

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭФФЕКТА ПОГЛОЩЕНИЯ В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ НА СЕТИ СТАНЦИЙ ААНИИ

COMPARISON OF MODELING OF THE POLAR CAP ABSORPTION EFFECT WITH OBSERVATIONS AT THE AARI GROUND-BASED NETWORK

А.В. Дмитриев *Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцина МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, dalexav@mail.ru***A.V. Dmitriev***Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, dalexav@mail.ru***С.А. Долгачева** *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, dolgachyova2010@yandex.ru***S.A. Dolgacheva***Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia,
dolgachyova2010@yandex.ru***О.А. Трошичев** *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, olegtro@aari.ru***O.A. Troshichev***Arctic and Antarctic Research Institute,
St. Petersburg, Russia,
olegtr@aaari.ru***М.С. Пулинец***Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцина МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, cotopaxy@gmail.com***M.S. Pulinets***Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, cotopaxy@gmail.com*

Аннотация. Эллиптическая модель широты обрезания солнечных космических лучей (СКЛ) рассчитана для событий СКЛ и геомагнитных бурь в феврале, марте, сентябре 2014, июне 2015 и сентябре 2017 г. с целью определения эффекта поглощения в полярной шапке (ППШ). Результаты расчетов сравниваются с наблюдениями эффекта ППШ на станциях ААНИИ, расположенных на севере России в широкой области долгот от 30° до 170° и геомагнитных широт от 56° до 64°. Рассматривается зависимость широты обрезания от интенсивности магнитной бури, а также эффект дополнительной ионизации протонами и электронами СКЛ ночной и дневной ионосферы. Модель демонстрирует удовлетворительную статистическую точность со средней вероятностью правильных предсказаний 0.83. Обсуждаются перспективы дальнейшего совершенствования эллиптической модели, такие как учет воздействия СКЛ более высоких энергий и включение в модель *PC*-индекса потока энергии в полярную шапку.

Ключевые слова: солнечные космические лучи, геомагнитное обрезание, высокоширотная ионосфера, ионозонды, поглощение в полярной шапке.

Abstract. An elliptical model of cutoff for solar cosmic rays (SCR) at high latitudes has been calculated for SCR events and geomagnetic storms that occurred in February, March, and September 2014, June 2015, and September 2017 in order to predict the polar cap absorption (PCA) effect. The prediction is compared with observations of the PCA effect at the AARI network of six ionosondes, located in the north of Russia in a wide range of longitudes from 30° to 170° and magnetic latitudes from 56° to 64°. We examine the dependence of the cutoff latitude on the magnetic storm strength, as well as the effect of additional ionization of the dayside and nightside ionosphere by SCR protons and electrons. The model demonstrates a satisfactory statistical accuracy up to 0.83 for the PCA prediction. We discuss prospects for further improvement of the elliptical model, such as consideration of the impact of SCRs of higher energies and inclusion of the *PC* index of energy flux into the polar cap.

Keywords: solar cosmic rays, geomagnetic cutoff, high-latitude ionosphere, ionosondes, polar cap absorption.

ВВЕДЕНИЕ

Энергичные протоны и электроны солнечных космических лучей (СКЛ) имеют энергию от сотен килоэлектронвольт до нескольких гигаэлектронвольт [Kallenrode, 2003], поэтому способны проникать в атмосферу Земли в области полярных шапок на высоких широтах, а высокоэнергичные СКЛ — также и на средних широтах ($\gtrsim 50^\circ$ геомагнитной

широты). Доступ заряженных частиц из межпланетной среды в магнитосферу Земли ограничен по широте жесткостью частиц, пропорциональной энергии. Самая низкая широта, на которой частица определенной жесткости может достичь поверхности Земли, определяется как широта обрезания для данной жесткости [Kress et al., 2010].

Определение широты обрезания является предметом многочисленных теоретических и эксперимен-

тальных исследований [Birch et al., 2005; Smart, Shea, 2009; Dmitriev et al., 2010]. Было показано, что широта обрезания уменьшается с ростом жесткости. Вследствие асимметрии геомагнитного поля широта обрезания для частиц данного типа зависит от местного времени, а также от уровня геомагнитной возмущенности: широта обрезания уменьшается во время магнитных бурь, особенно в ночные и вечерние часы.

Взаимодействие СКЛ с верхней атмосферой вызывает повышенную ионизацию, которая непосредственно наблюдается в профилях электронного содержания на высоких широтах [Dmitriev et al., 2008]. Протоны и электроны СКЛ создают дополнительную ионизацию в слоях D и E ионосферы. В частности, СКЛ с энергиями от нескольких до десятков мегаэлектронвольт вызывают повышенную ионизацию в области D ионосферы на высотах <90 км, что вызывает эффект поглощения космического радио-шума в атмосфере. Этот эффект обычно измеряется риометрами на частотах 30–40 МГц [Little, Leinbach, 1958, 1959].

С другой стороны, повышенная ионизация в E-области на высотах ~100 км так называемого спорадического радиационного E-слоя (E_{sr}) вызывается электронами и протонами СКЛ с энергией от сотен килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт. Эффект E_{sr} наблюдается ионозондами на частотах 1–10 МГц. Интенсивные высыпания СКЛ вызывают сильную ионизацию верхней атмосферы, что приводит к рассеянию и полному поглощению радиоволн — так называемому эффекту блекаута [Rodger et al., 2006].

Изначально считалось, что за блекауты ответственны протоны СКЛ с энергиями десятков мегаэлектронвольт. Однако некоторые исследования указывают, что существенный вклад в блекаут вносят протоны с энергией несколько мегаэлектронвольт и электроны с энергией в сотни килоэлектронвольт [Clilverd et al., 2007; Dmitriev et al., 2010]. Последние исследования [Heino, Partamies, 2020] эффекта поглощения в полярной шапке (ППШ) для космического радишума показали, что наилучшую точность в предсказании ППШ демонстрирует эллиптическая модель обрезания СКЛ для протонов >2.5 МэВ и электронов >100 кэВ [Dmitriev et al., 2010]. Эффекты ППШ определялись на меридиональных цепочках риометров, расположенных в Канаде и северной Европе, для 73 событий СКЛ с потоками >10 МэВ протонов выше $10 \text{ (cm}^2 \text{ с пр)}^{-1}$ в 1997–2010 гг.

В данной работе мы применяем эллиптическую модель обрезания [Dmitriev et al., 2010] для предсказания эффектов поглощения и образования слоя E_{sr} по данным ионозондов вертикального зондирования ионосферы ААНИИ, расположенных в российском секторе Арктики. Рассматриваются четыре интервала возрастных СКЛ с интенсивными потоками протонов >2.5 МэВ и/или электронов >100 кэВ в 24-м цикле солнечной активности с 2010 по 2020 г. Описание модели дано в разделе 1. Экспериментальные данные по СКЛ и ППШ описаны в разделе 2. Сравнение расчета модели с наблюдениями ППШ представлено в разделе 3 и обсуждается в разделе 4.

1. ЭЛЛИПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Полное описание эллиптической модели обрезания СКЛ в полярных шапках представлено в работе [Dmitriev et al., 2010]. Модель позволяет вычислить геомагнитную широту обрезания λ для протонов и электронов СКЛ с энергиями соответственно от 0.24 до >140 МэВ и >300 кэВ в Северном и Южном полушариях в зависимости от жесткости частиц СКЛ R , местного времени MLT, угла наклона геоидполю PS и часовых индексов геомагнитной активности Dst , K_p и AE . Ниже приводится краткое описание модели в приложении для Северного полушария.

Граница обрезания частиц данного типа и жесткости представляется в виде эллипса в инвариантной системе координат с центром в геомагнитных полюсах, как показано на рис. 1. В этой системе координат используется местное геомагнитное время $rMLT$, которое повернуто на 6 ч на утро: $rMLT = 6 + MLT$. Параметры эллипса, большая as и малая bs полуоси, положение его центра (X_0 , Y_0) и угол наклона φ относительно терминатора утро–вечер являются функцией параметров модели. Зная параметры эллипса, для любого данного $rMLT$ можно определить кошироту Λ и геомагнитную широту обрезания $\lambda = 90^\circ - \Lambda$.

Для протонов СКЛ при невозмущенных геомагнитных условиях полуоси эллипса as_q и bs_q в зависимости от жесткости R определяются следующими выражениями:

$$\sin^4(as_q) = 2.41 \cdot 10^{-2} + 6.23 \cdot 10^{-5} R - 1.26 \cdot 10^{-2} \exp(-2.19 \cdot 10^{-2} R), \quad (1a)$$

$$\sin^4(bs_q) = 2.11 \cdot 10^{-2} + 6.21 \cdot 10^{-5} R - 1.19 \cdot 10^{-2} \exp(-1.81 \cdot 10^{-2} R). \quad (1б)$$

При возмущенных условиях комплексная динамика границ обрезания с изменением управляющих параметров моделируется с помощью многопараметрической линейной регрессии. Вследствие сильной нелинейности моделируются изменения полуосей Δas и Δbs :

$$\Delta as = as - as_q, \quad (2a)$$

$$\Delta bs = bs - bs_q. \quad (2б)$$

Коэффициенты регрессии являются линейными функциями логарифма жесткости протонов, так что общее выражение для параметров Δas , Δbs , X_0 , Y_0 , φ записывается в следующем виде:

$$P = A_0 + B_0 \log R + (A_{Dst} + B_{Dst} \log R) Dst + (A_{K_p} + B_{K_p} \log R) K_p + (A_{PS} + B_{PS} \log R) PS. \quad (3)$$

Значения коэффициентов аппроксимации A_i и B_i даны в табл. 1.

В итоге для данного $rMLT$ можно рассчитать геомагнитную широту обрезания протонов СКЛ λ как точку на эллиптической границе, которая определяется жесткостью R и параметрами Dst , K_p и PS :

Таблица 1

Коэффициенты эллиптической аппроксимации границ обрезания для протонов

Северная ПШ	A_0	B_0	$A_{Dst} \cdot 10^{-2}$	$B_{Dst} \cdot 10^{-2}$	$A_{Kp} \cdot 10^{-2}$	$B_{Kp} \cdot 10^{-3}$	$A_{PS} \cdot 10^{-2}$	$B_{PS} \cdot 10^{-2}$
Δas	-5.68	0.	-9.74	1.16	8.55	-7.46		
Δbs	-6.48	0.	-9.54	1.16	7.66	-7.49		
X_0	-0.29	0.13	3.68	-544	-2.94	3.40		
Y_0	-9.26	1.53	-5.43	.827	-6.60	10.5	-7.40	1.12
φ	-54.9	11.3						

Таблица 2

Коэффициенты эллиптической аппроксимации границ обрезания для электронов >300 кэВ

Северная ПШ	P_0	$P_{Dst} \cdot 10^{-2}$	$P_{Kp} \cdot 10^{-2}$	$P_{PS} \cdot 10^{-2}$	$P_{AE} \cdot 10^{-4}$
as	18.9	-4.3	9.86		
bs	17.1	-4.97	8.42		
X_0	0.758	.482	-2.58		
Y_0	-5.47			-4.68	4.67
φ	17.6	-67.		178.	

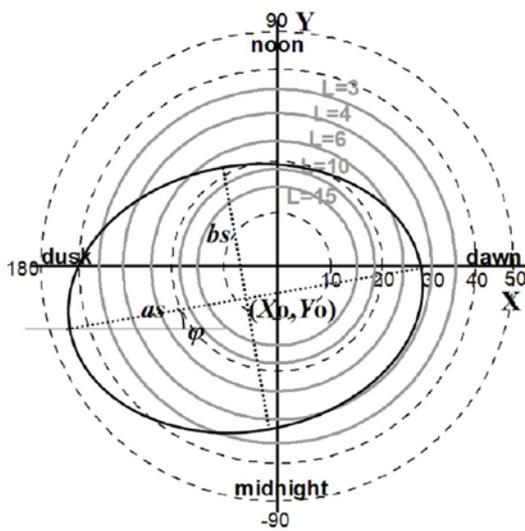


Рис. 1. Система координат $\{rMLT, \Lambda\}$ и параметры эллиптической аппроксимации: Λ — инвариантная коширота; $rMLT$ — повернутое геомагнитное местное время (в градусах), отсчитываемое от утреннего меридиана (ось X). Серые кружки — различные L-оболочки. Эллипс определяется параметрами $as, bs, X_0, Y_0, \varphi$

$$\lambda = 90^\circ - \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4a)$$

$$x = X_0 + as \cos r \text{VLT} \cos \varphi - bs \sin r \text{MLT} \sin \varphi, \quad (4б)$$

$$y = Y_0 + as \cos r \text{MLT} \sin \varphi + bs \sin r \text{MLT} \cos \varphi. \quad (4в)$$

Здесь значения $as, bs, X_0, Y_0,$ и φ определяются из уравнений (1), (2), (3).

В случае электронов СКЛ модель вычисляется аналогичным образом для $as, bs, X_0, Y_0, \varphi$ в виде линейной регрессии от Dst, K_p, AE, PS :

$$P = P_0 + P_{Dst} Dst + P_{K_p} K_p + P_{PS} PS + P_{AE} AE. \quad (11)$$

Коэффициенты регрессии даны в табл. 2.

Эллиптическая модель была применена для предсказания эффекта ПППШ для трех станций Канадской сети цифровых ионозондов (Canadian Advanced Digital Ionosonde, CADI) [Jayachandran et al., 2009]

во время длительного интервала возрастных СКЛ с 6 по 16 декабря 2006 г. [Dmitriev et al., 2010]. Станции CADI расположены вблизи меридиана 270° в диапазоне долгот $62.8^\circ - 80^\circ$ N. Признаком ПППШ служило отсутствие отражения радиосигнала с частотой 4 МГц от F-слоя на высотах >100 км, что было связано с повышенной ионизацией D- и E-слоев под воздействием интенсивных потоков энергичных частиц СКЛ.

Моделировались часовые интервалы, в каждом интервале для частиц данного сорта вычислялась минимальная широта обрезания λ и определялся их максимальный поток F . ПППШ считалось предсказанным моделью, если максимальный поток частиц F был выше некоторого порогового значения F_{th} и широта λ была меньше геомагнитной широты станции λ_0 , т. е. данные частицы вызывали достаточно сильную ионизацию над станцией. Пороговое значение F_{th} является свободным параметром модели и определяется путем приближения модельных ПППШ к наблюдениям, как будет показано ниже.

При сравнении показаний модели с наблюдениями ПППШ на разных станциях вычислялась статистика (время в часах) HT, MT, FA, CR , как показано в табл. 3. Например, HT (Hit) аккумулирует интервалы, когда совпадают наблюдения и предсказания ПППШ; MT (Miss) соответствует неспособности модели предсказать ПППШ; FA (False Alarm) соответствует ошибочному предсказанию моделью ПППШ, в то время как оно реально не наблюдается; CR (Correct Rejection) соответствует правильному предсказанию моделью отсутствия ПППШ. Очевидно, что сумма всех статистик равна полной длительности анализируемого интервала $N = HT + MT + FA + CR$.

На основе этих статистик вычислялись статистические показатели: PCP (Probability of Correct Prediction) и OUR (Overestimation Underestimation Ratio):

$$PCP = (HT + CR) / N, \quad (5)$$

$$OUR = (MT - FA) / (MT + FA). \quad (6)$$

Таблица 3

Статистическая таблица для ППШ

Модель/Наблюдение	Есть ППШ	Нет ППШ
$\lambda \leq \lambda_0, F \geq F_{th}$	HT	FA
$\lambda > \lambda_0, F < F_{th}$	MT	CR

Параметр *PCP* показывает, насколько хорошо модель способна правильно предсказать часовые интервалы ППШ: *PCP*=0 — полная неспособность, *PCP*=1 — идеальное предсказание всех интервалов. Параметр *OUR* показывает, насколько сбалансирована модель. Если модель систематически предсказывает ложные ППШ, *OUR* приближается к 1. Для идеальной модели *OUR*=0.

Варьируя типы частиц (широты обрезания λ) и их пороговые потоки F_{th} , мы получили наилучшую модель ППШ для всех трех станций CADI с максимальным *PCP*=0.77 и *OUR*=0 для следующих частиц СКЛ: протонов 2.5–6.9 МэВ с пороговой интенсивностью $F_{th}=100$ (см² с ср)⁻¹ и электронов >100 кэВ с $F_{th}=2900$ (см² с ср)⁻¹.

В данном исследовании для детального сравнительного анализа эллиптической модели и эффектов ППШ мы используем дополнительные статистические параметры *POD* (Probability of Detection) и *FAR* (False Alarm Rate):

$$POD = HT / (HT + MT), \quad (7)$$

$$FAR = FA / (HT + FA). \quad (8)$$

Параметр *POD* показывает, насколько хорошо модель способна предсказать эффект ППШ: *POD*=0 — полная неспособность; *POD*=1 — идеальное предсказание всех интервалов ППШ. Параметр *FAR* показывает, как часто модель делает ложные предсказания ППШ: *FAR*=0 — нет ложных предсказаний; *FAR*=1 — все модельные предсказания ППШ являются ложными.

2. ДАННЫЕ

Данные о потоках электронов и протонов СКЛ были получены из измерений на межпланетном мониторе ACE инструментом EPAM с временным разрешением 5 мин [Gold et al., 1998]. Эти данные доступны на [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/]. Мы рассматриваем четыре интервала возрастных СКЛ в 24-м солнечном цикле (2010–2020 гг.), в которых потоки протонов с энергией >1.91 МэВ превышали пороговую интенсивность $F_{th}=100$ (см² с ср)⁻¹ и/или потоки электронов с энергией >103 кэВ превышали $F_{th}=2900$ (см² с ср)⁻¹. Интервалы показаны в табл. 4. Важным критерием отбора было наличие магнитных бурь во время интервалов возрастных СКЛ.

Интенсивность бурь характеризуется минимальной *Dst*-вариацией, которая также приведена в табл. 4. Данные о *Dst*, K_p и *AE* доступны в центре данных Киото [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html].

Экспериментальные данные о ППШ были получены с сети ионозондов вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) ААНИИ, расположенных в российском секторе Арктики, как показано на рис. 2 [Калишин и др., 2020]. На станциях ВЗИ используется

Таблица 4

Интервалы возрастных СКЛ

Начало–конец интервала СКЛ	Минимальный <i>Dst</i> , нТл
26.02–03.03.2014	-97
10.09–14.09.2014	-88
20.06–26.06.2015	-198
04.09–16.09.2017	-122

ионозонд CADI, сканирующий ионосферу в частотном диапазоне 1–13 МГц с шагом 0.024 МГц в диапазоне высот 90–1024 км с шагом 1 км [Выставной и др., 2013]. К сожалению, на станции ТИК наблюдения в выбранные интервалы не проводились.

Список станций ВЗИ приведен в табл. 5. Там же даны их уточненные геомагнитные координаты *mLat* и *mLon*, рассчитанные для соответствующих эпох. Хорошо видно, что станции имеют очень широкий разброс по широте ~8° и рекордно широкий разброс по долготе ~110°. Это создает отличные условия для анализа асимметрий ППШ по местному времени, таких как день–ночь и утро–вечер.

Эффект ППШ определялся по экспериментальным данным ВЗИ как отсутствие отражения радиосигналов частотного диапазона 1–4 МГц от ионосферы выше 100 км. На рис. 3 показан пример динамики состояния ионосферы во время события в феврале 2014 г. На верхней панели отображены частотные параметры ионосферы: f_{min} — минимальная частота, наблюдаемая на ионограммах ВЗ; f_oE_s , f_oF2 — критические частоты обыкновенной волны слоев E_s и F2; f_bE_s — экранирующая частота слоя E_s ; f_xI — наибольшая частота, на которой имеются отражения от области F. На средней панели даны высотные параметры ионосферы: hE_s и $hF2$ — минимальные действующие высоты слоев E_s и F2. На нижней панели показан *Dst*.

Линия «тип отражения» на верхней панели рис. 3 обозначает наличие эха до 4 МГц на ионограммах. Частота 4 МГц была выбрана, чтобы сохранить условия определения ППШ, используемые при построении эллиптической модели ППШ [Dmitriev et al., 2010]. Признаком 1 отмечены интервалы, когда есть отражение от F-области ионосферы. Признаком 2 обозначено экранирование F-области слоем E_{sr} . Признаком 0 отмечены интервалы, когда радиосигналы в диапазоне частот 1–4 МГц (или во всем частотном диапазоне ионозонда) отсутствуют на всех высотах. В этом случае сигнал мог рассеяться или отразиться на высотах <90 км, а также, возможно, ионизация была очень слабая с критическими частотами <1 МГц.

Эффект ППШ идентифицировался как наличие признака 0 или 2. В последнем случае считается, что E_{sr} -слой вызван ионизацией верхней атмосферы энергичными частицами СКЛ.

С использованием данной методики для всех станций во время четырех выбранных интервалов возрастных СКЛ были определены часовые интервалы, когда хотя бы в одном 15-минутном интервале наблюдался эффект ППШ. На рис. 4 для шести станций ВЗИ показаны часы с ППШ (темно-синий цвет) и индексы геомагнитной активности для событий СКЛ и магнитных бурь в феврале–марте и сентябре 2014, июне 2015 и сентябре 2017 г.

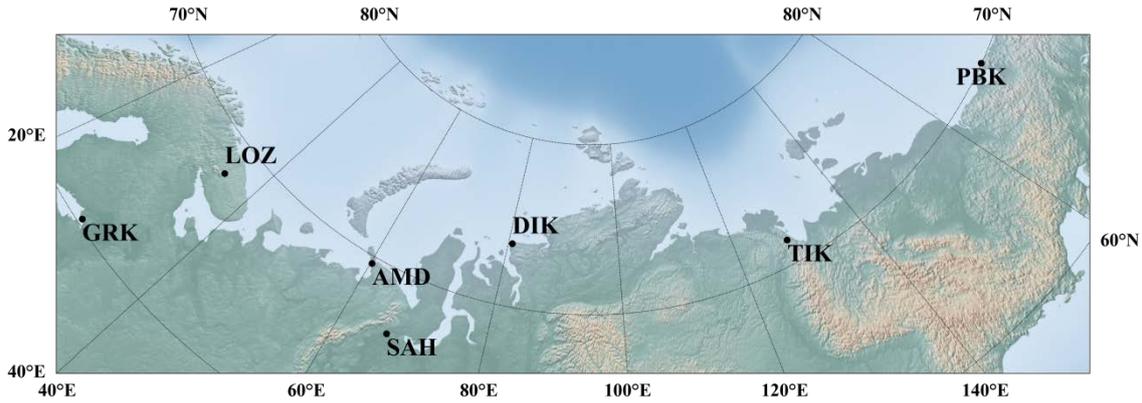


Рис. 2. Сеть станций мониторинга геофизической обстановки в Арктике ААНИИ, на которых проводится ВЗИ

Таблица 5

Координаты станций ВЗИ сети ААНИИ

Код	Пункт наблюдения	Географическая широта и долгота	<i>mLat</i> , <i>mLon</i> 2014 г.	<i>mLat</i> , <i>mLon</i> 2015 г.	<i>mLat</i> , <i>mLon</i> 2017 г.
GRK	Горьковская	60.27° N, 29.38° E	56.83, 116.96	56.84, 116.95	56.89, 116.82
SAH	Салехард	66.52° N, 66.67° E	58.39, 150.03	58.43, 150.04	58.53, 149.97
AMD	Амдерма	69.60° N, 60.20° E	61.97, 146.76	62.01, 146.76	62.1, 146.67
LOZ	Ловозеро	68.00° N, 35.02° E	63.34, 126.8	63.37, 126.77	63.43, 126.62
PBK	Певек	70.03° N, 170.92° E	64.09, -135.27	64.14, -135.12	64.22, -134.94
DIK	Диксон	73.25° N, 80.68° E	64.34, 162.7	64.4, 162.72	64.5, 162.67

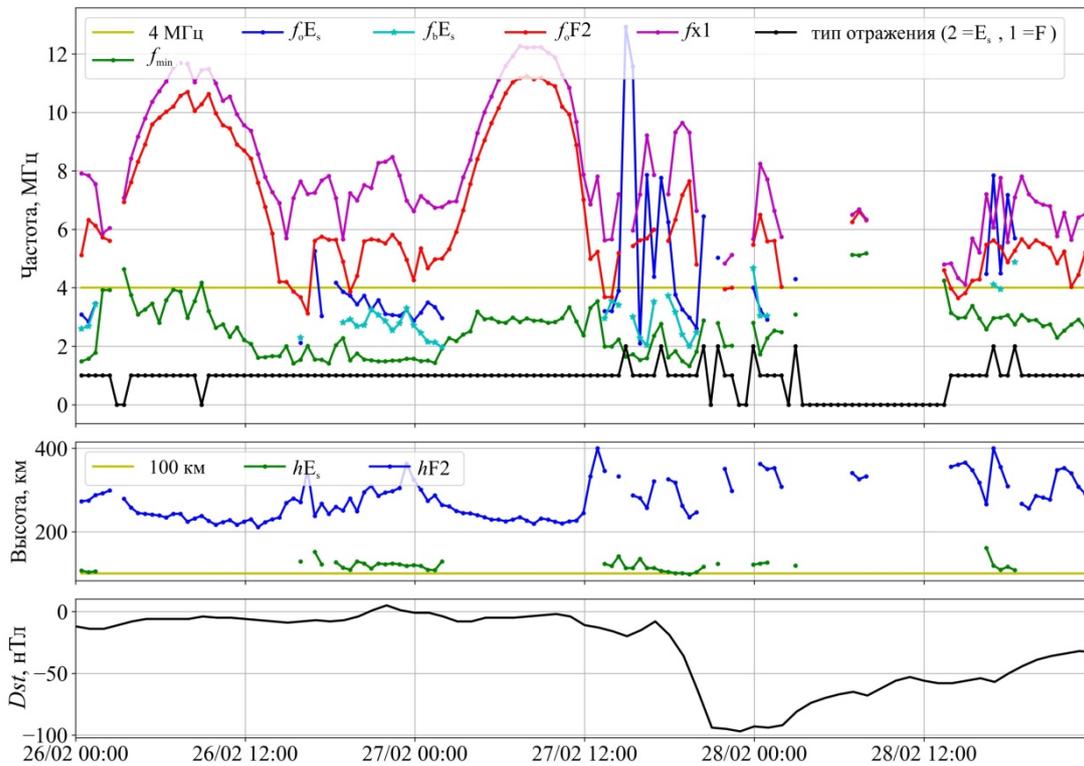


Рис. 3. Динамика параметров ионосферы по данным ВЗИ на станции Диксон (две верхние панели) и *Dst* (нижняя панель) 26–28 февраля 2014 г. Частотные параметры ионосферы: f_{min} — минимальная частота, наблюдаемая на ионограммах вертикального зондирования; f_oE_s и f_oF2 — критические частоты обыкновенной волны слоев E_s и $F2$; f_xE_s — экранирующая частота слоя E_s ; f_xI — наибольшая частота, на которой имеются отражения от области F . Высотные параметры ионосферы: hE_s и $hF2$ — минимальные действующие высоты слоев E_s и $F2$. Линия «тип отражения» показывает код состояния ионосферы в F -области до 4 МГц: отражение отсутствует (0), присутствует (1), происходит экранирование слоем E_s (2)

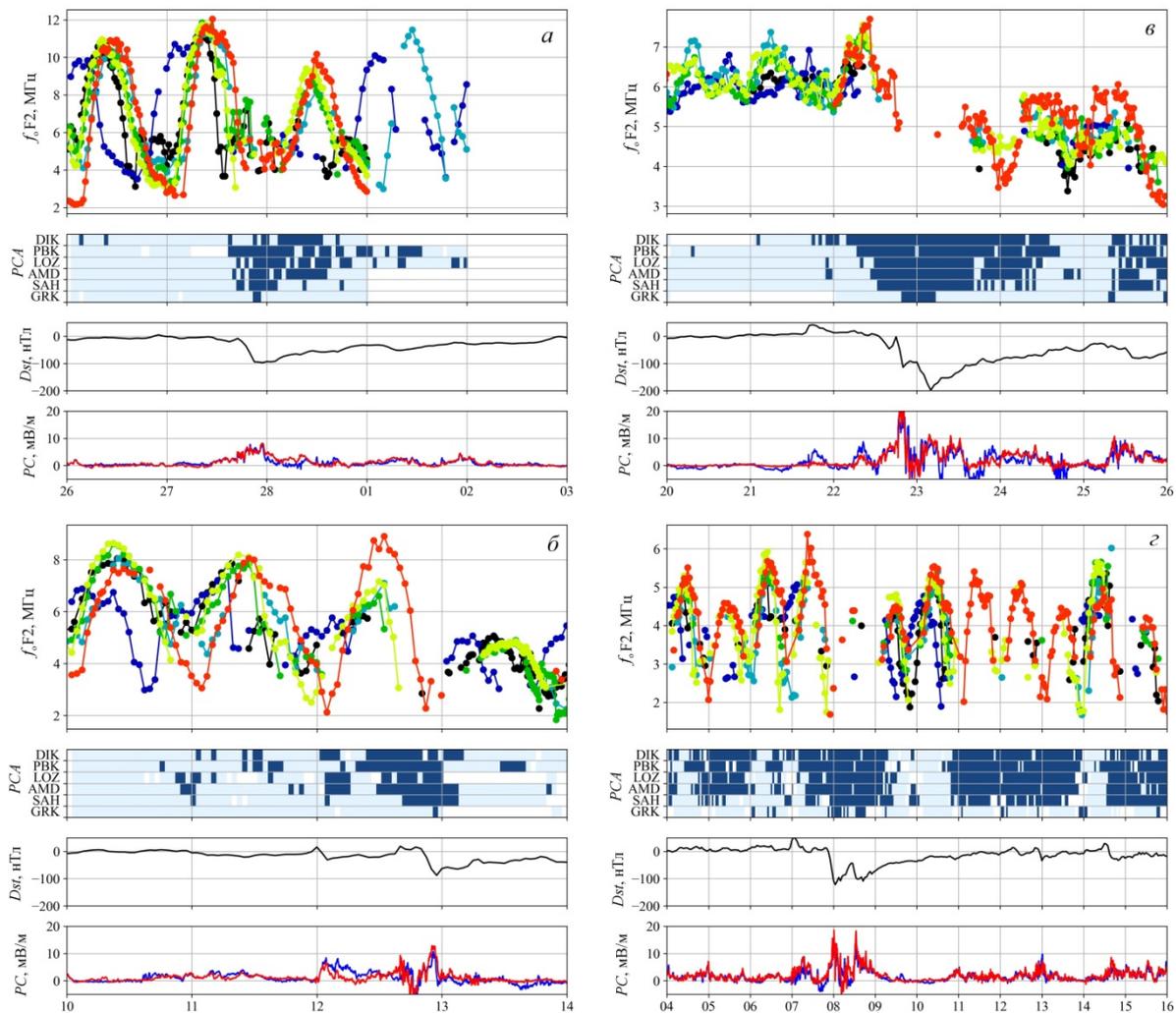


Рис. 4. Состояние F-области ионосферы и геомагнитные индексы для событий в феврале (а) и сентябре 2014 г. (б); июне 2015 (в); сентябре 2017 г. (з). Для каждого события: критические частоты F2-слоя ионосферы для шести станций ВЗИ: DIK (черный), PBK (синий), LOZ (голубой), AMD (зеленый), SAN (желтый), GRK (красный). Средние панели — код наличия ППШ (PCA) для шести станций ВЗИ: белый цвет — нет данных, голубой — есть отражение от F-области, синий — нет отражения. Нижние панели — Dst и PC (красный — PCS , синий — PCN)

Видно, что эффекты ППШ наблюдаются главным образом во время магнитных бурь, которые характеризуются отрицательной Dst -вариацией и ростом PC . Они отмечаются и на наиболее низких широтах (станция GRK) на главной фазе и в максимуме бурь, когда PC возрастает наиболее сильно. Однако ППШ могут наблюдаться и при слабо возмущенных геомагнитных условиях, особенно на высокоширотных станциях. Важно отметить, что в дневные часы эффекты ППШ наблюдаются с частотой, меньшей, чем в ночные. Это может быть связано с асимметрией день–ночь проникновения СКЛ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 5–8 в едином формате представлены результаты применения эллиптической модели обрезания СКЛ для предсказания ППШ на станциях ВЗИ (см. табл. 5) во время событий СКЛ (см. табл. 4). На верхней панели показаны потоки протонов СКЛ с энергией >1.91 МэВ и электронов с энергией >103 кэВ. Заштрихованные области показывают для

этих потоков превышения пороговых значений. Геомагнитная активность характеризуется индексами K_p и Dst . На шести нижних панелях показано сравнение эллиптической модели и наблюдений ППШ на шести станциях ВЗИ. Модельное ППШ определяется следующим образом: потоки протонов >1.91 МэВ или электронов >103 кэВ превышают пороговые значения F_{th} соответственно 100 и 2900 $(\text{см}^2 \text{ с ср})^{-1}$, одновременно с этим модельная геомагнитная широта обрезания этих протонов или электронов ниже геомагнитной широты соответствующей станции.

Важно заметить, что порог обрезания для протонов СКЛ 1.91 МэВ отличается от модельного 2.5 МэВ, однако это отличие несущественно и им можно пренебречь в первом приближении. Кроме того, модельные широты обрезания вычислялись для электронов 300 кэВ, в то время как порог интенсивности для электронов определялся >100 кэВ. В данном случае следует учесть, что эллиптическая модель обрезания СКЛ не была разработана для электронов 100 кэВ, поэтому мы используем грубое приближение равенства границы обрезания для электронов 100

и 300 кэВ. Эта проблема будет обсуждаться в следующей главе на основе результатов статистического анализа.

3.1. Интервал СКЛ 26 февраля – 3 марта 2014 г.

Потоки протонов СКЛ начали быстро расти 26 февраля и оставались выше пороговых до 2 марта 2014 г., как показано на рис. 5. Потоки электронов превысили порог на короткий интервал в первой половине 27 февраля. В этот же день началась магнитная буря, которая достигла максимума $Dst=-97$ нТл в ночь с 27 на 28 февраля и продолжалась до 2 марта. Таким образом, большая часть возрастных СКЛ сопровождалась геомагнитными возмущениями.

Видно, что эллиптическая модель довольно успешно предсказывает ПППШ на высокоширотных станциях DIK, RBK, LOZ и AMD. Важно отметить, что 1 и 2 марта отсутствуют данные о ПППШ со станций DIK и AMD, поэтому они не были включены в расчет статистики, определяющей точность модели. Вероятно, ПППШ могло бы наблюдаться на высокоширотной станции DIK, поскольку оно наблюдается на близкой к ней по широте и MLT станции RBK. Это, вероятно, могло бы улучшить статистику ПППШ, предсказанных моделью на высоких широтах.

Для среднеширотных станций SAN и GRK модель не в состоянии предсказать эффект ПППШ, хотя широты обрезания протонов довольно близко, на $1^{\circ}-3^{\circ}$, приближаются к широтам этих станций в моменты наблюдения ПППШ. В целом точность модели достаточно высока: $PCP=0.80$ с небольшим числом ложных предсказаний ($FAR=0.39$). Невысокое значение $POD=0.57$ связано с низкой точностью модели на средних широтах.

3.2. Интервал СКЛ 10–14 сентября 2014 г.

На рис. 6 показаны параметры и результаты модели для интервала 10–14 сентября 2014 г. Поток протонов СКЛ в этом событии был выше порогового в первой половине интервала до 12 сентября. Потоки электронов были значительно ниже пороговых. Магнитная буря с максимумом $Dst=-88$ нТл в ночь с 12 на 13 сентября произошла после возрастания СКЛ во второй половине интервала. Таким образом, в данном событии возрастание СКЛ наблюдалось отдельно от магнитной бури.

Видно, что точность модели в этом случае невысока, $PCP=0.76$. Модель предсказывает много ложных часовых интервалов ПППШ для высокоширотной станции DIK, что вызывает высокий $FAR=0.72$. С другой стороны, модель не может предсказать ПППШ для среднеширотных станций AMD, SAN и GRK. Более того, модель вообще не предсказывает ПППШ во время магнитной бури 12–13 сентября из-за низких потоков протонов и электронов относительно порога. В результате ее $POD=0.06$ (очень низкий).

3.3. Интервал СКЛ 20–26 июня 2015 г.

Результаты модели для этого интервала показаны на рис. 7. Поток протонов СКЛ в этом событии превышал порог в течение практически всего интервала.

Потоки электронов оставались ниже своих пороговых значений. Мощная магнитная буря с $Dst=-198$ нТл в максимуме началась в ночь с 21 на 22 июня 2015 г. и продолжалась до конца интервала. Таким образом, в данном событии возрастание СКЛ сопровождалось как спокойными геомагнитными условиями, так и магнитной бурей.

Для этого события модель демонстрирует самую высокую точность с $PCP=0.82$. Большая часть часов с ПППШ была успешно предсказана моделью, что дало высокий $POD=0.51$. При этом число ложных предсказаний ПППШ очень низкое, так что $FAR=0.19$. Ложные предсказания ПППШ наблюдаются главным образом при невозмущенных и слабо возмущенных геомагнитных условиях. На среднеширотных станциях SAN и GRK модель не может предсказать большую часть ПППШ вследствие двух факторов. Основным является интенсивность протонов, потоки которых слегка ниже пороговых. Вторым фактором является завышение жесткости обрезания протонов на $1^{\circ}-2^{\circ}$.

3.4. Интервал СКЛ 4–16 сентября 2017 г.

Потоки СКЛ, геомагнитные условия и предсказания модели для этого интервала показаны на рис. 8. Сильные возрастания протонов СКЛ наблюдались с 4 по 13 сентября 2017 г. Умеренная магнитная буря началась 7 сентября и достигла максимума 8 сентября с $Dst=-122$ нТл. В это время потоки СКЛ резко уменьшились ниже пороговых. Во второй интенсификации СКЛ, которая началась на восстановительной фазе бури 9 сентября, наблюдались интенсивные потоки протонов и электронов. В течение всего интервала наблюдались множественные эффекты ПППШ, особенно на высокоширотных станциях, как при спокойных условиях, так и во время бури.

Для этого события эллиптическая модель демонстрирует очень низкую точность $PCP=0.41$. Это связано, прежде всего, с тем, что модель не может предсказать большую часть наблюдаемых ПППШ. Для среднеширотных станций SAN и GRK модель совсем не показывает ПППШ, несмотря на высокие потоки СКЛ. По-видимому, это связано с завышением моделью широты обрезания СКЛ для данных условий. Вследствие малого числа предсказанных ПППШ вероятность ложных предсказаний модели также очень низкая ($FAR=0.12$).

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Статистические параметры эллиптической модели предсказания ПППШ для четырех событий СКЛ сведены в табл. 6. Наивысшая точность модели получена для событий февраля–марта 2014 и июня 2015 г., которые сопровождалась умеренной и сильной магнитными бурями соответственно. В обоих событиях модельные ПППШ связаны с возрастаниями потоков протонов >1.91 МэВ.

Для первого события модель не смогла предсказать ПППШ на среднеширотных станциях, хотя модельные широты обрезания СКЛ были достаточно близки к геомагнитной широте станции (см. рис. 5). Во втором случае модель предсказывает только небольшую

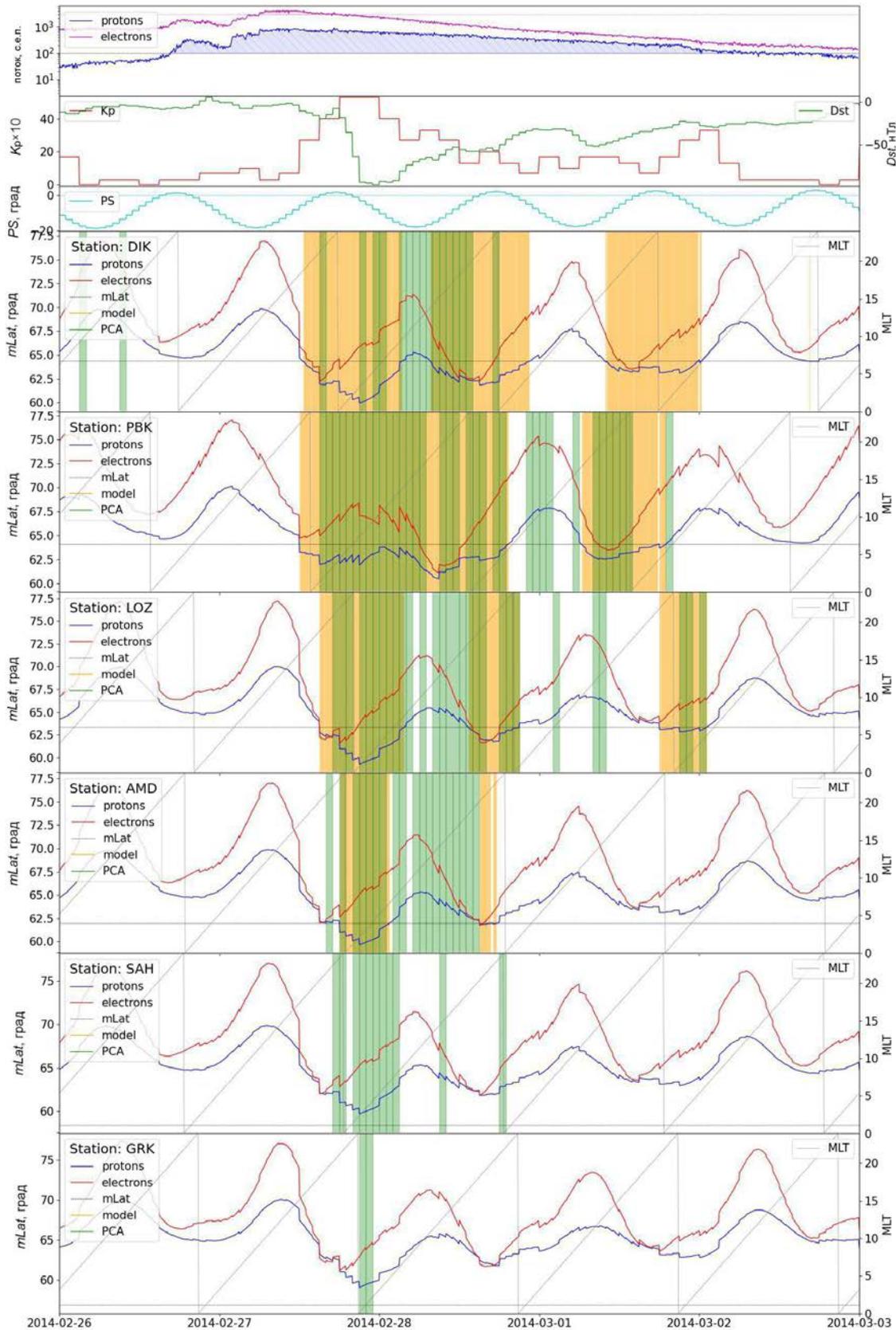


Рис. 5. Сравнение эллиптической модели и наблюдений ППШ на станциях ВЗИ в феврале–марте 2014 г. Сверху вниз: потоки протонов СКЛ с энергией >1.91 МэВ (синяя кривая) и электронов с энергией >103 кэВ (красная кривая); (заштрихованные области — превышения пороговых значений); геомагнитные индексы K_p (красная кривая) и Dst (зеленая кривая); угол наклона диполя PS ; геомагнитные широты обрезания протонов >1.91 МэВ (синяя кривая) и электронов >103 кэВ (красная кривая) для MLT станции DIK (серая ломаная); $mLat$ станции (штриховая прямая); то же для станций AMD; PBK; LOZ; SAH и GRK. Вертикальные зеленые прямоугольники — часы наблюдений ППШ на соответствующих станциях, желтые прямоугольники — расчет ППШ по модели

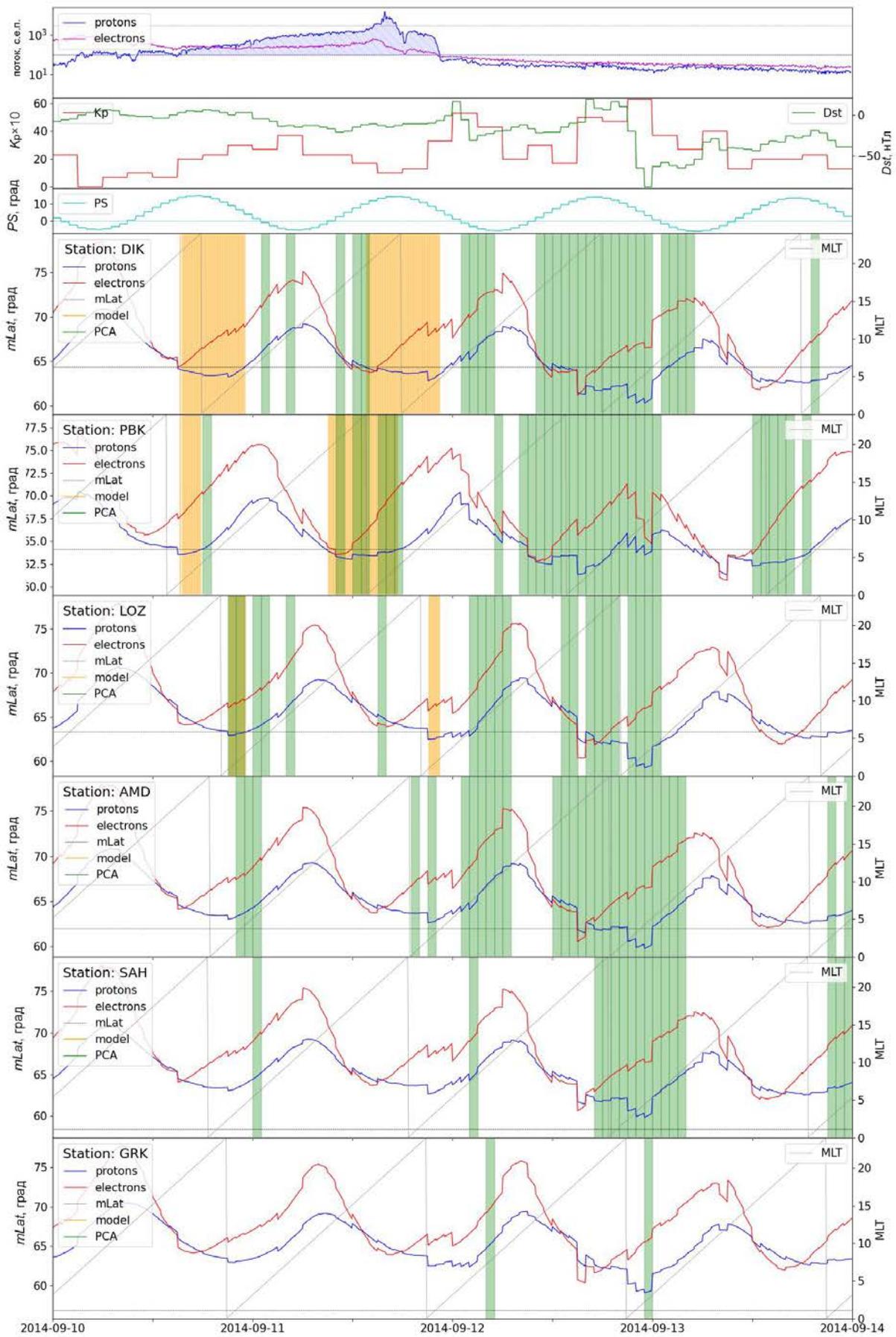


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для интервала 10–14 сентября 2014 г.

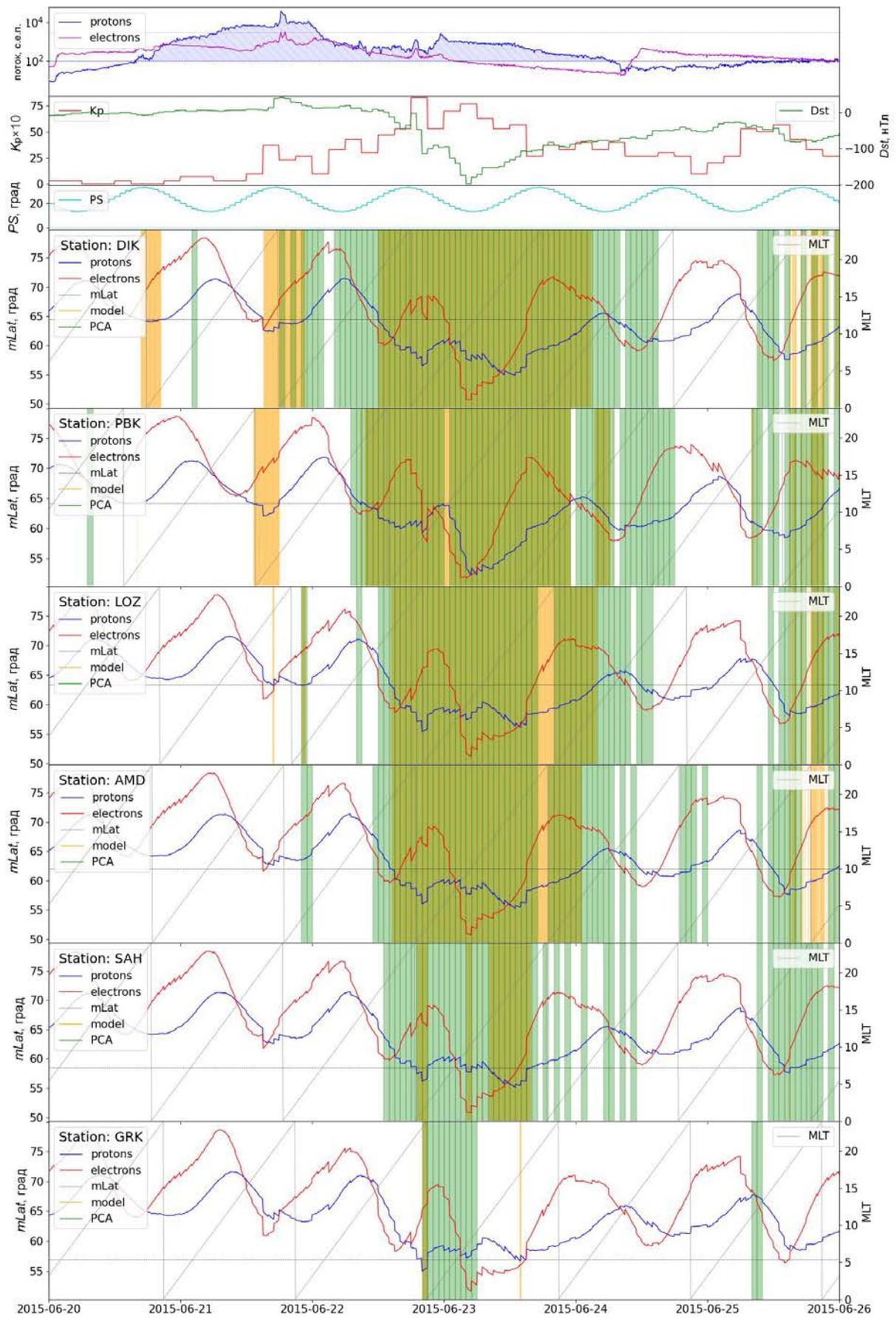


Рис. 7. То же, что на рис. 5, для интервала 20–26 июня 2015 г.

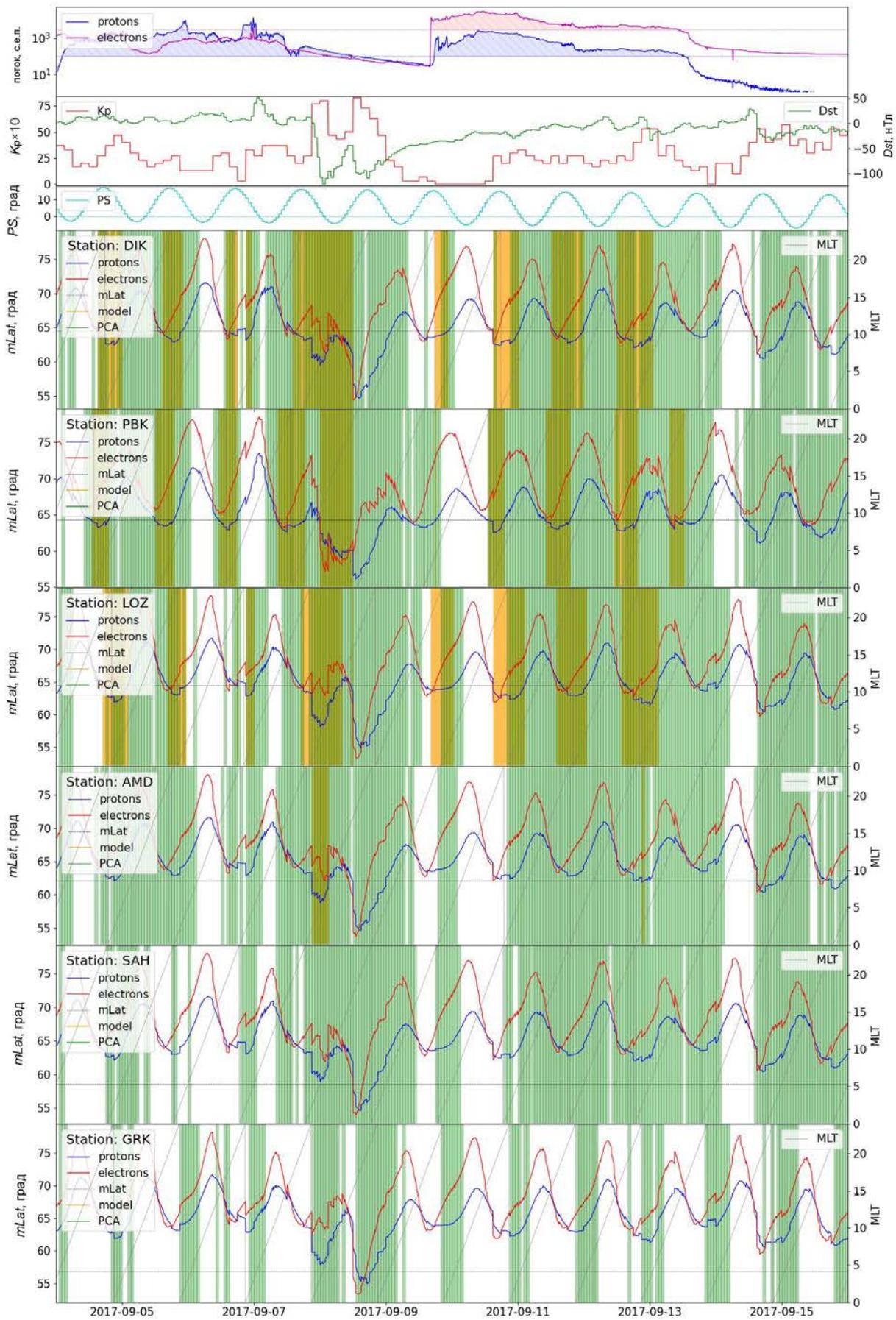


Рис. 8. То же, что на рис. 5, для интервала 04–16 сентября 2017 г.

Таблица 6

Статистические характеристики точности эллиптической модели

Интервалы СКЛ	<i>PCP</i>	<i>POD</i>	<i>FAR</i>	СКЛ	<i>Dst</i> _{min} , нТл
26.02–03.03.2014	0.8	0.57	0.39	p+e	–97
10.09–14.09.2014	0.76	0.06	0.72	p	–88
20.06–26.06.2015	0.82	0.51	0.19	P	–198
04.09–16.09.2017	0.41	0.17	0.12	p+e	–122

часть среднеширотных ППШ вследствие завышенных широт обрезания, а также потоков протонов ниже пороговых.

Таким образом, можно заключить, что для этих событий модель завышает на несколько градусов широту обрезания для протонов. Отчасти это может быть связано с принятым значением энергии >1.91 МэВ в отличие от >2.5 МэВ. Но небольшая разница в энергиях не может дать такой сильной разницы в широтах обрезания. Следовательно, для данных событий, особенно для второго, которое произошло летом, необходимо в дальнейшем уточнить модельные широты обрезания, а также рассмотреть протоны СКЛ более высоких энергий в качестве источника наблюдаемых ППШ.

Невысокие значения *POD* связаны с большим количеством ППШ на дневной стороне, которые не могут быть предсказаны моделью. Вероятно, они вызваны интенсивными высыпаниями энергичных электронов из радиационного пояса во время магнитных бурь. Для проверки этого эффекта необходимо проанализировать данные низкоорбитальных спутников, что является темой дальнейшей работы.

Относительно низкую точность модель демонстрирует для умеренных магнитных бурь во время событий СКЛ в сентябре 2014 и 2017 г. В первом (см. рис. 6) большая часть ППШ наблюдалась во время умеренной магнитной бури, когда потоки протонов СКЛ были несколько меньше пороговых, в то время как модельные широты обрезания были ниже геомагнитной широты станций ВЗИ. В случае уменьшения порога для протонов F_{th} до нескольких десятков $(\text{см}^2 \text{ с ср})^{-1}$ большинство наблюдаемых ППШ могло быть успешно предсказано моделью, причем как в ночные, так и в дневные MLT; при этом без ложных предсказаний в другие интервалы, т. е. без увеличения *FAR*. Небольшая коррекция широты обрезания на средних широтах могла бы также существенно повысить число предсказанных ППШ, т. е. *POD*.

Для второго события точность модели самая низкая, поскольку она не может предсказать большинство наблюдаемых ППШ (см. рис. 8). Для этого события характерно большое количество наблюдений ППШ на всех широтах в дневные часы при спокойных и слабо возмущенных геомагнитных условиях. При этом потоки протонов и электронов СКЛ были очень интенсивны. Это указывает на вклад в ионизацию верхней атмосферы СКЛ более высоких энергий, широта обрезания которых существенно ниже, чем для энергий частиц, используемых в модели.

Кроме того, вторая половина интервала с 11 по 16 сентября сопровождалась слабыми магнитными бурями с небольшими минимальными отрицательными *Dst* в несколько десятков нанотесла. Однако именно в это время наблюдалось наибольшее число часов с ППШ. С другой стороны, *PC*-индекс в это время существенно возрастал до 10 мВ/м, что указывает на сильную возмущенность в полярной шапке. Данное событие требует всестороннего анализа проникновения СКЛ и магнитосферных высыпаний с использованием низкоорбитальных спутников. Более того, по-видимому, параметризация широты обрезания СКЛ в эллиптической модели для данного интервала требует привлечения *PC* в качестве входного геомагнитного параметра.

Из табл. 6 можно видеть, что электроны СКЛ участвуют в генерации ППШ только в двух событиях: февраль–март 2014 и сентябрь 2017 г. При этом в обоих событиях воздействие электронов происходило на фоне интенсивных потоков протонов. В событии июня 2015 г. проникающие электроны СКЛ с энергией >300 кэВ могли бы существенно усилить статистику предсказанных ППШ на средних широтах. Но потоки электронов в это время были много меньше пороговых. В событии сентября 2017 г. практически все предсказанные ППШ объясняются интенсивными потоками протонов СКЛ. Поэтому приближение равенства границы обрезания для электронов 100 и 300 кэВ практически не влияет на результат предсказания эллиптической модели. С другой стороны, эффект энергичных электронов может оказаться существенным при корректировке широты обрезания и пороговых потоков протонов СКЛ на основе данных низкоорбитальных спутников. Этот вопрос является предметом рассмотрения следующего исследования.

В заключение необходимо отметить, что эллиптическая модель была разработана для ограниченного интервала возрастных СКЛ в декабре 2006 г., для которого угол наклона геодиполя *PS* был ограничен диапазоном $-30^\circ \div -10^\circ$. Очевидно, что экстраполяция зависимости от угла *PS* в область до $+30^\circ$ сопряжена с неизбежными серьезными ошибками. При сильном наклоне геодиполя в сторону Солнца в летние месяцы широты обрезания СКЛ на дневной стороне должны быть существенно ниже, чем в зимние месяцы, когда геодиполь отклонен на ночную сторону. Поэтому совершенно необходимо усовершенствовать эллиптическую модель на основе новых событий и данных о проникновении СКЛ в полярную шапку, полученных в разные сезоны с низкоорбитальных полярных спутников, таких как POES и «Метеор».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение эллиптической модели обрезания СКЛ для предсказания эффекта ППШ с использованием данных шести станций ВЗИ ААНИИ, расположенных в российском секторе Арктики, дало следующие результаты.

СКЛ вызывают дополнительную ионизацию верхней атмосферы на высоких и средних широтах. Интенсивные потоки протонов с энергией >1.91 МэВ и электронов с энергией >100 кэВ вызывают рассеяние электромагнитных волн в диапазоне до 13 МГц и генерацию сильного E_{sr} -слоя на высотах ~ 100 км.

Эллиптическая модель обрезания СКЛ позволяет вычислять интервалы ППШ с неплохой точностью $PCP \sim 0.8$. Однако для некоторых событий точность модели очень низкая вследствие заниженного порога потоков протонов СКЛ и завышенной широты обрезания для них. Это связано с диапазоном углов наклона геодиполя в декабре 2006 г., когда северная полярная шапка была отклонена на полночь.

Для улучшения результатов применения эллиптической модели с использованием данных сети станций ВЗИ в российском секторе Арктики предполагается выполнить следующие действия:

- рассмотреть другие сезоны проникновения СКЛ, при которых наклон геодиполя PS достигает 30° ;
- рассмотреть более высокие энергии СКЛ как источник ППШ;
- уточнить пороги интенсивности более энергичных частиц СКЛ;
- использовать PC -индекс как индикатор уровня возмущенности в ходе магнитных бурь.

Благодарим группу инструмента ACE SWERAM и научный центр ACE за обеспечение данных о частицах СКЛ с межпланетного монитора ACE, создателей базы данных OMNI (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) за возможность использования геомагнитных индексов K_p , Dst и AE .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широчков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда SADI. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. № 4. С. 1–10.

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Трошичев О.А., Франк-Каменецкий А.В. ФГБУ «ААНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах. *Вестник РФФИ*. 2020. № 3–4 (107–108). С. 60–78. DOI: [10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78](https://doi.org/10.22204/2410-4639-2020-106-107-3-4-60-78).

Birch M.J., Hargreaves J.K., Senior A., Bromage B.J.I. Variations in cutoff latitude during selected solar energetic proton events. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2005. Vol. 110. A07221. DOI: [10.1029/2004JA010833](https://doi.org/10.1029/2004JA010833).

Clilverd M.A., Rodger C.J., Moffat-Griffin T., Verronen P.T. Improved dynamic geomagnetic rigidity cutoff modeling: Testing predictive accuracy. *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. P. A08302. DOI: [10.1029/2007JA012410](https://doi.org/10.1029/2007JA012410).

Dmitriev A.V., Tsai L.-C., Yeh H.-C., Chang C.-C. COSMIC/FORMOSAT-3 tomography of SEP ionization in the polar cap. *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35. P. L22108. DOI: [10.1029/2008GL036146](https://doi.org/10.1029/2008GL036146).

Dmitriev A.V., Jayachandran P.T., Tsai L.-C. Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. P. A12244. DOI: [10.1029/2010JA015380](https://doi.org/10.1029/2010JA015380).

Gold R.E., Krimigis S.M., Hawkins S.E., et al. Electron, proton and alpha monitor on the Advanced Composition Explorer spacecraft. *Space Sci. Rev.* 1998. Vol. 86. P. 541–562.

Heino E., Partamies N. Observational validation of cutoff models as boundaries of solar proton event impact area. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125. e2020JA027935. DOI: [10.1029/2020JA027935](https://doi.org/10.1029/2020JA027935).

Jayachandran P.T., Macdougall J.W., Langley R.B., et al. Canadian High Arctic Ionospheric Network (CHAIN). *Radio Sci.* 2009. Vol. 44. P. RS0A03. DOI: [10.1029/2008RS004046](https://doi.org/10.1029/2008RS004046).

Kallenrode M.-B. Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events. *J. Physics G: Nuclear Phys.* 2003. Vol. 29, no. 5. P. 965–981. DOI: [10.1088/0954-3899/29/5/316](https://doi.org/10.1088/0954-3899/29/5/316).

Kress B.T., Mertens C.J., Wiltberger M. Solar energetic particle cutoff variations during the 29–31 October 2003 geomagnetic storm. *Space Weather*. 2010. Vol. 8. P. 5. DOI: [10.1029/2009SW000488](https://doi.org/10.1029/2009SW000488).

Little C.G., Leinbach H. Some measurements of high-latitude ionospheric absorption using extraterrestrial radio waves. *Proc. IRE*. 1958. Vol. 46, no. 1. P. 334–348. DOI: [10.1109/JRPROC.1958.286795](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1958.286795).

Little C.G., Leinbach H. The Riometer. A device for the continuous measurement of ionospheric absorption. *Proc. IRE*. 1959. Vol. 47, no. 2. P. 315–320. DOI: [10.1109/JRPROC.1959.287299](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1959.287299).

Rodger C.J., Clilverd M.A., Verronen P.T., Ulich T. Dynamic geomagnetic rigidity cutoff variations during a solar proton event. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111, no. A4. P. A04222. DOI: [10.1029/2005JA011395](https://doi.org/10.1029/2005JA011395).

Smart D., Shea M. Fifty years of progress in geomagnetic cutoff rigidity determinations. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 44, no. 10. P. 1107–1123. DOI: [10.1016/j.asr.2009.07.005](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.07.005).

URL: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 23 июля 2024 г.).

URL: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 23 июля 2024 г.).

Статья подготовлена по материалам Девятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 5–9 февраля 2024 г., ИКИ РАН, Москва.

Как цитировать эту статью:

Дмитриев А.В., Долгачева С.А., Трошичев О.А., Пулинец М.С. Сравнение моделирования эффекта поглощения в полярной шапке с наблюдениями на сети станций ААНИИ. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 3. С. 116–128. DOI: [10.12737/szf-103202413](https://doi.org/10.12737/szf-103202413).