когда спутник находился внутри ВКМ в основании магнитной петли. В верхней части рис. 4а представлено 5 азимутальных секторных диаграмм распределения интенсивности ПП (с энергией $E_p = 3.1 - 21$ МэВ) в плоскости эклиптики в различных направлениях относительно оси Солнце - Земля (Солнце - в верхней части диаграмм). Секторные потоки измерены на спутнике Helios вблизи магнитосферы Земли [Richardson, 1994] для нескольких моментов времени. В верхний и нижний секторы попадают ПП движущиеся соответственно «от» Солнца и «к» Солнцу, а в левый и правый - соответственно «с востока» и «с запада». Чем более вытянут сектор в одном направлении по сравнению с другими, тем более интенсивный и анизотропный ПП приходит из этого направления.

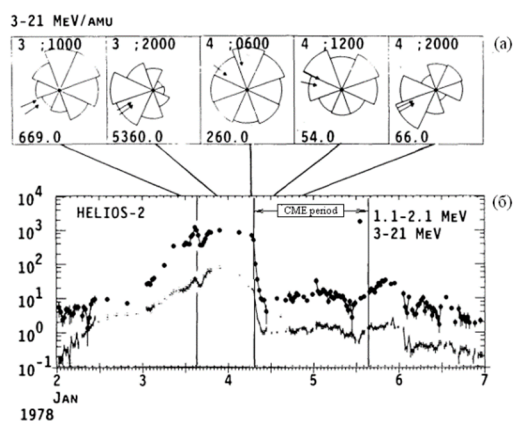


Рисунок 4. Вариации секторной анизотропии (а) и ПП во время СПС 2-7 января 1978 г. (б).

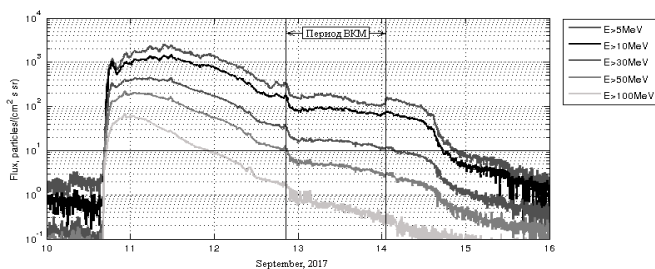


Рисунок 5. Вариации ПП во время СПС 10 - 14 сентября 2017 г.

Данные секторных диаграмм (№ 4 и 5), полученные для моментов времени 12 и 20 час. УТ 5 января 1978 г. показывают, что при нахождении спутника внутри ВКМ секторы, обращённые к востоку имеют наибольшую длину. Следовательно ПП «с востока» имеет более высокие значения, чем с других направлений, т.е. существует анизотропный ПП типа ППв > ППз. Согласно статистическим данным [Richardson and Cane, 1996], в те периоды, когда Земля оказывалась внутри ВКМ, примерно в 70% случаев наблюдались ПП с двунаправленной анизотропией с преобладающим направлением прихода ПП «с востока».

2.4. Характер вариации ПП в период ВКМ

В настоящее время нет прямых измерений анизотропии ПП во время СПС 10 - 15 сентября 2017 г. Однако существуют косвенные признаки, показывающие, что 13 сентября Земля находилась внутри ВКМ в магнитной петле, где возникают анизотропные ПП. Основным признаком является особенный характер вариации ПП в период ВКМ. На рассмотренном выше рис. 4б показана вариация ПП в 2-х диапазонах энергий во время СПС 2 - 7 января 1978 г. Отмечен период (прерывистой линией) нахождения спутника внутри ВКМ 5 января. Видно, что в этот период (1) резко уменьшается ПП особенно малых энергий и (2) этот уменьшенный ПП примерно одинаков в течение одних суток. Такой же ступенчатый характер изменения ПП зарегистрирован в течение 13 сентября в период СПС 11 - 15 сентября 2017 г. (рис. 5) [Jiggins et al., 2019;

<http://satdat.ngtc.gov/sem/goes>]. Это даёт возможность предположить, что 13 сентября 2017 г. ПП был анизотропен типа ППв > ППз, так же как ПП 5 января 1978 г.

При анизотропии типа ППв > ППз интенсивные ППв (слабо интенсивные ППз) заполняют восточную (западную) сторону магнитосферного хвоста, высыпаются в восточном (западном) секторе ПШ и вызывают большое (малое) поглощение в этом секторе. При суточном вращении Земли пункт наблюдения сначала попадает в западный, т.е. в утренний сектор ПШ, где поглощение - малое, а после полудня в восточный, т.е. в вечерний сектор ПШ, где поглощение - большое. Поэтому эффект УДА представляет собой суточную вариацию поглощения с минимумом в утренние часы, возникающую при проникновении анизотропных ПП в хвост магнитосферы.

3. Заключение

Представленные данные позволяют построить следующую полную цепочку факторов, определяющих появление эффекта УДА.

- (1) Возникновение вспышки высокой интенсивности и образование ВКМ с магнитной петлёй в плоскости эклиптики.
- (2) Формирование разных по интенсивности и направленности ПП в боковых трубках магнитной петли.
- (3) Образование асимметричного анизотропного ПП в основании магнитной петли с преобладанием ПП восточного направления (ППв) по сравнению с ПП западного направления (ППз), т.е. анизотропия типа ППв > ППз.
- (4) Перенос этого анизотропного ПП на орбиту Земли в область магнитосферного хвоста.
- (5) Проникновение ППв в основном в восточную сторону магнитосферного хвоста, а ППз в основном – в западную.
- (6) Высыпание ППв в вечернем секторе полярных широт, а ППз – в утреннем. (7) При анизотропии типа ППз < ППв поглощение в утреннем секторе ПШ имеет меньшие значения, чем в вечернем, что и проявляется как эффект УДА.

4. Выводы

- (1) Впервые обнаружено аномально пониженное поглощение в утренние и дневные часы в один из дней ППШ, названное эффектом утренне-дневной аномалии (УДА).
- (2) Предложено физическое объяснение этого эффекта как результата неоднородного высыпания в центральной части ПШ анизотропного ПП, который формируется в ММП после мощных солнечных вспышек. При этом в утреннем секторе ПШ высыпается ПП пониженной интенсивности по сравнению с ПП в вечернем секторе ПШ. Такая асимметрия интенсивности ПП вызывает аномально пониженные значения поглощения ППШ в утренние и дневные местные часы, по сравнению с вечерними, что и проявляется как эффект УДА.
- (3) ВКМ с магнитной петлёй с анизотропным ПП проходит мимо Земли (магнитосферы Земли) только 13 сентября, поэтому УДА не проявляется 11, 12 и 14 сентября.

Литература

- 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., G. Morfill, R. Rampling (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.
- Pick M., N.Vilmer (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., H.V. Cane (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.
- <http://satdat.ngtc.gov/sem/goes>