

РИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЁСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ППШ.

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

Арктический и Антарктический Научно-исследовательский институт (АНИИ, СПб), отдел геофизики АНИИ, e-mail: vauliev@yandex.ru

Аннотация. Жёсткость геомагнитного обрезания (ЖГО) спектра потоков солнечных протонов (ПП), вызывающих явления ППШ, определяется либо экспериментально, по данным регистрации ПП на спутниках с полярной орбитой, либо теоретически – по результатам расчётов траекторий движения ПП в моделях магнитосферы. В последнее время разработан экспериментально-теоретический (риометрический) метод определения ЖГО, основанный на сопоставлении экспериментальных значений поглощения ППШ, зарегистрированных на станциях авроральной зоны, и расчётных значений поглощения, полученных при использовании численной (высотной) модели ППШ (ЧМ).

В предлагаемой работе представлен вариант риометрического метода, в котором применяется не ЧМ, а эмпирическая (пороговая) модель ППШ (ЭМ). Алгоритм расчёта поглощения с помощью ЭМ существенно проще, чем алгоритм с использованием ЧМ, что обеспечивает оперативное определение значений ЖГО. Расчёты показывают, что значения ЖГО, полученные с использованием ЭМ, близко совпадают с расчётными значениями поглощения, полученными с использованием ЧМ.

1. Введение

При исследовании динамики потоков солнечных протонов (ПП) в магнитосфере и при исследовании морфологии ППШ на авроральных широтах важное значение имеет такой параметр как жёсткость геомагнитного обрезания (ЖГО) спектра ПП, вызывающих явление ППШ. ЖГО характеризуется минимальной энергией спектра ПП, проникающих в рассматриваемую точку магнитосферы во время явления ППШ.

В настоящее время существует два основных метода нахождения ЖГО: (1) экспериментальный – по данным регистрации ПП на спутниках с полярной орбитой и (2) теоретический – по данным вычисления траекторий движения ПП в моделях магнитосферы.

В последние годы в АНИИ разработан ещё один экспериментально-теоретический метод определения ЖГО, который назван риометрическим.

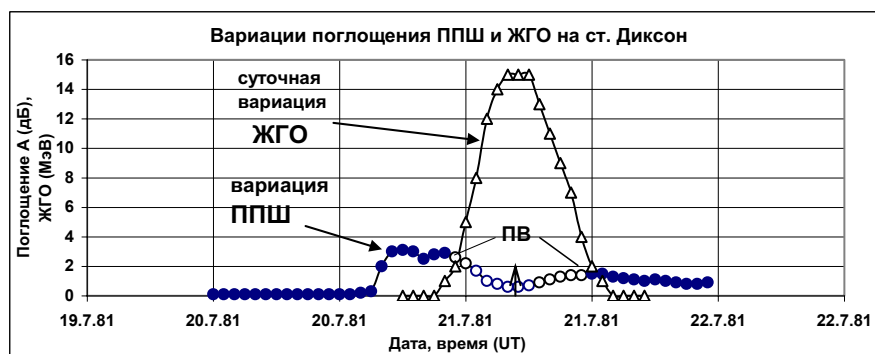


Рисунок 1. Экспериментальная вариация поглощения ППШ 20-22 июля 1981 г. (○●) и расчетная вариация значений ЖГО на авроральной ст. Диксон (Δ).

2. Описание риометрического метода

Физическая основа риометрического метода заключается в следующем. На рис. 1 показана вариация поглощения ППШ, зарегистрированная на ст. Диксон, которая расположена в авроральной зоне (чёрные и светлые точки). Светлыми треугольниками показаны значения ЖГО, полученные в результате траекторных расчётов для ст. Диксон [1]. Стрелкой обозначен момент местного полудня. В часы, близкие к местному полудню (светлые точки) наблюдается понижение поглощения, которое называется эффектом полуденного восстановления (ПВ). Видно, что суточная вариация ЖГО и эффекта ПВ происходят одновременно и в противофазе. Физическая цепочка, связывающая эти вариации имеет следующие звенья:

Увеличение ЖГО --- Увеличение минимальной энергии ограничения спектра --- Уменьшение количества протонов малых энергий --- Уменьшение скорости ионизации и электронной концентрации в верхней части слоя Д --- Понижение общего поглощения --- Эффект ПВ.

Возможны два варианта риометрического метода: с использованием численной ([1]) или эмпирической модели ППШ.

3. Эмпирическая модель ППШ и её применение для определения ЖГО

Базовым уравнением эмпирической модели ППШ является эмпирическая формула расчёта поглощения исходя из интенсивности ПП в одном диапазоне энергий [2, 3], которая называется пороговой энергией (E_n):

$$A = m * (F(>E_n))^n \quad (1)$$

где A – расчётная величина поглощения ППШ (дБ); E_n – пороговая энергия ПП (МэВ); F – интенсивность ПП с пороговой энергией E_n (част/см²*с*ср); m – коэффициент связи (дБ/(см²*с*ср)); n – показатель степени.

По последним данным [3] наиболее оптимальные значения параметров уравнения (1) для вычисления поглощения в центре полярной шапки при полностью освещённой ионосфере являются:

$$(E_n)_ц = 5.2 \text{ МэВ}, \quad m_ц = 0.115, \quad n = 0.5 \quad (2)$$

При выполнении расчётов ЖГО используется два эмпирических уравнения для расчёта поглощения в пункте в центральной области полярной шапки и в авроральной зоне:

$$(A_ц)_p = m_ц * (F(>E_n)_ц)^n \quad (3) \quad (A_a)_p = m_a(m_ц, K_{пв}) * (F(>E_n)_a)^n \quad (4)$$

Параметр ($K_{пв}$) – коэффициент понижения поглощения во время эффекта ПВ на станции авроральной зоны (A_a) относительно поглощения на станции в центральной области ($A_ц$):

$$K_{пв} = (A_a)_ц / (A_ц)_ц, \quad (5) \quad \text{или} \quad K_{пв} = (A_a)_п / (A_ц)_п \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) используются соответственно при наличии или отсутствии станции в центральной области полярной шапки на меридиане близком к меридиану авроральной станции.

Последовательность операций алгоритма определения ЖГО с использованием эмпирической модели следующая.

- (1) Фиксация поглощения ППШ на станции авроральной зоны (A_a)_ц и на станции в центре полярной шапки ($A_ц$)_ц и фиксация интенсивности ПП (F)_ц в различных дискретных диапазонах энергий (в интегральном измерении) на геостационарном спутнике.
- (2) Получение аналитической формулы непрерывного спектра интенсивности ПП ($F(E)$), исходя из дискретных значений (F)_ц.
- (3) Расчёт ($A_ц$)_п (в случае отсутствия станции в центральной области полярной шапки), по формуле (3) с оптимальными значениями параметров (2).
- (4) Расчёт $K_{пв}$ по формулам (5) или (6). (5) Расчёт $m_a = f(m_ц, K_{пв})$; формула m_a указана в разделе 3.
- (6) Выбор значения пороговой энергии ($E_{0п}$)_а = 1 МэВ на начальном шаге итерационного цикла.
- (7) Определение $F_0(>E_{0п})_а$, исходя из формулы непрерывного спектра ПП ($F(E)$).
- (8) Вычисление (A_a)_п по формуле (4).
- (9) Сравнение (A_a)_п с (A_a)_ц.
- (10) Если (A_a)_п > (A_a)_ц, то задаётся ($E_{1п}$)_а = ($E_{0п}$)_а + $\kappa * \Delta E$, где $\Delta E = 0.1 \text{ МэВ}$ – заданный шаг итерационного цикла, κ – номер повторения итерационного цикла.
- (11) Определение $F_1(>E_{1п})_а$, исходя из спектра ПП ($F(E)$).
- (12) Повторяются операции (8 - 11) итерационного цикла до тех пока (A_a)_п = (A_a)_ц. В этом случае последнее значение ($E_{кп}$)_а является искомым величиной ЖГО ($E_{жго}$)_{эм}, полученной с использованием эмпирической модели ППШ.

4. Расчётные данные

Для апробации рассмотренной методики были проведены серии расчётов $E_{жго}$ при различных значениях параметров (условиях), используемых в методике. На рис. 2 представлены графики расчётных значений $E_{жго}$. Светлые и чёрные точки – значения ($E_{жго}$)_{эм}, и ($E_{жго}$)_{чм}, полученные с использованием соответственно эмпирической и численной модели ППШ. Значения ($E_{жго}$)_{чм}, являются реперными, с которыми сравниваются значения ($E_{жго}$)_{эм}. В нижней части каждого рисунка указаны величины относительного (в %) различия между ($E_{жго}$)_{эм} и ($E_{жго}$)_{чм}: $\Delta E_{жго} = ((E_{жго})_{эм} - (E_{жго})_{чм}) / (E_{жго})_{чм}$.

Расчёты произведены для 3-х моментов времени: 02UT, 06UT и 10UT, которые приходятся примерно на середину фазы спада, минимума и возрастания поглощения в период эффекта ПВ. Представленная серия расчётов выполнялась при следующих характеристиках постоянных (для всех расчётов данной серии) параметров: станция – Амдерма, пороговая энергия (для станции в центре полярной шапки) – $E_n = 5 \text{ МэВ}$, уровень ГА – низкий ($K_p = 2.0$), характер спектра ПП – нормальный ($\gamma = 2.4$). Переменным (для каждого расчёта данной серии) параметром являлся коэффициент связи эмпирической формулы (для авроральной станции) – (m_a). В представленных расчётах применялись следующие формулы (m_a): $m_a = m_ц / K_{пв}$; $m_a = m_ц (1 - K_{пв})$; m_a

$= m_{ц} (2 - K_{пв}); m_a = m_{ц} (3 - K_{пв})$. Полученные величины $\Delta E_{жго}$ показывают, что наименьшая разница между $(E_{жго})_{эм}$ и $(E_{жго})_{чм}$ получается при формуле $m_a = m_{ц} (2 - K_{пв})$.

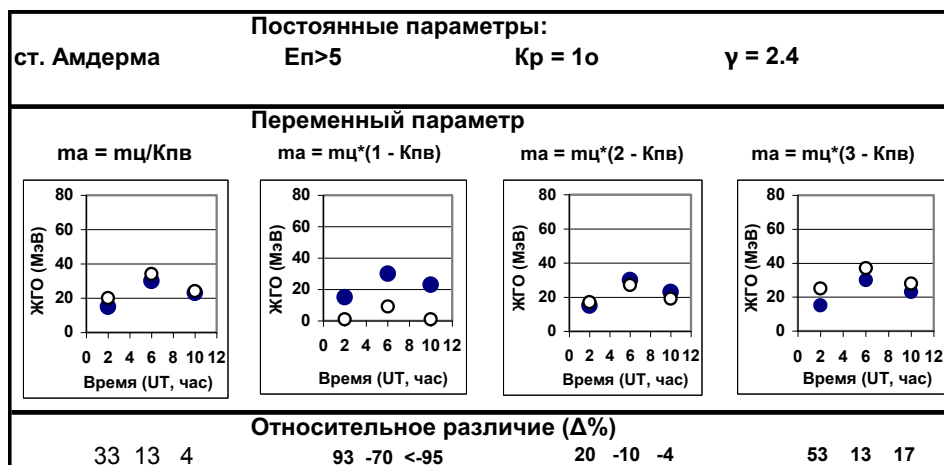


Рисунок 2. Графики сопоставления значений ЖГО $(E_{жго})_{эм}$ (○) и $(E_{жго})_{чм}$ (●) при различных значениях переменного параметра $m_a(m_{ц}; K_{пв})$

Аналогичные серии расчётов были произведены при других значениях переменных и постоянных параметров. Обобщение результатов этих расчётов позволяет сделать следующие выводы о том, при каких параметрах значения $(E_{жго})_{эм}$ в меньшей степени отличаются от значений $(E_{жго})_{чм}$:

- (1) диапазон расчётных широт: средние широты авроральной зоны $\Phi^{\circ} \sim 63 \div 67^{\circ}$;
- (2) пороговая энергия (станция в центральной области полярной шапки): $E_p = 5$ МэВ;
- (3) формула коэффициента связи (авроральная станция): $m_a = m_{ц} (2 - K_{пв})$;
- (4) уровень ГА: низкий и умеренно возмущённый ($K_p < 4.0$);
- (5) характер спектра ПП: спектр любой жёсткости в пределах ($\gamma = 1.2 - 3.2$).

Именно при этих значениях параметров наиболее оптимально с точки зрения точности результатов применение предложенного метода.

Заключение

Основной результат исследования: заключается в том, что разработан новый вариант риометрического метода определения ЖГО с использованием эмпирической модели ППШ.

Этот вариант имеет следующие преимущества: широкое использование риометрических данных. простота алгоритма, высокая оперативность получения результатов.

Проведены расчёты, которые показали, что при определённых значениях параметров предложенный метод определения ЖГО с использованием эмпирической модели даёт значения ЖГО близкие к данным, получаемым с помощью численной модели.

Предложенная методика может быть использована в системе оперативного мониторинга радиационной обстановки и состояния авроральной ионосферы во время явлений ППШ с использованием наземных средств.

Литература

1. 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.
2. Дриацкий В.М. / Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт // Гидрометеиздат, Ленинград, с. 223, 1974г.
3. 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).