

СВЯЗЬ МЕЖДУ СПЕКТРОМ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ И АМПЛИТУДОЙ ВАРИАЦИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ТИПА ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ

науч. сотр. В.А.УЛЬЕВ, вед. инж. И.В.МОСКВИН

¹ ГНЦ РФ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@ari.nw.ru

Рассмотрены экспериментальные вариации изменения поглощения коротких радиоволн в ионосфере над ст. Диксон во время нескольких явлений возрастания поглощения коротких радиоволн в ионосфере полярных широт (поглощения типа полярной шапки – ППШ). Эти явления ППШ обусловлены потоками солнечных протонов (ПП) различного спектра от очень мягкого (с относительным преобладанием низкоэнергичных протонов) до очень жесткого (с относительным преобладанием высокоэнергичных протонов).

Во время всех ППШ наблюдается спад поглощения в дневные часы, т.е. эффект полуденного восстановления (ПВ), и спад поглощения в ночные часы, т.е. эффект день–ночь вариации (ДНВ). Амплитуды спада поглощения во время ПВ и ДНВ сопоставлены со спектрами ПП. Установлена следующая тенденция: чем мягче спектр, тем больше амплитуда ПВ и меньше амплитуда ДНВ.

Ключевые слова: ППШ, спектр потоков солнечных протонов, амплитуды эффектов полуденного восстановления и день–ночь вариации.

ВВЕДЕНИЕ

После мощных солнечных вспышек в нижнюю ионосферу высоких широт проникают потоки протонов солнечных космических лучей, которые вызывают дополнительную ионизацию, возрастание электронной концентрации и поглощения коротких радиоволн (поглощение типа полярной шапки). Основным прибором, регистрирующим ППШ, является риометр. Риометр измеряет суммарное поглощение во всем столбе ионосферы над пунктом наблюдения. Если ППШ произошло в летний (зимний) период, то вариация поглощения подобна временному ходу изменения потоков солнечных протонов (ПП) с энергией около 10 МэВ (5 МэВ). Если ППШ произошло весной или осенью, то временной ход риометрического поглощения имеет суточную вариацию (день–ночь вариацию ДНВ) с максимумом в дневной период и минимумом в ночной. Эта вариация обусловлена сменой освещенности ионосферы над пунктом наблюдения.

Во время некоторых явлений ППШ на станциях авроральной зоны риометрическое поглощение имеет спад в часы, близкие к местному полдню. Этот спад, называемый эффектом полуденного восстановления (ПВ), обусловлен суточной вариацией жесткости геомагнитного обреза на авроральных широтах [1]. В представленной работе анализируется связь между амплитудой ПВ (ДНВ) и спектром потоков протонов, вызывающих данное ППШ.

В предшествующих работах эта связь была установлена по данным наблюдений на нескольких риометрах, настроенных на различные частоты [1]. Уста-

новление этой связи по характеру вариации поглощения на одном риометре может иметь важное практическое применение в системе контроля по наземным данным за изменением радиации в атмосфере после солнечных вспышек, так как сеть одночастотных риометров гораздо более обширная, чем многочастотных.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные данные. На рис. 1 (*a1*, *b1*, *в1*, *г1*) представлены (зачерненные кружки) экспериментальные вариации поглощения на ст. Диксон во время

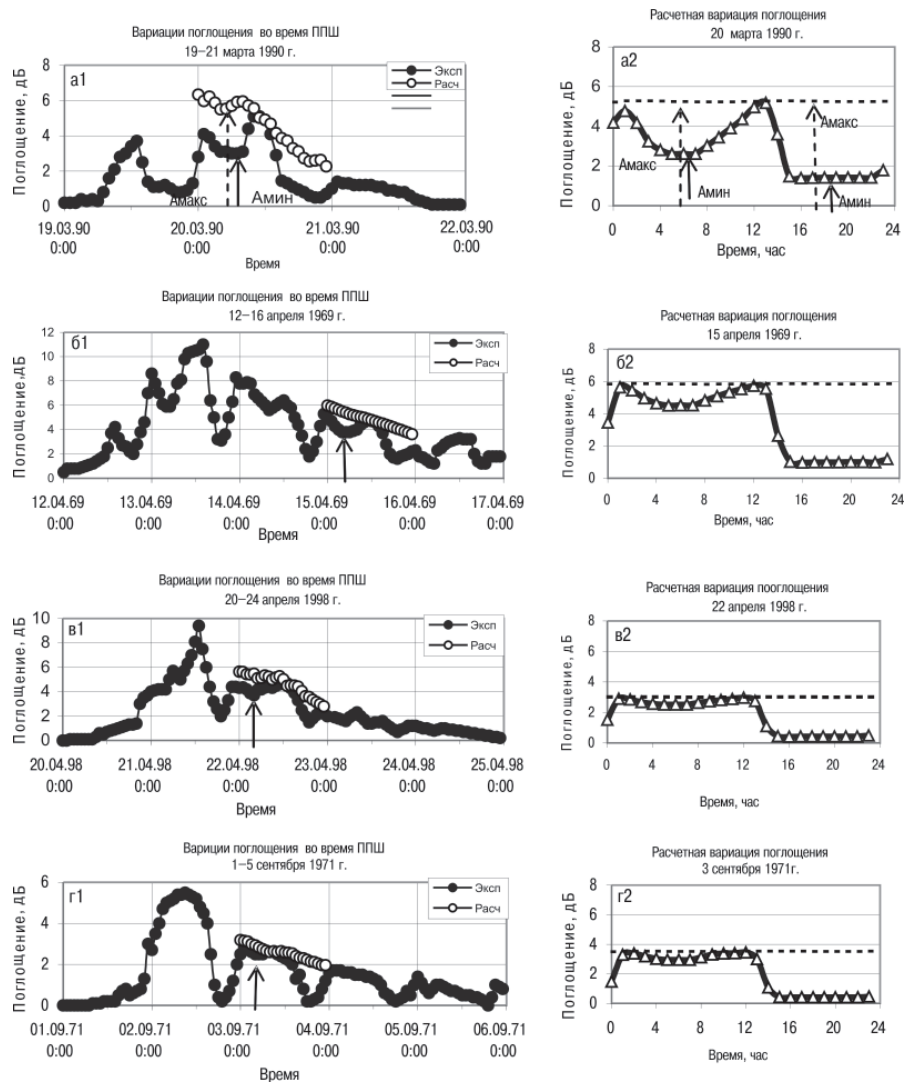


Рис. 1. Вариации поглощения на ст. Диксон во время ППШ

a1, *b1*, *в1*, *г1* – экспериментальные [•] вариации в течение всего ППШ; *a1*, *b1*, *в1*, *г1* – экспериментально-расчетные [o] вариации в течение 1 дня ППШ; *a2*, *б2*, *в2*, *г2* – расчетные вариации при наличии ПВ и ДНВ [Δ] в течение 1 дня ППШ; *a2*, *б2*, *в2*, *г2* – расчетные вариации при отсутствии ПВ и ДНВ [-] в течение 1 дня ППШ. Стрелками показаны моменты минимального поглощения во время ПВ (сплошная стрелка) и максимального поглощения при отсутствии ПВ (прерывистая стрелка)

4-х явлений ППШ: 19–22 марта 1990 г., 12–16 апреля 1969 г., 20–24 апреля 1998 г. и 1–5 сентября 1971 г. В каждом ППШ выбран день, во время которого в часы, близкие полудню и полночи, наблюдаются соответственно эффекты полуденного восстановления и день–ночь вариации (20 марта 1990 г., 15 апреля 1969 г., 22 апреля 1998 г. и 3 сентября 1971 г.). Кроме того были рассмотрены еще 2 дня ППШ (не приведенные на рис. 1): 18 марта 1989 г. и 30 сентября 1989 г. В течение всех рассматриваемых дней уровень магнитной активности был низким ($K_p < 3o$). В табл. 1 приведена характеристика спектра потоков протонов (ПП), зарегистрированных вне магнитосферы в 12 час UT каждых выбранных суток: показатель степенной функции (γ) интегрального энергетического спектра ПП вида $J(> E) = KE^{-\gamma}$ в диапазоне энергий, близких к 10 МэВ (5–50 МэВ).

Амплитуды эффектов полуденного восстановления (ПВ) и день–ночь вариации (ДНВ) рассчитывались по следующим формулам:

$$M_{\text{ПВ}} = 1 - A_{\text{мин}}/A_{\text{макс}}, \quad (1)$$

$$M_{\text{ДНВ}} = 1 - A_{\text{мин}}'/A_{\text{макс}}, \quad (2)$$

где $A_{\text{мин}}$ – поглощение в минимуме ПВ или ДНВ, $A_{\text{макс}}$ – предполагаемое поглощение при отсутствии ПВ или ДНВ.

Для получения $A_{\text{макс}}$ были проведены модельные расчеты поглощения на станции Диксон в рассматриваемые сутки при условии отсутствия в этот день эффектов ПВ и ДНВ, т.е. рассчитана так называемая 0-вариация поглощения (см. рис. 1 ($a1, b1, v1, z1$)). Для этого в модели в каждый час суток величины жесткости геомагнитного обрезания принимались равными 0, а величины коэффициентов рекомбинации – равными дневным значениям. Интенсивность и спектр ПП в эти дни соответствовали реальным значениям. Далее из точки минимума эффекта ПВ (около 05 UT для ст. Диксон) или ДНВ (около 19 UT для ст. Диксон) экспериментальной вариации поглощения восстанавливался перпендикуляр до пересечения с расчетной 0-вариацией. Ордината точки пересечения рассматривалась как величина $A_{\text{макс}}$. Определив $A_{\text{макс}}$ и $A_{\text{мин}}$, по формулам (1) и (2) были вычислены $M_{\text{ПВ}}$ и $M_{\text{ДНВ}}$.

Эти экспериментально-расчетные значения $M_{\text{ПВ}}$ и $M_{\text{ДНВ}}$ в каждый из рассматриваемых дней ППШ указаны в табл. 1 (3-й и 4-й столбцы) и представлены на рис. 2 в зависимости от γ . Очевидна следующая тенденция: чем мягче спектр ПП (больше γ), тем больше амплитуда ПВ и меньше амплитуда ДНВ. Аналитические выражения этой тенденции следующие (R^2 – достоверность аппроксимации):

$$M_{\text{ПВ}} = -0,1\gamma + 0,07, R^2 = 0,6; \quad (3)$$

$$M_{\text{ДНВ}} = 0,02\gamma + 0,08, R^2 = 0,3. \quad (4)$$

Таблица 1

Значения спектра ПП, $M_{\text{ПВ}}$ и $M_{\text{ДНВ}}$ на ст. Диксон во время ППШ

Дата	Показатель степен. спектра	Амплитуды эффектов ПВ и ДНВ			
		Эксп.-расчетные		Расчетные	
	γ	$M_{\text{ПВ}}$	$M_{\text{ДНВ}}$	$M_{\text{ПВ}}$	$M_{\text{ДНВ}}$
	12 UT	05 UT	19UT	05 UT	19UT
15.04.1969	2	0,24	0,58	0,23	0,83
22.04.1998	1,6	0,18	0,58	0,16	0,86
20.03.1990	3,7	0,48	0,79	0,44	0,70
03.09.1971	1	0,09	0,91	0,16	0,88
18.03.1989	2,7	0,29	0,71	0,29	0,80
30.09.1989	0,89	0,30	0,83	0,09	0,88

Расчетные данные. Для более точного определения формул связи между спектром ПП и амплитудой ПВ и ДНВ проведены модельные расчеты поглощения в указанные дни ППШ при следующих условиях. (1) В каждый расчетный час вводились одинаковые ПП, с интенсивностью и спектром, реально зарегистрированными в 12 час UT рассматриваемых суток. Таким образом исключалось влияние на амплитуду ПВ и ДНВ изменения интенсивности и спектра ПП в течение суток в реальных явлениях ППШ. (2) В каждый из выбранных дней вводились одинаковые атмосферные параметры, соответствующие 20 марта 1990 г. Таким образом исключалось влияние сезонного изменения параметров атмосферы на амплитуду ПВ и ДНВ. Расчеты производились в двух вариантах: с имитацией эффектов ПВ и ДНВ (в течение суток изменялись значения жесткости геомагнитного обрезания и коэффициента рекомбинации) и без этих эффектов по методике получения 0-вариации (см. выше). На рис. 1 (а2, б2, в2, г2) эти варианты представлены соответственно непрерывной и штриховой линиями. Для каждой расчетной вариации определены $A_{\text{мин}}$ и $A_{\text{макс}}$ и по формулам (2) и (3) вычислены амплитуды эффектов полуденного восстановления и день–ночь вариации (см. табл. 1).

На рис. 2 представлены графики зависимости расчетных величин амплитуды ПВ и ДНВ от показателя степенного энергетического спектра ПП (γ) (рис. 2 б)

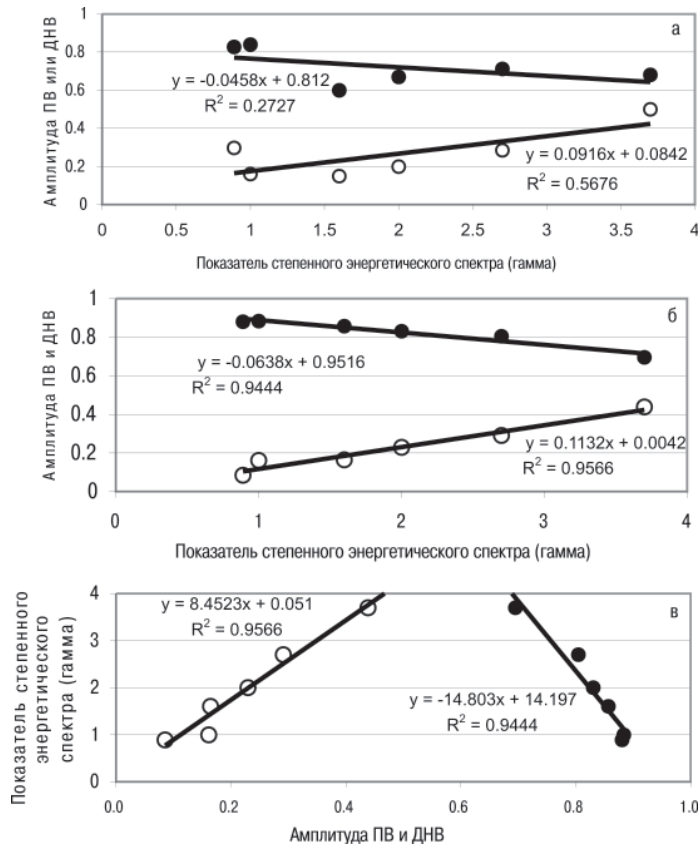


Рис. 2. Связь между спектром потоков протонов и амплитудой эффектов ПВ и ДНВ на станции Диксон: а – зависимость $M_{\text{ПВ}}$ [о] и $M_{\text{ДНВ}}$ [•] от γ по экспериментальным данным; б – зависимость $M_{\text{ПВ}}$ [о] и $M_{\text{ДНВ}}$ [•] от γ по расчетным данным; в – зависимость γ от $M_{\text{ПВ}}$ [о] и $M_{\text{ДНВ}}$ [•] по расчетным данным

и зависимости γ от амплитуды ПВ и ДНВ (рис. 2 в). Очевидны следующие тенденции:

- чем мягче спектр (больше γ), тем больше амплитуда ПВ и меньше амплитуда ДНВ и наоборот;
- чем больше (меньше) амплитуда ПВ (ДНВ), тем больше γ , т.е. мягче спектр ПП.

Аналитические формулы связывающие γ и $M_{\text{пв}}$ и $M_{\text{днв}}$ имеют следующий вид (R^2 – достоверность аппроксимации):

$$M_{\text{пв}} = 0,11\gamma, R^2 = 0,96 \quad (5)$$

$$M_{\text{днв}} = -0,06\gamma + 0,95, R^2 = 0,94 \quad (6)$$

$$\gamma = 8,45M_{\text{пв}} + 0,05, R^2 = 0,96 \quad (7)$$

$$\gamma = -14,82M_{\text{днв}} + 14,2, R^2 = 0,94 \quad (8)$$

Аналитические формулы (5)–(8), полученные по расчетным данным, имеют большую достоверность, чем по экспериментальным (формулы 3, 4). Это связано с выбором двух указанных условий при проведении модельных расчетов поглощения.

Физическое обоснование. Для выявления причины влияния спектра ПП на амплитуду ПВ и ДНВ проведены модельные расчеты высотно-временной вариации скорости ионизации (Q), электронной концентрации (Ne) и поглощения (A) для двух дней ППШ, которые были обусловлены потоками протонов с очень мягким и очень жестким спектром (соответственно 20 марта 1990 г. и 3 сентября 1971 г.). На рис. 3 (а1, б1, в1) представлены вариации Q , Ne и A в период 20 марта 1990 г., а на рис. 3 (а2, б2, в2) в период 3 сентября 1971 г.

Сопоставление изменения Q , Ne и A в эти сутки показывает следующее. Скорость ионизации при мягком спектре (рис. 3 а1) возрастает в основном на больших высотах (выше 70 км), а при жестком (рис. 3 а2) – на малых (в диапазоне 50–70 км). В том и другом случае в полуденные часы наблюдается уменьшение Q на больших высотах, которое очень существенно при мягком спектре (рис. 3 а1) и несущественно при жестком (рис. 3 а2).

Электронная концентрация (рис. 3 б1 и 3 б2) возрастает в обоих случаях на больших высотах. Однако при жестком спектре (рис. 3 б2) наблюдается также заметное возрастание электронной концентрации в дневной период на малых высотах.

Поглощение в дневной период возрастает при мягком спектре на больших высотах с глубоким провалом в полуденные часы (рис. 3 в1), а при жестком спектре (рис. 3 в2) – возрастает на малых высотах с незначительным уменьшением в полуденные часы. В ночной период при мягком спектре наблюдается поглощение на малых высотах, а при жестком спектре поглощение в ночной период практически отсутствует.

Таким образом, с учетом данных рис. 1 и 3 можно следующим образом объяснить зависимость амплитуды ПВ и ДНВ от спектра ПП. Амплитуда ПВ и ДНВ зависит от соотношения в спектре низкоэнергичных и высокоэнергичных ПП (ППнэ и ППвэ). В дневные часы во время ПВ возрастает ЖГО и из процесса ионизации исключаются ППнэ. Если спектр ПП мягкий (жесткий), т.е. относительно много (мало) ППнэ, то исключение ППнэ в дневной период существенно (не существенно) уменьшает Q , а следовательно существенно (не существенно) уменьшаются Ne и A . Поэтому при мягком спектре потоков протонов спад поглощения в полуденные часы (амплитуда ПВ) больше, чем при жестком.

В ночной период во время ДНВ возрастает скорость рекомбинационных процессов, особенно на малых высотах (50–70 км), куда проникают ППвэ и не проникают ППнэ. Поэтому в ночных условиях ППвэ вызывают незначительное увеличение электронной концентрации и вносят малый вклад в общее поглоще-

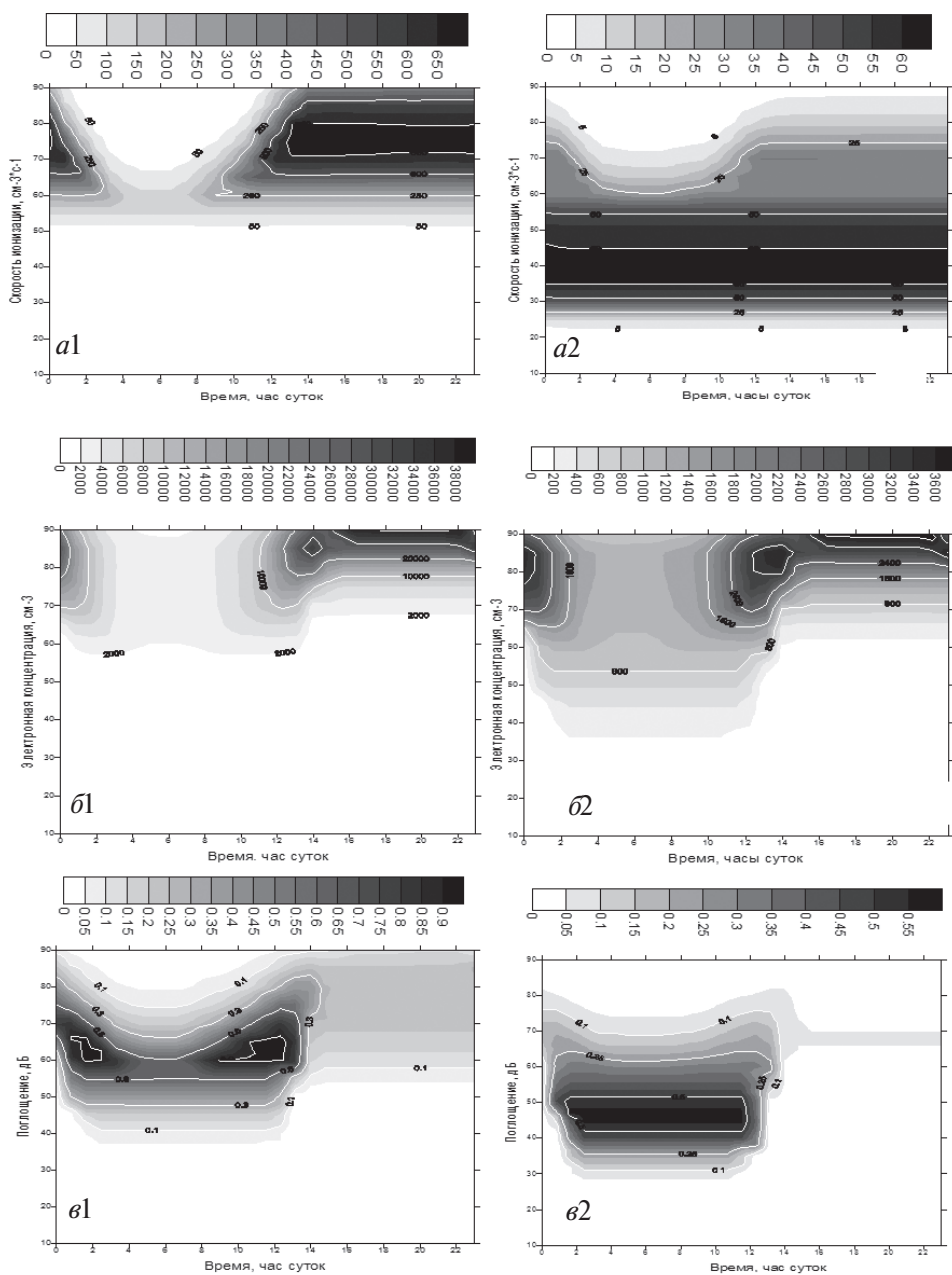


Рис. 3. Высотно-временные вариации скорости ионизации (Q), электронной концентрации (N_e) и поглощения (A) во время дней ППШ 20 марта 1990 г. ($a1$, $б1$, $в1$), и 3 сентября 1971 г. ($a2$, $б2$, $в2$)

ние. Если спектр ПП жесткий (относительно много ППвэ), тогда исключение ППвэ из процесса дополнительного образования электронов в ночных условиях приведет к существенному уменьшению ночного поглощения и к большой разнице поглощения в дневные часы и в полночь, т.е. к большой амплитуде ДНВ.

Если спектр ПП мягкий (относительно мало ППвэ), тогда разница между дневным и ночным поглощением незначительна, т.е. амплитуда ДНВ малая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментальных вариаций поглощения и расчетных вариаций скорости ионизации, электронной концентрации и поглощения во время нескольких ППШ с эффектами ПВ и ДНВ на ст. Диксон позволяет сделать следующие выводы.

1. Амплитуда ПВ выше во время ППШ, обусловленных потоками протонов с более мягким спектром, чем с более жестким; причина этой тенденции – в существенном уменьшении скорости ионизации вследствие повышения жесткости геомагнитного обрезания в дневные часы и исключения из процесса ионизации потоков протонов малых энергий.

2. Амплитуда ДНВ выше во время ППШ, обусловленных потоками протонов с более жестким спектром, чем с более мягким; причина этой тенденции – в существенном уменьшении электронной концентрации вследствие возрастания скорости рекомбинации в ночные часы на малых высотах и исключения из процесса образования электронов потоков протонов больших энергий, проникающих на малые высоты.

3. Полученные расчетные формулы связи спектра потоков протонов и амплитуды ПВ (или ДНВ) позволяют определить характер спектра ПП по данным вариации поглощения только одного риометра.

Таким образом, одночастотные риометрические наблюдения за явлениями ППШ могут дать важный параметр (спектр ионизирующего ПП) для проведения модельных расчетов распределения электронной концентрации и поглощения в ионосфере высоких широт. С другой стороны, амплитуды ПВ и ДНВ можно рассматривать как показатели радиационной активности ПП после мощной солнечной вспышки. С этой точки зрения риометрические наблюдения могут быть использованы как наземное звено в системе контроля радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дриццкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 223 с.

V.A.ULYEV, I.V.MOSKVIN

ON CONNECTION BETWEEN SOLAR PROTON SPECTRUM AND AMPLITUDES OF ABSORPTION VARIATIONS DURING POLAR CAP ABSORPTION

Experimental variations of absorption on the Dickson station are considered during some PCA events which are caused by solar proton fluxes of a various spectrum from very soft to very rigid. During all PCA absorption recovery at noon, i.e. effect of midday recovery (MDR), and absorption recovery at night, i.e. effect day-night variation (DNV) are observed. Amplitudes of recoveries of absorption during MDR and DNV are compared with proton spectra. The following tendency is established: the more softly the spectrum, the more amplitude MDR and less amplitude DMV.

Computational modelling experiments are made. Calculations have confirmed the revealed experimental dependence of amplitude MDR and DNV from proton spectrum. The physical explanation of this dependence is presented. Formulas of calculation of a proton spectrum from amplitude MDR and DNV are received. The revealed connections between a solar proton spectrum and amplitude MDR and DNV allow to use variations of absorption during PCA for an estimation of a solar proton spectrum in interplanetary space.

Keywords: PCA, a spectrum of solar protons, amplitudes of midday recovery and day-night variation effects.