

РИОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ СПЕКТРА ПОТОКА СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОНОВ НА АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

науч. сотр. В.А.УЛЬЕВ¹, вед. инж. И.В.МОСКВИН¹,
д-р физ.-мат. наук М.И.ТЯСТО², науч. сотр. О.А.ДАНИЛОВА²

¹ ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoor@aari.nw.ru

² Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, e-mail: marta@mt4697.spb.edu

Предложен новый метод (риометрический метод) расчета жесткости геомагнитного обреза (ЖГО) спектра потоков протонов солнечных космических лучей, проникающих в нижнюю ионосферу высоких широт после мощных солнечных вспышек. Метод основан на совместном использовании материалов риометрических наблюдений, полученных во время явлений возрастания поглощения коротких радиоволн в полярных районах (поглощение типа полярной шапки – ППШ), спутниковых наблюдений потоков солнечных протонов, вызывающих ППШ, а так же результатов модельных расчетов повышения поглощения коротких радиоволн в нижней ионосфере в периоды ППШ.

Риометрическим методом определены значения ЖГО (ЖГО_р) на станции Диксон. Для этой станции так же проведены расчеты поглощения во время 3-х ППШ с использованием риометрических значений ЖГО (ЖГО_р), а также значений ЖГО, полученных спутниковым методом (ЖГО_с) и с помощью траекторных расчетов (ЖГО_т). Сопоставление расчетных данных с экспериментальными показывает, что применение значений ЖГО_р, рассчитанных риометрическим методом, дает более точные величины поглощения, чем при использовании значений ЖГО_с или ЖГО_т. Вычислены коэффициенты пересчета спутниковых и траекторных значений ЖГО при использовании их в ионосферных расчетах поглощения во время ППШ.

Ключевые слова: жесткость геомагнитного обреза, потоки солнечных протонов, риометрические измерения, расчетная модель ППШ.

ВВЕДЕНИЕ

После мощных солнечных вспышек в ионосферу высоких широт проникают потоки протонов (ПП) солнечного происхождения. Наиболее существенное возмущение ионосферы происходит на высотах 50–90 км (ионосферный слой D), куда проникают ПП с энергией 1–100 МэВ. ПП ионизируют атмосферу, в результате происходит возрастание скорости ионообразования (Q), электронной концентрации (N_e) и поглощения коротких радиоволн (A) (поглощение типа полярной шапки – ППШ).

При модельных расчетах параметров возмущенной ионосферы (Q , N_e и A) в модель вводятся значения интенсивности ПП в различных диапазонах энергий от 1–100 МэВ. Спектр ПП, проникающих в данную точку на авроральных широтах, ограничен со стороны малых энергий. Эта граничная энергия называется жесткостью геомагнитного обреза (ЖГО) спектра ПП. Величина ЖГО зависит от геомагнитной широты пункта (чем ниже геомагнитная широта, тем выше ЖГО), от местного времени (чем ближе к местному полудню, тем выше ЖГО) и высоты (чем меньше высота, тем выше ЖГО). Значения ЖГО определяются экспериментальными или расчетными методами.

Экспериментально ЖГО определяется при регистрации ПП на низколетающих спутниках с полярной орбитой, на ракетах, баллонах и нейтронных мониторах.

Данные нейтронных мониторов, баллонов и ракетного зондирования не могут быть использованы в ионосферных расчетах вследствие различных причин: высокие энергии детектируемых протонов (нейтронные мониторы, баллоны), нерегулярность данных (ракетное зондирование). Спутниковые данные непрерывны и включают необходимый для ионосферных расчетов спектр ПП [1]. Однако спутниковые значения ЖГО могут приводить к ошибкам, так как они получены на высотах около 400–600 км, тогда как ионосферные расчеты производятся для высот около 50–90 км (высота, на которой отдают энергию потоки протонов, вызывающие ППШ).

Расчетным методом является метод прослеживания траектории движения заряженной частицы в моделях магнитосферы. Траекторные расчеты определяют ЖГО как минимальную энергию, которая дает возможность частице покинуть магнитосферу при старте из данной точки [2, 4]. Точность определения ЖГО методом траекторных расчетов определяется точностью описания магнитного поля выбранной магнитосферной моделью. При траекторных расчетах ЖГО обычно используются так называемые статические модели магнитосферы. В этих моделях не учитывается изменение траектории движения заряженной частицы под влиянием ряда динамических факторов (питч-угловое рассеяние протонов в плазме кольцевого тока и др.).

В предлагаемой работе описывается третий метод определения значений ЖГО: расчетно-экспериментальный риометрический метод, который позволяет определить более точно значения ЖГО для ионосферных расчетов.

ОПИСАНИЕ РИОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ЖГО

Основные этапы расчета значений ЖГО риометрическим методом заключаются в следующем.

1. Выбирается вариация поглощения авроральной станции во время ППШ с хорошо выраженным спадом поглощения в дневные часы, т.е. с так называемым эффектом полуденного восстановления (ПВ).

2. Производится модельный расчет поглощения на этой станции. Для этого используется модель вычисления дополнительной скорости ионообразования (Q), электронной концентрации (N_e) и поглощения (A) при ионизации ионосферы на высотах 10–90 км протонами с энергией 1–100 МэВ (модель QNA) [3]. В модель QNA вводятся ПП, зарегистрированные в межпланетном пространстве во время рассматриваемого ППШ. Во время эффекта ПВ поглощение уменьшается как результат проявления суточной вариации ЖГО. При этом в межпланетном пространстве интенсивность ПП не изменяется. Для того чтобы при модельном расчете отследить уменьшение поглощения, ПП ограничивается со стороны малых энергий, т.е. производится отсечка протонов малых энергий. Отсечка подбирается таким образом, чтобы расчетное поглощение равнялось наблюдаемому. Эта величина отсечки (в единицах энергии протона – МэВ) является для данной станции жесткостью геомагнитного обрезания спектра ПП, полученной риометрическим методом (ЖГО_р).

3. Набор ежечасных значений ЖГО_р за каждый час суток составляет суточную вариацию ЖГО на данной станции.

Основные преимущества риометрического метода.

1. Значения ЖГО получаются непосредственно для той точки пространства, куда проникают ПП, вызывающие ППШ.

2. Расчет риометрических значений ЖГО с использованием модели QNA требует гораздо меньше машинного времени, чем траекторные расчеты ЖГО.

Недостатки риометрического метода.

1. Риометрический метод трудно применить, если ППШ обусловлено потоком протонов с жестким спектром. Если спектр ПП очень жесткий, то вклад в поглощение потоков протонов малых энергий незначителен и практически отсутствует изменение наблюдаемого поглощения в дневные часы (очень малая ампли-

туда эффекта ПВ). Поэтому невозможно достаточно точно отследить изменение расчетного поглощения при изменении отсечки спектра.

2. Риометрический метод невозможно применить, если ППШ происходит на фоне очень высокой геомагнитной активности (ГА). При высоком уровне ГА на вариации поглощения ППШ накладываются всплески аврорального поглощения, вызванные потоками протонов и электронов магнитосферного происхождения. Если эти всплески следуют непрерывно друг за другом, то на их фоне невозможно выделить уровень поглощения ППШ, обусловленный ПП солнечного происхождения.

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 представлены экспериментальные и расчетные вариации поглощения на ст. Диксон за одни сутки каждого из 3-х явлений ППШ: 20 марта 1990 г. (рис. 1 *a*), 14 апреля 1969 г. (рис. 1 *б*) и 22 апреля 1998 г. (рис. 1 *в*) с эффектом полуденного восстановления (ПВ). Поглощение ППШ в эти дни развивалось на фоне низкого уровня геомагнитной активности ($K_p < 3_0$).

Расчетные величины поглощения вычислены при использовании значений ЖГО, полученных тремя методами: риометрическим (ЖГО_р), спутниковым (ЖГО_с) и траек-

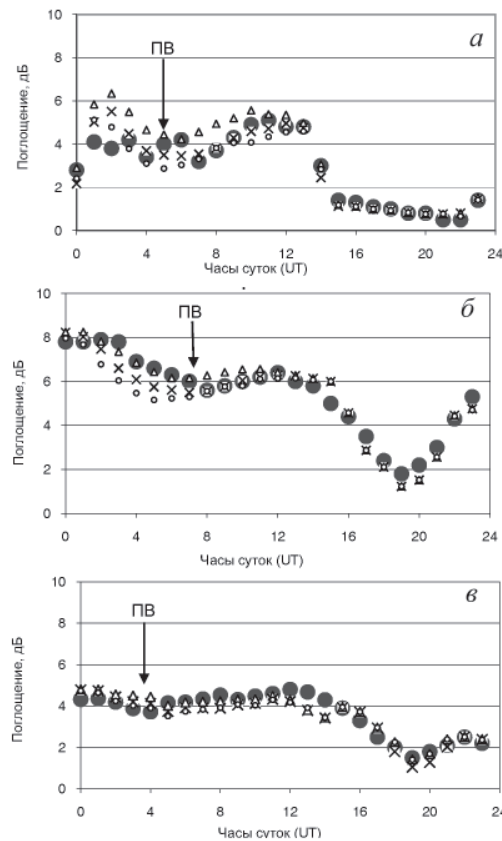


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения поглощения во время трех явлений ППШ: 20 марта 1990 г. (*a*), 14 апреля 1969 г. (*б*), 22 апреля 1998 г. (*в*):

• — экспериментальные значения, × — расчетные значения при использовании ЖГО_р, Δ — расчетные значения при использовании ЖГО_с, о — расчетные значения при использовании ЖГО_т, ↓ — минимум эффекта полуденного восстановления (ПВ)

торным (ЖГОт). Спутниковые значения ЖГО взяты из работы [5]. Траекторные расчеты ЖГО для ст. Диксон выполнены М.И.Тясто и О.А.Даниловой. Риометрические значения ЖГО были определены указанным выше методом. Для этого было отобрано несколько явлений ППШ, происшедших в осенне-весенний сезон года при низком уровне геомагнитной активности. Значения ЖГО за один и тот же час каждого явления ППШ были суммированы, и найдены средние из этих значений. Суточный набор этих средних часовых значений вводился в модельные расчеты.

Из рис. 1 видно, что наиболее близкое значение к экспериментальным данным (зачерненные кружки) имеют расчетные значения поглощения, полученные при использовании значений ЖГО_р (крестики).

Для статистического подтверждения этого вывода вычислены отношения расчетных величин поглощения к экспериментальным для каждого часа дневной половины суток (с 0 до 11 час UT или с 05 до 16 час местного времени для ст. Диксон) для всех 3-х явлений ППШ:

$$M_p = A_p/A_n, M_c = A_c/A_n, M_m = A_m/A_n,$$

где A_p, A_c, A_m – расчетные величины поглощения на ст. Диксон, соответственно, при использовании значений ЖГО_р, ЖГО_с и ЖГО_т.

Значения M_p, M_c, M_m представлены на рис. 2. Видно, что разброс значений M_p относительно ординаты «1» меньше, чем значений M_c и M_m .

Вычислены средние за весь дневной период величины \bar{M}_p, \bar{M}_c и \bar{M}_m

$$\bar{M}_p = 1; \bar{M}_c = 1,1; \bar{M}_m = 0,9.$$

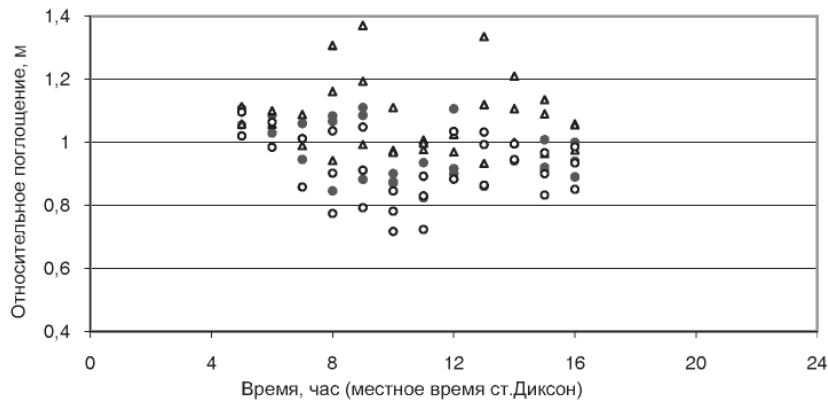


Рис. 2. Относительное поглощение на ст. Диксон в дневные часы для 3-х явлений ППШ: 14 апреля 1969 г., 20 марта 1990 г., 22 апреля 1998 г.

• – M_p , Δ – M_c , \circ – M_m

Таким образом расчетные величины поглощения, полученные с использованием ЖГО_р, в среднем равны экспериментальным величинам, а с использованием ЖГО_с или ЖГО_т в среднем примерно на 10 % соответственно выше или ниже экспериментальных.

На рис. 3 представлены в местном времени данные ст. Диксон: суточные вариации ежечасных абсолютных значений ЖГО_р, ЖГО_с и ЖГО_т (рис. 3 а) и суточные вариации ежечасных относительных значений жесткости геомагнитного обрезания K_c и K_m (рис. 3 б):

$$K_c = \text{ЖГО}_c / \text{ЖГО}_p, \quad K_m = \text{ЖГО}_t / \text{ЖГО}_p.$$

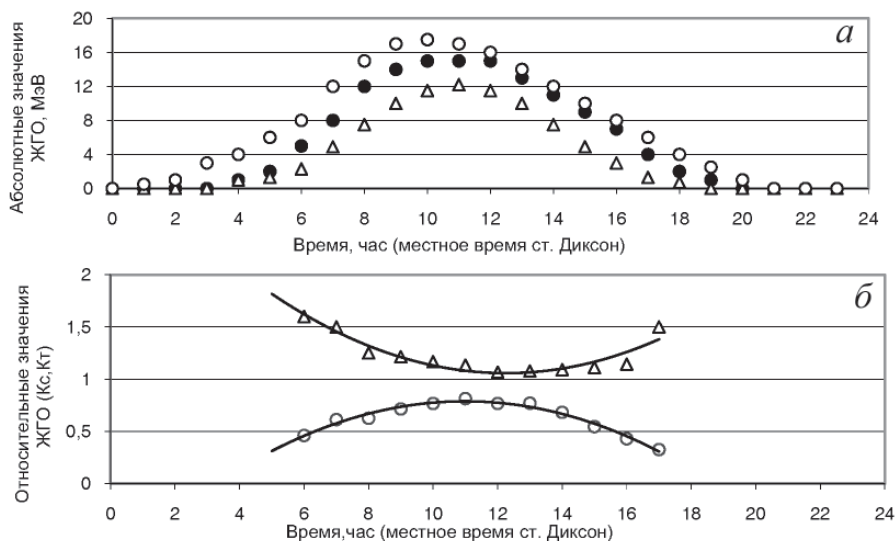


Рис. 3. Суточные вариации абсолютных (а) и относительных (б) значений ЖГО на ст. Диксон. а: • – ЖГО_р, Δ – ЖГО_с, о – ЖГО_т; б: Δ – K_c (относит. значения ЖГО_с), о – K_m (относит. значения ЖГО_т)

Суточный ход K_c и K_m аппроксимирован кривыми, имеющими аналитическое выражение в виде полиномов второй степени:

$$K_c = -0,01t^2 + 0,3t + 0,8, \quad K_m = 0,03t^2 - 0,7t + 5,1,$$

где t – местное время ст. Диксон в диапазоне от 6 до 18 час.

Из рис. 3 а, 3 б видно, что значения ЖГО_р больше, чем ЖГО_с, и меньше, чем ЖГО_т, при этом различие уменьшается в часы, близкие к полудню (по местному времени ст. Диксон). В среднем значения ЖГО, полученные риометрическим методом, примерно на 40 % больше спутниковых и на 30 % меньше траекторных:

$$\bar{K}_c = \sum K_c / 12 = 0,6, \quad \bar{K}_m = \sum K_m / 12 = 1,3.$$

Более точное соотношение между ЖГО_р с одной стороны и ЖГО_с (ЖГО_т) – с другой для каждого часа в диапазоне местного времени от 6 до 18 час могут быть представлены аналитическими формулами:

$$\text{ЖГО}_р = \text{ЖГО}_с / K_c = \text{ЖГО}_с / (-0,01t^2 + 0,3t + 0,8),$$

$$\text{ЖГО}_р = \text{ЖГО}_т / K_m = \text{ЖГО}_т / (0,03t^2 - 0,7t + 5,1).$$

Выявленные тенденции отличия ЖГО_р от ЖГО_с (ЖГО_т) могут быть объяснены следующим образом. Риометрический метод позволяет определить ЖГО на высотах нижней ионосферы (около 70 км), где протоны теряют свою энергию на ионизацию. На высоту 70 км не могут проникнуть ПП малой энергии и ПП с большими пичч-углами, регистрируемые на спутниках на больших высотах (около 600 км). Поэтому риометрические значения ЖГО больше экспериментальных спутниковых.

Траекторные расчеты ЖГО_т проводились для высот $h \sim 20$ км над поверхностью Земли в магнитном поле модели магнитосферы Цыганенко 1989 г. [4]. Реальная ионизация ионосферы потоками солнечных протонов, вызываемыми ППШ, происходит на высотах 50–90 км. Кроме того в реальной магнитосфере динамические факторы обуславливают проникновение солнечных протонов малых энергий на внутренние оболочки магнитосферы. Следовательно, реальная ионизация ионосферы на высотах 50–90 км в рассматриваемом пункте обусловлена потоками

протонов более низких энергий, чем это следует из траекторных расчетов. Поэтому риометрические значения ЖГО меньше траекторных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов, полученных в данной работе, можно сделать следующие выводы.

1. Значения ЖГО на авроральных геомагнитных широтах могут быть получены экспериментально-расчетным риометрическим методом с использованием экспериментальных данных по потокам солнечных протонов и по риометрическому поглощению ППШ с эффектом ПВ и модель расчета поглощения ППШ.

2. Величины поглощения, вычисленные с использованием риометрических значений ЖГО, более точны, чем с использованием спутниковых или траекторных.

3. Значения ЖГО, полученные риометрическим методом, в среднем примерно на 30 % больше спутниковых и меньше траекторных.

Таким образом, при модельных расчетах возрастания скорости ионизации, электронной концентрации и поглощения во время ППШ в пунктах, расположенных на авроральных широтах, следует применять значения ЖГО, полученные риометрическим методом, или значения ЖГО, полученные на спутниках или при траекторных расчетах, умножив их на соответствующие пересчетные коэффициенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тясто М.И., Данилова О.А. и др. Жесткости обрезания космических лучей в период геомагнитных бурь: сравнение магнитосферных моделей // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. № 3. С. 296–302.
2. Fanselow J.L. and E.C. Stone. Geomagnetic cutoffs for cosmic-ray protons for seven energy intervals between 1.2 and 39 MeV // J. Geophys. Res. 1972. Vol. 77. P. 3999–4009.
3. Patterson J.D., Armstrong T.P., Laird C.M. Correlation of solar energetic protons and polar cap absorption // J. Geophys. Res., 2001. Vol. 106. № A1, January 1. P. 149–163
4. Smart D.F., Shea M.A. and E.O. Fluckiger. Calculated Vertical Cutoff Rigidities for the Int. Space Station during Magnetically Quiet Times // Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf. 1999. Vol. 7. P. 394–397.
5. Tsyganenko N.A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet // Planet. Space Sci. 1989. Vol 37. P. 5–20.

V.A. ULYEV, I.V. MOSKVIN, M.I. TYASTO, O.A. DANILOVA

RIOMETER METHOD OF CALCULATION OF GEOMAGNETIC CUTOFF RIGIDITY OF SPECTRUM OF SOLAR PROTONS ON AURORAL LATITUDES

A new method (riometer method) of calculation of geomagnetic cutoff rigidity of spectrum of solar protons penetrating on auroral latitudes after powerful solar flashes is offered. The method is based on using the riometer data during polar cap absorption (PCA) with midday recovery (MDR) effect, fluxes of solar protons causing PCA and models of calculation of increase of short radio wave absorption in the bottom ionosphere during PCA.

Calculations of absorption are spent during several PCA with MDR for station Dickson. Comparison of calculated and observable values of absorption, and also statistical analysis of calculated results show that application of geomagnetic rigidity values received by the riometer method, gives more exact values of absorption, than using the geomagnetic rigidity values received on experimental data (satellite measurements) or by trajectory calculations. Factors of recalculation of the satellite and trajectory geomagnetic rigidity values for computation of ionization rate, electron concentration and absorption during PCA are calculated.

Keywords: geomagnetic rigidity, solar protons fluxes, riometer measurements, computational model of PCA.