

## СВЯЗЬ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ППШ С ТЕМПЕРАТУРОЙ И СОДЕРЖАНИЕМ ВОДЯНОГО ПАРА В ВЕРХНЕЙ МЕЗОСФЕРЕ

В.А. Ульев<sup>1</sup>, О.А. Данилова<sup>2</sup>, В. Николаева<sup>1</sup>, О.И. Шумилов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Арктический и Антарктический Нучно-исследовательский институт (АНИИ, СПб),  
vauliev@yandex.ru

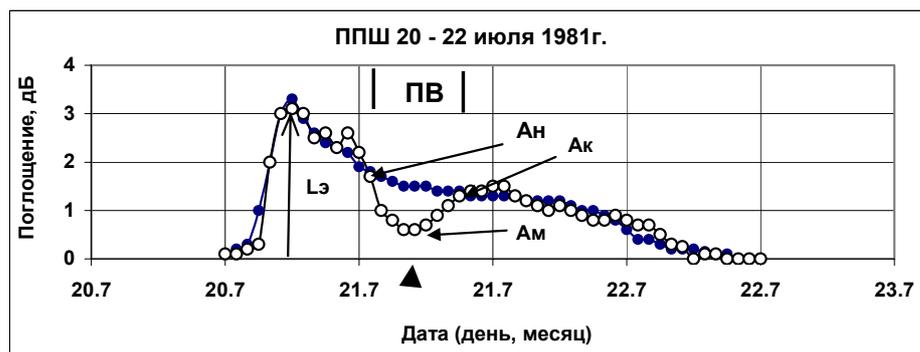
<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал Института Земного Магнетизма, Ионосферы и Распространения радиоволн (СПбО ИЗМИРАН), marta@mt4697.spb.edu

<sup>3</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного Центра РАН,  
oleg@aprec.ru

**Аннотация.** В работе анализируется долговременный тренд двух параметров ППШ: амплитуды ППШ (по данным станций внутри полярной шапки) и амплитуды эффекта полуденного восстановления (по данным станций в авроральной зоне). Установлено, что в течение рассматриваемого периода (с 70-х по 90-е годы) происходило уменьшение относительной амплитуды ППШ и амплитуды полуденного восстановления. Данные по ППШ сопоставлены с изменением спектра потоков солнечных протонов, уровня геомагнитной активности, температуры и содержания водяного пара в мезосфере за указанный период. На основе физического анализа сделан вывод о том, что основной причиной отрицательного тренда данных параметров ППШ является повышение содержания водяного пара, а так же понижение температуры верхней мезосферы.

### Введение

После мощных солнечных вспышек в межпланетное пространство выбрасываются потоки солнечных ускоренных частиц в основном протонов с энергией  $E_p = 1 - 100$  МэВ. Период регистрации потоков солнечных протонов называется солнечным протонным событием (СПС). Протоны проникают в магнитосферу на высокие геомагнитные широты ( $\Phi > 60^\circ$ ) и ионизуют атмосферу на высотах 50 – 90 км (мезосфера или нижний ионосферный слой D). В результате на этих высотах возрастает электронная концентрация и в течение нескольких суток риометры на станциях внутри полярной шапки ( $\Phi > 70^\circ$ ) и в авроральной зоне ( $\Phi = 60^\circ - 70^\circ$ ) регистрируют повышенное поглощение, которое называется «Поглощением типа Полярной Шапки» или явлением ППШ [Дриацкий, 1974]. На рис. 1 представлены вариации поглощения ППШ (20 – 22 июля 1981г.) на станциях остров Хейса ( $\varphi = 80.6^\circ$  С,  $\lambda = 58^\circ$  В и  $\Phi = 74.7^\circ$  С) и Диксон ( $\varphi = 73.5^\circ$  С,  $\lambda = 80.6^\circ$  В и  $\Phi = 67.8^\circ$  С). На обеих станциях 21 июля около 17 UT наблюдается максимум поглощения за период ППШ, который называется амплитудой ППШ ( $L_3$ ).



**Рис. 1** Вариации ППШ 10 – 22 июля 1981г. на ст. о. Хейса (●) и ст. Диксон с ПВ (○); ▲, |ПВ| момент местного полудня и период ПВ на ст. Диксон; Л<sub>3</sub>; Ан, Ам и Ак – поглощение в максимуме ППШ и моменты нач., мин. и окончания ПВ.

На ст. Диксон (в авроральной зоне) 21 июля в местные полуденные часы (между 01 - 07 UT) происходит понижение поглощения, которое называется эффектом полуденного восстановления (ПВ).

Эффект ПВ обусловлен наличием на авроральных широтах суточной вариации жёсткости геомагнитного обрезания спектра потоков солнечных протонов, вызывающих ППШ [Дриацкий, 1974]. На ст. о. Хейса (внутри полярной шапки) эффект ПВ отсутствует.

В последние годы появилось много работ, в которых установлено наличие значимых долговременных трендов по наблюдениям плотности нейтральной атмосферы, температуры, газового состава и ионосферных параметров за период 60 – 90-е годы [Lastovicka et al., 2004; Danilov et al., 1999]. Предполагается, что причиной этих трендов является повышение в атмосфере концентрации парниковых газов (CO<sub>2</sub>; CH<sub>4</sub>; H<sub>2</sub>O и др.) в связи с промышленной деятельностью человека [Lastovicka et al., 2004]. Опубликованы данные о наличии долговременных трендов параметров нижнего ионосферного слоя D в спокойных условиях (при отсутствии ППШ) [Данилов и др., 1999]. В данной работе анализируются долговременные тренды параметров ППШ (амплитуды ППШ и амплитуды ПВ).

### Экспериментальные данные

Для анализа были просмотрены вариации поглощения во время явлений ППШ, зарегистрированные за период 1966 – 1998 гг. на российских станциях Северного и Южного полушария (за исключением явлений ППШ, которые произошли в минимуме солнечной активности). Для каждого явления ППШ определялась амплитуда ( $L_3$ ) по данным одной из станций Северного или Южного полушария, расположенных внутри полярной шапки на геомагнитных широтах выше 70°: о. Хейса, Баренцбург ( $\varphi = 78.1^\circ \text{С}$ ,  $\lambda = 14.23^\circ \text{В}$  и  $\Phi = 74.8^\circ \text{С}$ ), Мирный ( $\varphi = 66.6^\circ \text{Ю}$ ,  $\lambda = 93.0^\circ \text{В}$  и  $\Phi = -77.23^\circ \text{Ю}$ ) и Восток ( $\varphi = 78.4^\circ \text{Ю}$ ,  $\lambda = 106.9^\circ \text{В}$  и  $\Phi = -83.26^\circ \text{Ю}$ ). Выбирались данные той станции, на которой максимум ППШ наблюдался наиболее достоверно и происходил в дневное время при полностью освещённой ионосфере (в равноденственные и местные летние сезоны года). Большинство значений  $L_3$  составили данные ст. о. Хейса или Восток. Для каждого ППШ вычислялась относительная амплитуда ( $L_n$ ):

$$L_n = L_3 / L_p \quad (1) \quad L_p = 0.1 * (\sqrt{J(> 10 \text{ МэВ})}) \quad (2)$$

где  $L_3$ ,  $L_p$  - соответственно экспериментальная и расчётная амплитуда ППШ;  $J(>10 \text{ МэВ})$ -экспериментальная величина интенсивности потока солнечных протонов с энергией  $E_p > 10 \text{ МэВ}$  (част/стер\*см<sup>2</sup>\*с) в максимуме солнечного протонного события, обусловившего явление ППШ.

Формула (2) - эмпирическое выражение, полученное по экспериментальным данным регистрации ППШ и потоков солнечных протонов в 60 -70-е годы [Дриацкий, 1974].

Для каждого явления ППШ выбирался из каталогов ППШ [Логачев и др., 1982, 1986, 1990, 1999] показатель ( $\gamma$ ) степенной функции, аппроксимирующей интенсивность потоков протонов в диапазоне энергий  $E_p = 1 - 100 \text{ МэВ}$ .

Вторую группу данных составили данные по эффекту полуденного восстановления (ПВ). Для анализа были просмотрены вариации поглощения на ст. Диксон и Молодёжная ( $\varphi = 67.67^\circ \text{Ю}$ ,  $\lambda = 45.95^\circ \text{В}$  и  $\Phi = -66.57^\circ \text{Ю}$ ) во время отобранных явлений ППШ. В этих ППШ выбирались дни с эффектом ПВ, которые происходили на фоне низкой или умеренной геомагнитной активности ( $K_p < 4_+$ ) и при полностью освещённой ионосфере (в равноденственные и местные летние сезоны). Для каждого ПВ рассчитывалась амплитуда этого эффекта по следующей формуле:

$$M = A_m / ((A_n - A_k) * 0.5) \quad (3)$$

где  $A_n$ ,  $A_m$ ,  $A_k$  – поглощение в начале, минимуме и при окончании ПВ (см. рис. 1)

На момент проявления минимума ПВ рассчитывался спектр ( $\gamma$ ) исходя из данных о потоках солнечных протонов, а из таблиц геомагнитных данных выбиралось значение индекса планетарной геомагнитной активности  $K_p$ .

### Анализ экспериментальных данных

На рис. 2а и 2в представлены средние за год (за равноденственные и местные летние сезоны года) значения относительной амплитуды ППШ ( $L_n$ ) по станциям Северного и Южного полушария, а на рис. 3а и 3г значения амплитуды ПВ ( $M$ ) по данным ст. Диксон и Молодёжная соответственно. На рис. 2 и 3 показаны среднегодовые (за равноденственные и местные летние сезоны) значения спектра ( $\gamma$ ) (рис. 2б, 2г, 3б и 3д) и уровня геомагнитной активности ( $K_p$ ) (рис. 3в и 3е) для соответствующих станций. На всех рисунках проведены линии прямолинейной регрессии, аппроксимирующие распределение значений  $L_n$ ,  $M$ ,  $\gamma$  и  $K_p$ .

Линии регрессии показывают, что как по данным станций в центре полярной шапки (рис. 2а и 2в), так и в авроральной зоне (рис. 3а и 3г) проявляется долговременный отрицательный тренд значений  $L_n$  и  $M$ : в 90-м году по сравнению с 70-м годом значения  $L_n$  и  $M$ : уменьшились примерно соответственно на 25% и 40%. Для обоснования причин проявления этого тренда рассмотрены факторы, влияющие на амплитуду ППШ и ПВ.

Спектр потоков протонов. На рис. 2б, 2г, 3б и 3д видно, что практически нет долговременного тренда значений  $\gamma$ , т.е. характер спектра потоков протонов не влияет на долговременную отрицательную тенденцию изменения параметров ППШ ( $L_n$  и  $M$ ).

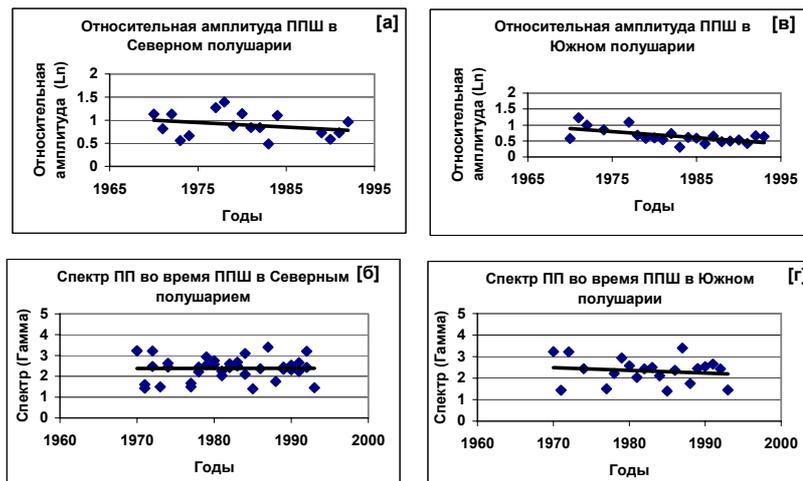


Рис. 2 Средние значения относительной амплитуды ППШ и спектра ПП ( $\gamma$ ) с 1970 – по 1985 годы (данные по Северному [а,б] и Южному [в,г] полушариям)

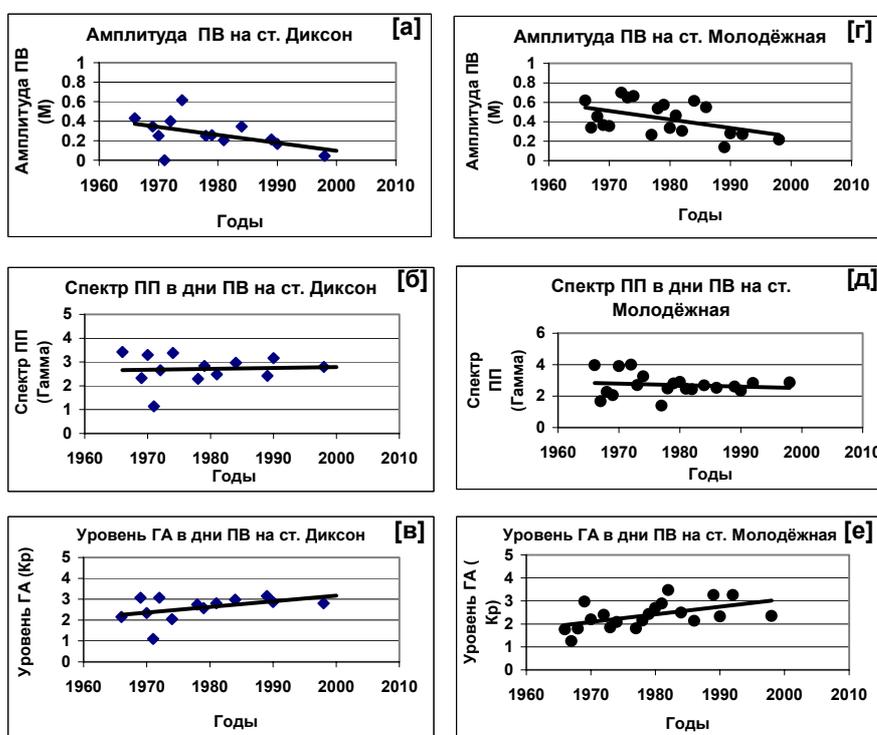


Рис. 3 Долговременный тренд среднегодовых значений амплитуды ПВ, спектра ПП и уровня ГА в дни ПВ на ст. Диксон [а, б, в] и Молодёжная [г,д, е]

Уровень геомагнитной активности. Геомагнитная активность (ГА) не влияет на величину поглощения на станциях внутри полярной шапки, т.е. не влияет на амплитуду ППШ, но влияет на амплитуду ПВ: чем выше уровень ГА, тем меньше амплитуда суточной вариации жёсткости геомагнитного обреза (R<sub>жго</sub>) и меньше амплитуда ПВ [Дриацкий, 1974].

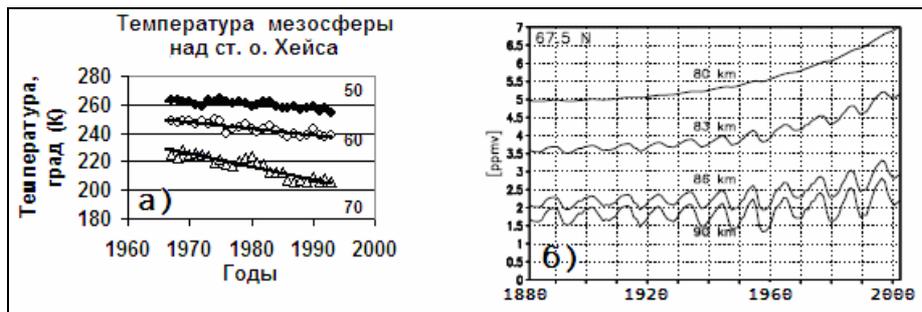
На рис. 3в и 3е видно, что уровень ГА в последние годы несколько увеличивается (положительный тренд значений Kp); на линии прямолинейной регрессии в точках 70 и 90 значения Kp от 2<sub>+</sub> до 3<sub>0</sub>. По предварительным расчётам, такой небольшой положительный тренд уровня ГА вызывает незначительное уменьшение амплитуды суточной вариации жёсткости геомагнитного обреза и незначительное понижение амплитуды ПВ (M): примерно на 5%. Следовательно, отмеченный долговременный положительный тренд уровня ГА несущественно влияет на долговременный отрицательный тренд амплитуды ПВ.

Температура верхней мезосферы. На рис. 4а приведены среднегодовые значения температуры на высотах 50, 60 и 70 км над ст. о. Хейса (ракетное зондирование в 60 – 90-е годы) [Гвишвили и др., 1996]. Видно, что

в течение рассматриваемого периода наблюдается отрицательный тренд температуры мезосферы (особенно на высоте 70 км – верхняя мезосфера). Причина понижения температуры заключается в том, что в результате промышленной деятельности человека происходит большое накопление углекислого газа, метана, паров воды и других газов. При этом усиливается парниковый эффект: температура в нижних слоях атмосферы (в тропосфере) повышается (глобальное потепление), а в стратосфере и мезосфере - понижается [Lastovicka et al.;2004].

При понижении температуры мезосферы с одной стороны происходит увеличение плотности нейтральной атмосферы, что вызывает увеличение скорости ионизации, а следовательно электронной концентрации и поглощения. В результате возрастают амплитуда ППШ и ПВ.

**Водяной пар.** Результатом хозяйственной деятельности человечества является увеличение в атмосфере количества водяного пара ( $H_2O$ ) и метана ( $CH_4$ ), который превращается в водяной пар. На рис. 4б показаны модельные среднесуточные значения концентрации водяного пара на высоких широтах ( $\lambda = 67.5^\circ C$ ) для летнего солнцестояния (1 июля). Расчёты произведены с учётом увеличения содержания  $CH_4$  и  $CO_2$  после начала индустриальной эры (с 1880 - х годов) [Grygalashvyly, 2009].



**Рис. 4 (а)** Среднегодовые значения температуры на высотах 50, 60 и 70 км над ст. о. Хейса (ракетное зондирование) [Гвишвили и др., 1996]; **(б)** Среднесуточные значения концентрации водяного пара на различных высотах на 1 июля на широте  $67.5^\circ N$  (модельные расчёты) [Grygalashvyly et al, 2009].

Видно, что происходит постепенное возрастание содержания водяного пара, при этом скорость возрастания увеличивается, особенно во второй половине 20 – ого века (включая рассматриваемый по данным о ППШ период 60 – 90-х годов). Возрастание содержания водяного пара вызывает увеличение скорости образования ионов-связок на основе ионов  $O_2^+$  [Данилов и др., 1987]. Поэтому скорость рекомбинации электронов существенно увеличивается, что в результате приводит к уменьшению амплитуды ППШ и ПВ.

Таким образом, физический анализ показывает, что с одной стороны понижение температуры в мезосфере приводит к увеличению амплитуды ППШ и ПВ (за счёт увеличения скорости ионизации). С другой стороны повышение количества водяного пара в мезосфере вызывает уменьшение амплитуды ППШ и ПВ (за счёт увеличения скорости рекомбинации электронов). По-видимому, второй процесс более эффективный, что и вызывает долговременный отрицательный спад значений амплитуды ППШ и ПВ.

## Заключение

Основные результаты проведённого исследования следующие: (1) установлен долговременный отрицательный тренд амплитуды ППШ и амплитуды ПВ за период 1966 – 1998 гг.; (2) основной причиной этого тренда является наблюдаемая в рассматриваемый период тенденция возрастания количества водяного пара в мезосфере (особенно в верхней мезосфере), а так же тенденция понижения температуры мезосферы.

## Список литературы

- Гвишвили Г.В. и др. /Многолетние тренды некоторых характеристик земной атмосферы. Результаты измерений. // Известия АН. Физика атмосферы и океана 1996, т. 32, п. 3, с 329 – 339.
- Данилов А.Д. и др. /Метеорологические эффекты в ионосфере. //Л., Гидрометеиздат, 1987.
- Данилов А. Д., Смирнова Н.В. Долговременные тренды электронной концентрации в области Д: экспериментальные данные //Геоматематизм и аэрономия. Т. 39. No. 2. с. 107 - 112. 1999.
- Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт // Гидрометеиздат, Ленинград, 1974.
- Логачев Ю. И. и др. //Каталоги солнечных протонных событий 1970 - 1979 гг. 1980 – 1986гг.; 1987 – 1996гг. // Москва, ИЗМИРАН, 1982, 1986, 1990, 1999.
- Grygalashvyly, M. G. R. Sonnemann, and P. Hartogh /Long-term behavior of the concentration of the minor constituents in the mesosphere – a model study// Atmos. Chem. Phys., 9, 2779–2792, 2009.
- Lastovicka J., Bremer J. An overview of long-term trends in the lower ionosphere below 120 km. // Surveys of Geophysics. V. 25. P. 69–99. 2004.