

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ (РИОМЕТРИЧЕСКАЯ) МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ПОГЛОЩЕНИЯ ТИПА ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ (ППШ)

В.А. Ульев, Д.Д. Рогов, А.В. Франк-Каменецкий (Арктический и Антарктический Научно-исследовательский институт (ААНИИ, СПб), Россия; e-mail: vauliev@yandex.ru)

Аннотация. В данной работе предлагается новая модель вычисления поглощения ППШ параметрическая (риометрическая) модель (ПМ). В ПМ исходными данными являются экспериментальные значения интенсивности поглощения ППШ на контрольной станции в центре полярной области. Эти значения пересчитываются в поглощение ППШ в любом пункте высоких широт, используя коэффициенты $K_{пв}$ и $K_{дн}$, которые характеризуют поглощение во время двух основных эффектов ППШ: полуденного восстановления (ПВ) и день-ночь вариации (ДНВ). Благодаря простому алгоритму модель позволяет очень оперативно вычислять поглощение ППШ в любом пункте высоких широт, где проявляется ППШ.

1. Введение

После мощных солнечных вспышек на высоких широтах специальными наземными коротковолновыми приёмниками (риометрами) регистрируется существенное возрастание поглощения коротковолнового галактического радиоизлучения. Это явление называется поглощением типа полярной шапки (ППШ) [1]. Для определения поглощения ППШ в любом пункте на высоких широтах применяются модельные расчёты. Существуют два основных типа моделей для расчёта поглощения ППШ: численная (высотная) модель (ЧМ) и эмпирическая (пороговая) модель (ЭМ) [2]. Ниже описывается ещё одна модель для вычисления поглощения ППШ: параметрическая (риометрическая) модель (ПМ). Принципиальное различие между ПМ с одной стороны и ЧМ и ЭМ – с другой заключается в том, что на вход ЧМ и ЭМ вводятся значения интенсивности потоков солнечных протонов, тогда как в ПМ входными данными являются значения интенсивности риометрического поглощения.

Сущность методики ПМ состоит в том, что реальные экспериментальные значения поглощения ППШ, зарегистрированные на контрольной станции, расположенной в центральной области высоких широт, пересчитываются в значения поглощения в любом выбранном расчётном пункте высоких широт. Для пересчёта используется набор коэффициентов $K_{пв}$ и $K_{дн}$, которые зависят от геофизических условий, влияющих на поглощение ППШ как на контрольной станции, так и в расчётном пункте.

2. Описание и аналитические формулы для определения коэффициентов $K_{пв}$ и $K_{дн}$

На рис. 1 представлена вариация ППШ на ст. Диксон. Каждые сутки наблюдается два понижения поглощения: в часы, близкие к полудню и полуночи, т.е. соответственно – эффект полуденного восстановления (ПВ) и эффект день-ночь вариации (ДНВ). ПВ и ДНВ – главные эффекты, определяющие как временную вариацию поглощения в любом пункте высоких широт, так и неоднородное распределение поглощения ППШ во всей области высоких широт.



Рисунок 1. Вариация поглощения ППШ 11 - 17 апреля 1969г. на ст. Диксон

--o-- --●-- периоды проявления эффектов ПВ и ДНВ

зенитный угол (СЗУ). Поэтому поглощение во время ДНВ зависит от СЗУ (θ). Кроме того, при одинаковом СЗУ поглощение зависит от фазы суток (LT) (при восходе Солнца поглощение меньше, чем при заходе) [1] и от характера спектра потоков солнечных протонов: чем мягче спектр (относительно больше протонов малых энергий), тем больше относительное поглощение в период ДНВ [4]. Спектр характеризуется показателем функции степенного вида (γ), аппроксимирующей значения интенсивности потоков протонов разных энергий: чем мягче спектр, тем больше γ .

Коэффициенты $K_{пв}$ и $K_{дн}$ представляют собой относительное поглощение во время ПВ и ДНВ:

$$K_{пв} = A_{пв}/A_0 \quad (1)$$

$$K_{дн} = A_{дн}/A_0 \quad (2)$$

где $A_{пв}$ и $A_{дн}$ – реальное поглощение во время ПВ и ДНВ; A_0 – возможное поглощение, которое наблюдалось бы при отсутствии ПВ и ДНВ.

Аналитические формулы для расчёта коэффициента $K_{дн}$. Эффект ДНВ обусловлен изменением освещённости ионосферы над пунктом наблюдения в течение суток. Параметром, характеризующим изменение освещённости, является солнечный

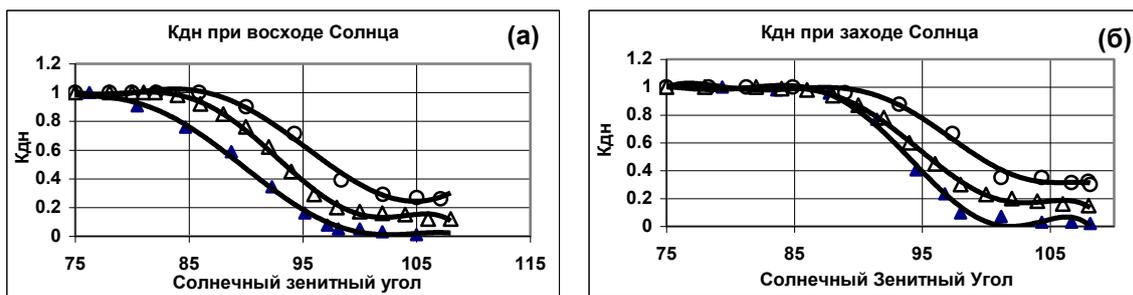


Рисунок 2. Зависимость $K_{дн}$ от СЗУ при восходе (а) и заходе (б) Солнца при жёстком (\blacktriangle), нормальном (\triangle) и мягком (\circ) спектрах потоков протонов.

Таким образом на величину коэффициента $K_{дн}$ влияют 3-и фактора: θ , LT и γ . На рис. 2 представлены значения $K_{дн}$ в зависимости от θ в период восхода и захода Солнца при различном характере спектра потоков протонов. Эти значения аппроксимированы полиномами, имеющими следующие аналитические выражения:

(а) восход, жёсткий спектр ($\gamma = <1.5$);
 $K_{дн}(\theta) = -3E-07\theta^5 + 0.0001\theta^4 - 0.0218\theta^3 + 1.9252\theta^2 - 84.444\theta + 1470.5$ (3)

(б) восход, нормальный спектр ($\gamma = 1.5 \div 2.5$)
 $K_{дн}(\theta) = -6E-07\theta^5 + 0.0003\theta^4 - 0.0534\theta^3 + 4.8503\theta^2 - 218.95\theta + 3930.3$ (4)

(в) восход, мягкий спектр ($\gamma >2.5$)
 $K_{дн}(\theta) = -2E-07\theta^5 + 1E-04\theta^4 - 0.0191\theta^3 + 1.8208\theta^2 - 85.748\theta + 1599.6$ (5)

(г) заход, жёсткий спектр ($\gamma = <1.5$);
 $K_{дн}(\theta) = -9E-07\theta^5 + 0.0004\theta^4 - 0.0783\theta^3 + 7.1762\theta^2 - 327.01\theta + 5925.3$ (6)

(д) заход, нормальный спектр ($\gamma = 1.5 \div 2.5$);
 $K_{дн}(\theta) = -5E-07\theta^5 + 0.0002\theta^4 - 0.0427\theta^3 + 3.9464\theta^2 - 181.2\theta + 3306.3$ (7)

(е) заход, мягкий спектр ($\gamma >2.5$);
 $K_{дн}(\theta) = 5E-08\theta^5 - 2E-05\theta^4 + 0.0023\theta^3 - 0.1071\theta^2 + 0.6811\theta + 58.554$ (8)

Для определения $K_{дн}$, с учётом глобального (γ) и локальных (θ , LT) факторов, необходимо использовать набор формул (3-8). Последовательность операций для определения $K_{дн}$ следующая.

- (1) Исходя из значений интенсивности потоков протонов в различных диапазонах энергий в рассматриваемый момент времени, рассчитывается γ .
- (2) Исходя из географических координат выбранного пункта, рассматриваемый момент времени (по UT) пересчитывается в местное время (LT).
- (3) Исходя из даты и местного времени определяется СЗУ(θ).
- (4) Исходя из γ и LT (восход или заход), выбирается уравнение из набора (3-8).
- (5) Исходя из θ , которое вводится в выбранное уравнение, рассчитывается $K_{дн}$.

Аналитические формулы для расчёта коэффициента $K_{пв}$. Эффект ПВ обусловлен суточной вариацией жёсткости геомагнитного обрезания (ЖГО), которая существует на авроральных широтах. Значения ЖГО ($E_{жго}$) зависят от местного времени (LT), от геомагнитной широты авроральной станции (Φ') и от уровня глобальной геомагнитной активности (Kp) [1, 2]: $E_{жго} = f(LT, \Phi', Kp)$. С другой стороны, амплитуда понижения поглощения во время эффекта ПВ связана с характером спектра потока солнечных протонов [4]. Таким образом коэффициент $K_{пв}$ как параметр эффекта ПВ зависит от $E_{жго}(LT, \Phi', Kp)$ и γ . Для получения аналитических формул зависимости $K_{пв}$ от $E_{жго}$ и от γ выполнена серия расчётов.

На первом этапе рассчитаны значения $E_{жго}$ в каждый час местного времени (LT) при низком уровне ГА ($Kp = 1_0$). Значения $E_{жго}$ рассчитывались риометрическим методом с применением численной модели ПППШ [3]. Расчёт производился для 3-х станций: Диксон ($\Phi' = 67.8^0$), Амдерма ($\Phi' = 64.6^0$) и Салехард ($\Phi' = 61.5^0$) [1]. Выбор этих станций обусловлен тем, что они расположены внутри 3-х широтных поддиапазонов авроральной зоны: на высоких ($\Phi' = 67 \div <70^0$), средних ($\Phi' = 63 \div <67^0$) и низких ($\Phi' = 60 \div <63^0$) авроральных широтах. Поэтому в первом приближении значения $E_{жго}$ этих станций могут быть применены для пунктов, расположенных в этих поддиапазонах авроральных широт.

На рис. 3 представлены графики суточных вариаций $E_{жго}$ (LT) для 3-х указанных станций. Аналитические формулы этих вариаций следующие:

$(E_{жго})_{Kp1} = 0.002 LT^4 - 0.101 LT^3 + 1.307 LT^2 - 3.785 LT + 1.387$ (ст. Диксон) (9)

$(E_{жго})_{Kp1} = 0.003 LT^4 - 0.134 LT^3 + 1.677 LT^2 - 3.663 LT + 0.654$ (ст. Амдерма) (10)

$(E_{жго})_{Kp1} = 0.006 LT^4 - 0.263 LT^3 + 3.228 LT^2 - 6.446 LT + 16.151$ (ст. Салехард) (11)

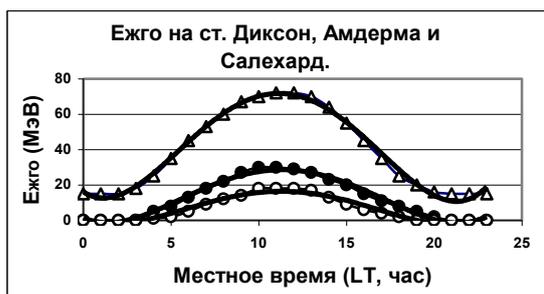


Рисунок 3. Суточная вариация $E_{жго}(LT)$ на ст. Диксон (○), Амдерма (●) и Салехард (Δ)

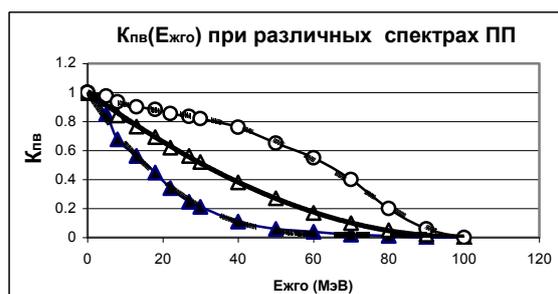


Рисунок 4. Зависимость $K_{пв}$ от $E_{жго}$ при жёстком (▲), нормальном (Δ) и мягком (○) спектрах ПП

Аналогичные расчёты произведены при умеренном ($K_p = 3_0$) и высоком ($K_p = 5_0$) уровнях ГА. На основании этих расчётов определены коэффициенты относительного изменения $E_{жго}$ при изменении уровня ГА:

$$N = (E_{жго})_{K_p > 1} / (E_{жго})_{K_p 1} \quad (12)$$

где $(E_{жго})_{K_p 1}$, $(E_{жго})_{K_p > 1}$ - значения $E_{жго}$ соответственно при $K_p = 1_0$ и при $K_p > 1_0$

Для каждой станции построены графики зависимости N от K_p и получены следующие аналитические выражения:

$$N = -0.211 K_p + 1.171 \quad (\text{ст. Диксон}) \quad (13)$$

$$N = -0.207 K_p + 1.196 \quad (\text{ст. Амдерма}) \quad (14)$$

$$N = -0.172 K_p + 1.167 \quad (\text{ст. Салехард}) \quad (15)$$

где значения K_p – в десятичной шкале.

При наличии коэффициента N значения $E_{жго}$ при любом уровне ГА рассчитываются по формуле:

$$(E_{жго})_{K_p > 1} = N * (E_{жго})_{K_p 1} \quad (16)$$

На следующем этапе для каждой станции были подобраны суточные вариации значений поглощения ПППШ с эффектами ПВ (при различных спектрах потоков протонов) и рассчитаны коэффициенты $K_{пв}$. Суточные вариации $K_{пв}$ сопоставлены суточным вариациям $E_{жго}$ (9–11). Совмещая данные всех трёх станций, получена связь между $K_{пв}$ и $E_{жго}$ в широком диапазоне значений $E_{жго}$. На рис. 4 представлены графики зависимости $K_{пв}$ от $E_{жго}$ при различных спектрах потоков протонов. Аналитические формулы аппроксимирующих полиномов для этих графиков следующие:

$$K_{пв} = 4E-08 E_{жго}^4 - 8E-06 E_{жго}^3 + 0.001 E_{жго}^2 - 0.012 E_{жго} + 1.005 \quad \text{спектр – жёсткий} \quad (17)$$

$$K_{пв} = 1E-07 E_{жго}^3 + 7E-05 E_{жго}^2 - 0.019 E_{жго} + 1.005 \quad \text{спектр – нормальный} \quad (18)$$

$$K_{пв} = -3E-06 E_{жго}^3 + 0.001 E_{жго}^2 - 0.041 E_{жго} + 1.002 \quad \text{спектр – мягкий} \quad (19)$$

При наличии набора формул (9 -19), а также данных по уровню ГА (K_p) и по характеру спектра потоков протонов (γ), определение коэффициента $K_{пв}$ для выбранного пункта в рассматриваемый момент времени производится следующим образом.

- (1) Исходя из географических координат пункта и момента времени (по UT) определяется геомагнитная широта пункта (Φ') и местное время (LT).
- (2) Исходя из геомагнитной широты Φ' пункта, выбирается одно из уравнений (9–11), наиболее близкое по геомагнитной широте к широте этого пункта, и, исходя из LT, которое вводится в выбранное уравнение, рассчитывается ЖГО при низком уровне ГА ($K_p = 1_0$) $(E_{жго})_{K_p 1}$.
- (3) Исходя из Φ' , выбирается одно из уравнений (13–15) и, исходя из текущего уровня ГА, в выбранное уравнение вводится реальное значение K_p (в десятичной шкале), и рассчитывается N .
- (4) Исходя из N , которое вводится в уравнение (16), рассчитывается значение ЖГО при текущем уровне ГА $(E_{жго})_{K_p > 1}$.
- (5) Исходя из γ , выбирается одно из уравнений (17-19) и, исходя из $(E_{жго})_{K_p > 1}$, которое вводится в выбранное уравнение, рассчитывается $K_{пв}$.

3. Выбор контрольной станции

В качестве контрольной станции (КС) выбираются пункты, на которых стабильно и качественно работает риометрическая аппаратура и которые располагаются на очень высоких геомагнитных широтах ($\Phi' > 70^\circ$). На этих широтах отсутствуют всплески аврорального поглощения, которые искажают поглощение ПППШ, и отсутствует суточная вариация ЖГО, а следовательно, не проявляется эффект ПВ. На этих широтах наблюдается только эффект ДНВ. В местные весенние и осенние сезоны при больших суточных вариациях СЗУ ($80^\circ \geq \theta > 80^\circ$) эффект ДНВ проявляется полностью, в местную зиму при больших СЗУ в течение всех суток (при $\theta > 100^\circ$) проявляется только ночная часть ДНВ (ночное поглощение), а в местное лето при малых

СЗУ в течение всех суток (при $\theta < 80^\circ$) – эффект ДНВ отсутствует и регистрируется только дневное поглощение.

Во время больших СЗУ (при $\theta > 100^\circ$) (в период местной зимы или в местные ночные часы в равноденственные сезоны) на КС поглощение ППШ имеет очень малые величины (ночное поглощение в период ДНВ). Это затрудняет выявление ППШ и точное определение величины поглощения. Для регистрации ППШ любой интенсивности в течение всего года, необходимо иметь по 1-ой КС как в Северном, так и в Южном полушариях. При этом для расчётов используются данные той КС, которая расположена в летнем полушарии.

4. Этапы методики параметрической модели

Методика определения поглощения с использованием ПМ состоит из 6-ти этапов.

- (1) Фиксация экспериментального поглощения на КС $(A_s)_k$ в рассматриваемый момент времени. Если этот момент приходится на дневной период без эффекта ДНВ, то $(A_s)_k = (A_d)_k$, а если на период с наличием эффекта ДНВ, то $(A_s)_k = (A_{дн})_k$.
- (2) Расчёт коэффициента $K_{дн}$, для КС исходя из локальных параметров на КС и с учётом глобальных параметров (по методике вычисления $K_{дн}$, представленной выше в разделе 2).
- (3) Пересчёт $(A_{дн})_k$ с помощью коэффициента $K_{дн}$ в расчётную величину возможного дневного поглощения, которое наблюдалось бы на КС при отсутствии ДНВ: $((A_d)_k)_p = (A_{дн})_k / K_{дн}$
- (4) Допущение, что расчётное возможное дневное поглощение в РП $((A_d)_p)_p$ равно расчётному возможному дневному поглощению на КС $((A_d)_k)_p$ или реальному дневному поглощению на КС $(A_d)_k$: $((A_d)_p)_p = ((A_d)_k)_p$ или $((A_d)_p)_p = (A_d)_k$
- (5) Расчёт коэффициентов $K_{дн}$ и $K_{пв}$ для РП исходя из локальных параметров на РП и с учётом глобальных параметров (по методике вычисления этих коэффициентов, представленной выше в разделе 2) в зависимости от того, на какой период приходится расчётный момент в РП: $K_{дн} = K_{пв} = 1$ - период дневного поглощения без эффектов ПВ и ДНВ; $K_{пв}$ - период эффекта ПВ; $K_{дн}$ - период эффекта ДНВ.
- (6) Пересчёт $((A_d)_p)_p$ с помощью коэффициентов $K_{дн}$ и $K_{пв}$, в расчётную величину поглощения в РП по формулам:

$$\begin{aligned} ((A_{дн})_p)_p &= ((A_d)_p)_p * K_{дн} \text{ - при наличии только эффекта ДНВ;} \\ ((A_{пв})_p)_p &= ((A_d)_p)_p * K_{пв}; \text{ - при наличии только эффекта ПВ;} \end{aligned}$$

5. Преимущества и недостатки параметрической модели

Преимущества параметрической модели (ПМ) заключаются в следующем.

- (1) Применение только риометрических данных.
 - (2) Простота алгоритма.
 - (3) Оперативность получения данных.
- Недостатки ПМ заключаются в следующем. (1) Зависимость от стабильной работы контрольных станций с комплексом риометрических наблюдений. (2) Необходимость предварительных расчётов для составления банка данных по значениям ЖГО для вычисления коэффициентов $K_{пв}$ и $K_{дн}$.

6. Заключение

Итоговые выводы данной работы следующие:

- (1) Разработана принципиально новая модель для вычисления поглощения ППШ – параметрическая (риометрическая) модель (ПМ), в которой используются экспериментальные значения поглощения ППШ, зарегистрированные риометром на контрольной станции $(A_s)_k$ в центре полярной шапки, а так же набор коэффициентов $K_{пв}$ и $K_{дн}$.
- (2) Представлена методика определения коэффициентов $K_{пв}$ и $K_{дн}$ на примере данных 3-х станций авральной зоны.
- (3) Представлен алгоритм пересчёта экспериментальных значений поглощения ППШ на контрольной станции в поглощение в любом пункте высоких широт.
- (4) Описаны принципы выбора контрольной станции.
- (5) Указаны преимущества и недостатки предлагаемой модели.

Литература

1. Дриацкий В.М. / Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт // Гидрометеоздат, Ленинград, 1974г.
2. Rogers N.C. and F. Honary. /Assimilation of real-time riometer measurements into models of 30 MHz Polar Cap Absorption // J.Space Weather Space Clim., 5, A8 (2015).
3. Ульев В.А., И.В. Москвин, М.И., Тясто, О.А. Данилова / Риометрический метод определения жесткости геомагнитного обрезания спектра потоков протонов. // Проблемы Арктики и Антарктики, 2009, n 1, с. 132 – 138.
4. Ульев В.А., И.В. Москвин. / Связь между спектром потоков протонов и амплитудой вариаций поглощения во время поглощения типа полярной шапки. //Проблемы Арктики и Антарктики, 2009, n 1, с. 52 – 59.