

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.028

ПЛАНЕТАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ВЫСЫПАНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ. ИНТЕРАКТИВНАЯ МОДЕЛЬ АРМ_ГЕО

В.Г. Воробьев¹, О.И. Ягодкина¹, М.Н. Мельник¹, О.В. Мингалев^{1,2}

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.)

²Мурманский арктический университет, филиал в г. Апатиты (Мурманская обл.)

Аннотация. Представлено описание новой версии эмпирической модели высыпаний электронов и протонов для северного полушария АРМ_ГЕО, в которой границы зон высыпаний, а также средние энергии и плотности потока энергии высыпающихся электронов и протонов рассчитываются как в исправленных геомагнитных координатах, так и в географических на сетке, регулярной по долготе и с фиксированным числом точек по широте в зонах высыпаний. Входными параметрами модели являются дата, время по UT и значения геомагнитных индексов Dst и AL. По сравнению с ранее опубликованными версиями модели, в которых в географических координатах рассчитывались только границы зон высыпаний, добавлено вычисление в этих зонах распределений средней энергии и плотности потока энергии высыпающихся электронов в географических координатах, а также добавлено вычисление распределений средней энергии и плотности потока энергии высыпающихся протонов как в исправленных геомагнитных координатах, так и в географических координатах. Кроме того, внутри области аврорального овала улучшено описание границ зоны ускоренных электронных высыпаний между дневным и ночным секторами. Модель реализована в виде комплекса программ на языке FORTRAN, в котором применяются параллельные вычисления и используется созданная Н.А. Цыганенко программа RECALC-08, а также используется перепрограммированная для применения параллельных вычислений программа модели IGRF.

1. Введение

Экспериментальные данные, полученные в области высоких широт на космических аппаратах и с помощью наземных наблюдений за авроральным свечением и вариациями геомагнитного поля, дают информацию о положении границ областей плазменных вторжений с различными морфологическими характеристиками. Эти данные отражают структуру, динамику и физические процессы в магнитосфере Земли до геоцентрических расстояний в десятки земных радиусов. Результатом статистической обработки наземных оптических наблюдений явилось появление концепции аврорального овала, предложенной в работах [Feldstein, 1963; Khorosheva, 1963]. Динамика границ овала в зависимости от уровня магнитной активности исследована в работе [Feldstein and Starkov, 1967].

Наземные наблюдения авроральных эмиссий свидетельствуют о том, что к экватору и к полюсу от овала сияний располагаются области аврорального диффузного свечения. Наиболее ярко выражено свечение к экватору от овала. Это свечение по сравнению с овалом отличается относительной однородностью, но границы его достаточно четкие. Математическая аппроксимация положения границ овала и экваториального диффузного свечения в зависимости от AL индекса магнитной активности предложена в [Starkov, 1994].

Регистрации потоков высыпающихся авроральных частиц со спутников с полярной орбитой позволяют провести статистический анализ их пространственного распределения. Планетарные модели электронных высыпаний, полученные по результатам спутниковых наблюдений, представлены в работах [McDiarmid et al., 1975; Spiro et al., 1982; Hardy et al., 1985]. В качестве уровня магнитной активности в этих моделях использовались 3-х часовые значения индекса Kp и/или часовые значения AE индекса. Время пролета спутника через зону высыпаний в любом секторе MLT составляет всего несколько минут. Характерное время развития элементарного возмущения (суббури) немногим более одного часа. Поэтому магнитная активность в период спутниковых измерений может значительно отличаться от уровней используемых индексов. В этой связи, несмотря на высокий уровень статистики и хорошее пространственное разрешение, такие модели дают достаточно грубую оценку планетарного распределения характеристик авроральных высыпаний.

Другим серьезным недостатком этих моделей является то, что усреднение спутниковых данных проводилось в фиксированных областях пространства, обычно 1°-3° по широте и 1-2 часа по MLT. Так как различные области высыпаний смещаются по широте при изменении уровня магнитной активности, в таких

фиксированных областях происходило суммирование различных типов высыпаний с неизвестной частотой их появления.

В работе [Sotirelis and Newell, 2000] представлена модель, в которой характеристики авроральных частиц упорядочены относительно положения границ высыпаний различных типов. В качестве меры магнитной активности были использованы пять интервалов широтного положения границы изотропизации ионов ($b2i$), широта которой определяет состояние магнитного хвоста магнитосферы [Sergeev and Gvozdevsky, 1995].

В работе [Newell et al., 2009] представлена модель, в которой все высыпания разделены на две категории: дискретные и диффузные (моноэнергетические и широкополосные спектры соответственно). Это позволило сделать количественное сравнение между высыпаниями различных типов, которое показывает, что диффузные высыпания составляют примерно $\frac{3}{4}$ энергетического бюджета всех авроральных высыпаний.

Модели [Sotirelis and Newell, 2000] и [Newell et al., 2009] основаны на данных спутников серии DMSP за более, чем 10-летний период наблюдений и построены в координатах геомагнитная широта (MLat) – местное геомагнитное время (MLT) с высоким пространственным и временным разрешением. Однако, адаптированные в качестве входных параметров к широтному уровню границы $b2i$ или к уровню параметров межпланетной среды такие модели очень трудно использовать для исследования характеристик высыпаний в периоды геомагнитных возмущений и для сопоставления с другими геофизическими явлениями, планетарное распределение которых определяется уровнем геомагнитной активности.

Модель авроральных высыпаний (APM, Auroral Precipitation Model), представленная в работе [Vorobjev et al., 2013], показывает планетарное распределение в различных областях электронных высыпаний и их средние характеристики в зависимости от уровня магнитной активности, выраженной величиной AL- и Dst-индексов. Модель размещена в Интернете на страницах ПГИ по адресу <http://apm.pgia.ru>.

Особенности планетарного распределения ионных (протонных) высыпаний при разных уровнях магнитной активности исследованы в [Vorobjev и др., 2015]. В этой работе было показано, что планетарная мощность ионных высыпаний при низком уровне магнитной активности ($|AL| = 100$ нТл) составляет $\sim 12\%$ от мощности высыпаний электронов и экспоненциально уменьшается до $\sim 4\%$ при $AL < -1000$ нТл.

В модели APM планетарные распределения характеристик авроральных высыпаний (средние энергии и потоки энергии) представлены в исправленных геомагнитных координатах (исправл. геом. широта + MLT), которые наиболее удобны для научных исследований по причине того, что именно в этой системе координат упорядочено большинство геофизических явлений. Однако для многих научных и практических целей, например, для диагностики и прогнозирования территориального распределения полярных сияний или определения возможного влияния авроральных высыпаний на технологические системы в отдельных регионах, более удобной является географическая система координат.

В этой связи целью настоящей работы является: (а) определить конфигурацию и динамику различных зон авроральных высыпаний и средние характеристики электронных вторжений, полученные в модели APM для различных уровней магнитной активности, в географической системе координат; (б) определить характеристики ионных (протонных) высыпаний в зависимости от уровня геомагнитной активности и (в) дополнить модель APM характеристиками протонных высыпаний для создания более полной планетарной картины авроральных вторжений в географической системе координат (модель APM_GEO).

2. Используемые данные и обозначения

Для исследования характеристик высыпаний использовалась база данных за 1986 г., созданная ранее по наблюдениям спутников DMSP F6 и F7 [Vorobjev и Ягодкина, 2005]. Для каждого пролета спутника в базе данных содержатся сведения о положении границ различных типов высыпаний, средние характеристики выпадающих электронов и ионов в этих областях, уровень геомагнитной активности, состояние межпланетной среды и фазы суббури. В базу данных включено более 35000 пересечений спутниками области авроральных высыпаний.

Спутники имели почти круговую полярную орбиту с высотой ~ 835 км и периодом обращения ~ 101 мин. Каждую секунду спутники регистрировали спектры выпадающих частиц в диапазоне энергий от 32 эВ до 30 кэВ в 19 каналах, распределенных в логарифмической последовательности. Орбиты спутников серии DMSP солнечно ориентированы: примерно в направлении полдень-полночь для F7 и утро-вечер для F6. Поэтому изначально не удастся построить планетарную картину распределения высыпаний в географической системе координат, так как траектории спутников не перекрывают все сектора местного времени. Однако это становится возможным в исправленных геомагнитных координатах. Ось геомагнитного диполя отклонена от оси вращения Земли на угол $\sim 11^\circ$, что при использовании круглогодичных наблюдений в обеих полушариях дает статистически обоснованные распределения характеристик высыпаний во всех секторах MLT. В дальнейшем модель высыпаний, полученная в исправленных геомагнитных координатах, в результате применения описанной ниже процедуры преобразования будет преобразована в географическую систему координат.

3. Модель электронных высыпаний АРМ

Для выделения областей электронных высыпаний с различными характеристиками использована обобщенная классификация, предложенная в работе [Старков и др., 2002]. По характеристикам авроральных частиц выделены три зоны высыпаний: диффузная авроральная зона (DAZ, diffuse auroral zone), высыпания аврорального овала (AOP, auroral oval precipitation) и мягкие диффузные высыпания (SDP, soft diffuse precipitation). Область AOP связана со структурированными высыпаниями, экваториальная граница которых статистически совпадает с экваториальной границей овала сияний. Высыпания DAZ располагаются экваториальнее овала сияний и пространственно совпадают с полосой диффузного аврорального свечения. Зона мягких диффузных высыпаний, SDP, окаймляет область AOP с её приполюсной стороны. В ночном секторе область высыпания AOP разделена на две зоны: экваториальную AOP-eq, содержащую ускоренные электронные высыпания, и приполюсную AOP-pol, состоящую из пространственно структурированных электронных высыпаний.

При обработке данных с целью увеличения статистической значимости результатов все пролеты были объединены в 3-х часовые интервалы MLT. Для создания модели высыпаний в качестве меры магнитной активности использованы Dst- и AL- индексы, которые дают достаточно полную информацию об интенсивности геофизических процессов, происходящих в магнитосфере и ионосфере Земли. Так как спутники пересекают область высыпаний в течение 3-5 мин, для анализа использовались 5 мин значения AL-индекса.

Ниже в качестве примера представлены уравнения регрессии, связывающие положение приполюсной и экваториальной границ AOP с уровнем магнитной активности в секторе 21-24 MLT (8-й сектор модели):

$$\left. \begin{aligned} \Theta_5(\psi[8], AL, Dst) = \Theta[AOPeq](\psi[8], AL, Dst) &= 66.66 - 0.0092|AL| + 7.78 \cdot 10^{-7} |AL|^2 + 0.022 Dst, \\ \Theta_3(\psi[8], AL, Dst) = \Theta[AOPpol](\psi[8], AL, Dst) &= 70.74 + 0.00186|AL| - 0.0008 Dst. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь Θ – исправленная геомагнитная широта; $\Theta_k(\psi, AL, Dst)$ – зависимости широт модельных кривых, по которым определяются границы зон высыпаний, $k = 1, \dots, 6$; ψ – время MLT в градусах; $\psi[s] = 22.5 \cdot (2s - 1)$ – центры секторов MLT в градусах при $s = 1, \dots, 8$.

Величина средней энергии (E_e , кэВ) и потока энергии (F_e , эрг·см⁻²·с⁻¹) высыпающихся электронов практически не зависит от уровня Dst-вариации и определяется, главным образом, величиной AL-индекса:

$$\left. \begin{aligned} AOPeq \rightarrow \ln(E_{e2}(\psi[8], AL)) &= 0.3454 \cdot \ln|AL| - 0.5340, \quad \ln(F_{e2}(\psi[8], AL)) = 0.6957 \cdot \ln|AL| - 2.5931; \\ AOPpol \rightarrow \ln(E_{e3}(\psi[8], AL)) &= 0.2861 \cdot \ln|AL| - 0.6453, \quad \ln(F_{e3}(\psi[8], AL)) = 0.4970 \cdot \ln|AL| - 0.8709. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

По этой схеме были исследованы характеристики электронных высыпаний во всех секторах и создана модель авроральных высыпаний (АРМ) в координатах исправленная геомагнитная широта (CGL) – местное геомагнитное время (MLT).

4. Ионные высыпания

Характеристики ионных высыпаний изучались внутри границ зон высыпаний различных типов, которые были представлены в предыдущем разделе. Для построения модели ионных высыпаний в каждом 3-х часовом интервале MLT исследовались средние энергии (E_i) и потоки энергии (F_i) высыпающихся ионов в областях DAZ, AOP и SDP в зависимости от уровня магнитной активности. Далее определялись уравнения регрессии, связывающие E_i и F_i с магнитной активностью, и по уже известному из модели АРМ положению границ различных типов высыпаний в зависимости от величины AL- и Dst-индексов строилась планетарная модель. Отметим, что для ионных высыпаний, как и для электронных, не было обнаружено зависимости средних энергий и потоков энергии высыпающихся частиц от величины Dst-индекса. Иными словами, во всех областях высыпаний и во всех секторах MLT характеристики высыпающихся частиц не зависят от интенсивности магнитных бурь. Величина Dst-индекса оказывает существенное влияние на положение границ различных областей высыпаний, на площадь, занятую высыпаниями, и, как следствие, на общую мощность высыпаний, но не на характеристики высыпающихся частиц.

В качестве примера ниже показаны уравнения регрессии, связывающие средние энергии (E_i) и потоки энергии (F_i) высыпающихся ионов в экваториальной и приполюсной зонах AOP с уровнем магнитной активности в секторе 21-24 MLT:

$$\left. \begin{aligned} AOPeq \rightarrow E_{i2}(\psi[8], AL) &= 4 \cdot 10^{-4} AL + 13.26, \quad F_{i2}(\psi[8], AL) = -9.33 \cdot 10^{-5} AL + 0.41; \\ AOPpol \rightarrow E_{i3}(\psi[8], AL) &= -2 \cdot 10^{-4} AL + 10.54, \quad F_{i3}(\psi[8], AL) = -1.3 \cdot 10^{-6} AL + 0.13. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Аналогичные исследования, проведенные во всех остальных секторах MLT, дают полную планетарную картину распределения характеристик ионных высыпаний в исправленных геомагнитных координатах.

5. Схема модели APM_GEO

Рассмотрим краткое описание логической схемы модели APM_GEO. С помощью программы Н.А. Цыганенко RECALC-08 рассчитываются географические координаты базисных векторов системы GSE $\{e_x^{[GSE]}, e_y^{[GSE]}, e_z^{[GSE]}\}$ (где $e_x^{[GSE]}$ направлен на Солнце), а также географические координаты единичного вектора $\mu = e_z^{[cd]}$, направленного на север противоположно вектору дипольного момента M_{IGRF} по модели IGRF и являющегося 3-м базисным вектором центрированной дипольной геомагнитной системы координат: $\mu = e_z^{[cd]} = -M_{IGRF}/|M_{IGRF}|$. По этим векторам вычисляются географические координаты базисных векторов центрированной дипольной геомагнитной системы координат, в которой долготой является местное магнитное время MLT:

$$e_x^{[MLT]} = \left(e_z^{[cd]} \left(e_z^{[cd]} \cdot e_x^{[GSE]} \right) - e_x^{[GSE]} \right) / \left| e_z^{[cd]} \left(e_z^{[cd]} \cdot e_x^{[GSE]} \right) - e_x^{[GSE]} \right|, \quad e_y^{[MLT]} = \left[e_x^{[GSE]} \times e_z^{[cd]} \right] / \left[e_x^{[GSE]} \times e_z^{[cd]} \right]. \quad (4)$$

Входную информацию модели удобно разделить на 2 блока. Первым блоком являются исправленные геомагнитные широты определяющих границы зон высыпаний 6-ти модельных кривых в 8-ми центрах $\psi[s] = 22.5 \cdot (2s-1)$ секторов MLT $\Theta_k(\psi[s], AL, Dst)$, (где $k=1, \dots, 6$ и $s=1, \dots, 8$), которые рассматриваются как функции индексов Dst и AL (то есть всего 48 функций двух переменных). Вторым блоком входной информации являются значения в указанных 8 центрах $\psi[s]$ секторов MLT для каждой из 3-х зон высыпаний в 4-х дневных секторах MLT и для каждой из 4-х зон высыпаний в 4-х ночных секторах MLT значений средней энергии $E_{\alpha k}(\psi[s], AL)$ и потока энергии $F_{\alpha k}(\psi[s], AL)$ высыпающихся электронов и ионов, которые рассматриваются как функции индекса AL. Здесь $\alpha = e, i$, $s=1, \dots, 8$, а $k=1, 3, 4$ в дневных секторах и $k=1, 2, 3, 4$ в ночных секторах, то есть всего 112 функций одной переменной.

В модели задается мелкая регулярная сетка по MLT $\psi_l = \Delta\psi \cdot l$, $l=0, \dots, N_{MLT}$ с шагом $\Delta\psi = 360/N_{MLT}$. В узлах этой сетки с помощью периодической интерполяции полиномом Лагранжа по исходным значениям $\Theta_k(\psi[s], AL, Dst)$ вычисляются значения на регулярной сетке по долготе MLT исправленных геомагнитных широт $\Theta_k(\psi_l, AL, Dst)$ для модельных кривых, по которым определяются границы зон высыпаний следующим образом. Для зоны DAZ кривая $\Theta_1(\psi_l, AL, Dst) = \Theta[DAZeq](\psi_l, AL, Dst)$ является экваториальной границей, а кривая $\min(\Theta_2(\psi_l, AL, Dst), \Theta_3(\psi_l, AL, Dst)) = \Theta[DAZpol](\psi_l, AL, Dst)$ является полярной границей. Для зоны AOP кривая $\Theta_3(\psi_l, AL, Dst) = \Theta[AOPeq](\psi_l, AL, Dst)$ является экваториальной границей, а полярной границей является кривая

$$\Theta_5(\psi_l, AL, Dst) = \Theta[AOPpol](\psi_l, AL, Dst) = \Theta[SDPeq](\psi_l, AL, Dst),$$

которая также является экваториальной границей зоны SDP. При этом кривая $\max(\Theta_3(\psi_l, AL, Dst), \Theta_4(\psi_l, AL, Dst)) = \Theta[AOP-pol-eq](\psi_l, AL, Dst)$ в ночном секторе и его окрестности является экваториальной границей приполюсной зоны AOP-pol пространственно структурированных электронных высыпаний. Для зоны SDP кривая $\Theta_6(\psi_l, AL, Dst) = \Theta[SDPpol](\psi_l, AL, Dst)$ является полярной границей. При малой величине индекса AL зона SDP образует полосу, примыкающую к полярной границе зоны AOP, то есть выполнено условие $\Theta_5(\psi_l, AL, Dst) < \Theta_6(\psi_l, AL, Dst)$. С ростом $|AL|$ начинает выполняться противоположное условие $\Theta_5(\psi_l, AL, Dst) \geq \Theta_6(\psi_l, AL, Dst)$, то есть зона SDP перемещается в зону AOP.

По найденным широтам с помощью формулы

$$R_L[k, l](AL, Dst) = (R_E + H_{ion}) / \cos^2 \Theta_k(\psi_l, AL, Dst) \quad (5)$$

(где $R_E = 6371.2$ км — радиус Земли в модели IGRF и $H_{ion} = 110$ км — высота E-слоя ионосферы в модели APM_GEO) рассчитывается радиус L -оболочки магнитной силовой линии (то есть радиус точки пересечения магнитной силовой линии с экваториальной плоскостью геомагнитного диполя по модели IGRF). По этому радиусу и углу ψ_l (времени MLT в градусах) рассчитываются географические координаты начальной точки в экваториальной плоскости геомагнитного диполя по модели IGRF:

$$r_0[k, l](AL, Dst) = R_L[k, l](AL, Dst) \cdot \left(e_x^{[MLT]} \cos \psi_l + e_y^{[MLT]} \sin \psi_l \right).$$

Из этой точки выпускается магнитная силовая линия по модели IGRF и находится точка $r_{ion}[k,l](AL, Dst)$ ее пересечения с E-слоем ионосферы северного полушария:

$$r_{ion}[k,l] = (R_E + H_{ion}) \left(e_x^{[geo]} \cos(\theta_{ion}[k,l]) \cos(\phi_{ion}[k,l]) + e_y^{[geo]} \cos(\theta_{ion}[k,l]) \sin(\phi_{ion}[k,l]) + e_z^{[geo]} \sin(\theta_{ion}[k,l]) \right),$$

где $\{e_x^{[geo]}, e_y^{[geo]}, e_z^{[geo]}\}$ – базисные векторы географической системы координат, $\theta_{ion}[k,l]$ и $\phi_{ion}[k,l]$ – географические широта и долгота точки $r_{ion}[k,l](AL, Dst)$, которые являются функциями индексов (AL, Dst) . В результате получаются наборы координат на сфере, который определяет 6 модельных кривых в географических координатах $\theta_k(\phi, AL, Dst)$ ($k=1, \dots, 6$) на нерегулярной сетке по долготе $\{\phi_{ion}[k,l], l=0, \dots, N_{MLT}\}$:

$$\theta_k(\phi_{ion}[k,l], AL, Dst) = \theta_{ion}[k,l](AL, Dst). \quad (6)$$

С помощью периодической интерполяции полиномом Лагранжа все 6 кривых можно пересчитать на одинаковую для всех регулярную сетку по долготе $\phi_q = \Delta\phi \cdot q$, $q=0, \dots, N_{geo}$ с шагом $\Delta\phi = 360/N_{geo}$ и получить наборы широт $\theta_k(\phi_q, AL, Dst)$, которые позволяют определить зоны высыпаний в географических координатах. Затем строится сетка в зоне DAZ и сетка в зоне AOP+SDP следующим образом. Задается максимальная мелкость сетки по широте $\Delta\theta$ (например, $\Delta\theta = 0.25^\circ$). В обеих зонах число узлов сетки по широте постоянно по долготе и определяется формулами (где квадратные скобки означают целую часть числа)

$$n_\theta[DAZ] = \left\lceil \frac{1}{\Delta\theta} \max_q \left(\min(\theta_2(\phi_q, AL, Dst), \theta_3(\phi_q, AL, Dst)) - \theta_1(\phi_q, AL, Dst) \right) \right\rceil + 1, \quad (7)$$

$$n_\theta[AOP+SDP] = \left\lceil \frac{1}{\Delta\theta} \max_q \left(\max(\theta_5(\phi_q, AL, Dst), \theta_6(\phi_q, AL, Dst)) - \theta_3(\phi_q, AL, Dst) \right) \right\rceil + 1. \quad (8)$$

Далее для каждого узла сетки по долготе ϕ_q узлы сетки по широте в зоне DAZ и в зоне AOP+SDP определяется формулами

$$\Delta_q\theta[DAZ] = \min(\theta_2(\phi_q, AL, Dst), \theta_3(\phi_q, AL, Dst)) - \theta_1(\phi_q, AL, Dst) / n_\theta[DAZ], \left. \begin{aligned} \theta_{q,s}^{DAZ} &= \theta_1(\phi_q, AL, Dst) + s \cdot \Delta_q\theta[DAZ], \quad s=0, \dots, n_\theta[DAZ], \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\Delta_q\theta[AOP+SDP] = \max(\theta_5(\phi_q, AL, Dst), \theta_6(\phi_q, AL, Dst)) - \theta_3(\phi_q, AL, Dst) / n_\theta[AOP+SDP], \left. \begin{aligned} \theta_{q,s}^{AOP} &= \theta_3(\phi_q, AL, Dst) + s \cdot \Delta_q\theta[AOP+SDP], \quad s=0, \dots, n_\theta[AOP+SDP]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Для каждого узла сетки по углам $(\phi_q, \theta_{q,s}^{DAZ})$ из точки в E-слое ионосферы северного полушария

$$r_{q,s}^{DAZ} = (R_E + H_{ion}) \cdot \left(e_x^{[geo]} \cos\theta_{q,s}^{DAZ} \cos\phi_q + e_y^{[geo]} \cos\theta_{q,s}^{DAZ} \sin\phi_q + e_z^{[geo]} \sin\theta_{q,s}^{DAZ} \right)$$

выпускается магнитная силовая линия по модели IGRF и находятся географические координаты точки $R_L(r_{q,s}^{DAZ})$ ее пересечения с экваториальной плоскостью геомагнитного диполя по модели IGRF, что позволяет найти исправленные геомагнитные координаты $(\Theta_{q,s}^{DAZ}, \psi_{q,s}^{DAZ})$ исходной точки $r_{q,s}^{DAZ}$, которые определяются следующей формулой:

$$R_L(r_{q,s}^{DAZ}) = \frac{(R_E + H_{ion})}{\cos^2\Theta_{q,s}^{DAZ}} \left(e_x^{[MLT]} \cos\psi_{q,s}^{DAZ} + e_y^{[MLT]} \sin\psi_{q,s}^{DAZ} \right).$$

По найденной из этой формулы исправленной геомагнитной долготе $\psi_{q,s}^{DAZ}$ с помощью периодической интерполяции полиномом Лагранжа по исходным значениям средней энергии $E_{\alpha 1}(\psi[s], AL)$ и потока энергии $F_{\alpha 1}(\psi[s], AL)$ высыпавшихся электронов ($\alpha = e$) и протонов ($\alpha = p$) можно найти их значения $E_{\alpha}^{DAZ}(\Theta_{q,s}^{DAZ}, \psi_{q,s}^{DAZ}, AL)$ и $F_{\alpha}^{DAZ}(\Theta_{q,s}^{DAZ}, \psi_{q,s}^{DAZ}, AL)$ в точке с географическими координатами $(\Theta_{q,s}^{DAZ}, \psi_{q,s}^{DAZ})$.

Аналогичным образом находятся значения средней энергии $E_{\alpha}^{\text{AOPeq}}(\Theta_{q,s}^{\text{AOP}}, \psi_{q,s}^{\text{AOP}}, \text{AL})$ и потока энергии $F_{\alpha}^{\text{AOPeq}}(\Theta_{q,s}^{\text{AOP}}, \psi_{q,s}^{\text{AOP}}, \text{AL})$ в зоне ускоренных электронных высыпаний AOP-eq (экваториальная часть зоны AOP в ночном секторе) с помощью аналогичной интерполяции по исходным значениям средней энергии $E_{\alpha 2}(\psi[s], \text{AL})$ и потока энергии $F_{\alpha 2}(\psi[s], \text{AL})$. Также находятся значения средней энергии $E_{\alpha}^{\text{AOPpol}}(\Theta_{q,s}^{\text{AOP}}, \psi_{q,s}^{\text{AOP}}, \text{AL})$ и потока энергии $F_{\alpha}^{\text{AOPpol}}(\Theta_{q,s}^{\text{AOP}}, \psi_{q,s}^{\text{AOP}}, \text{AL})$ в зоне пространственно структурированных электронных высыпаний AOP-pol (приполюсная часть зоны AOP в ночном секторе) с помощью аналогичной интерполяции по исходным значениям средней энергии $E_{\alpha 3}(\psi[s], \text{AL})$ и потока энергии $F_{\alpha 3}(\psi[s], \text{AL})$. Таким же образом находятся значения средней энергии $E_{\alpha}^{\text{SDP}}(\Theta_{q,s}^{\text{AOP}}, \psi_{q,s}^{\text{AOP}}, \text{AL})$ и потока энергии $F_{\alpha}^{\text{SDP}}(\Theta_{q,s}^{\text{AOP}}, \psi_{q,s}^{\text{AOP}}, \text{AL})$ в зоне SDP с помощью аналогичной интерполяции по исходным значениям средней энергии $E_{\alpha 4}(\psi[s], \text{AL})$ и потока энергии $F_{\alpha 4}(\psi[s], \text{AL})$.

Таким образом, в модели APM_GEO основной объем вычислений занимает расчет большого числа магнитных силовых линий по модели IGRF между ионосферой и экваториальной плоскостью геомагнитного диполя. В комплексе программ модели на языке FORTRAN для максимально быстрого выполнения этих вычислений используется распараллеливание с помощью системы Open MP.

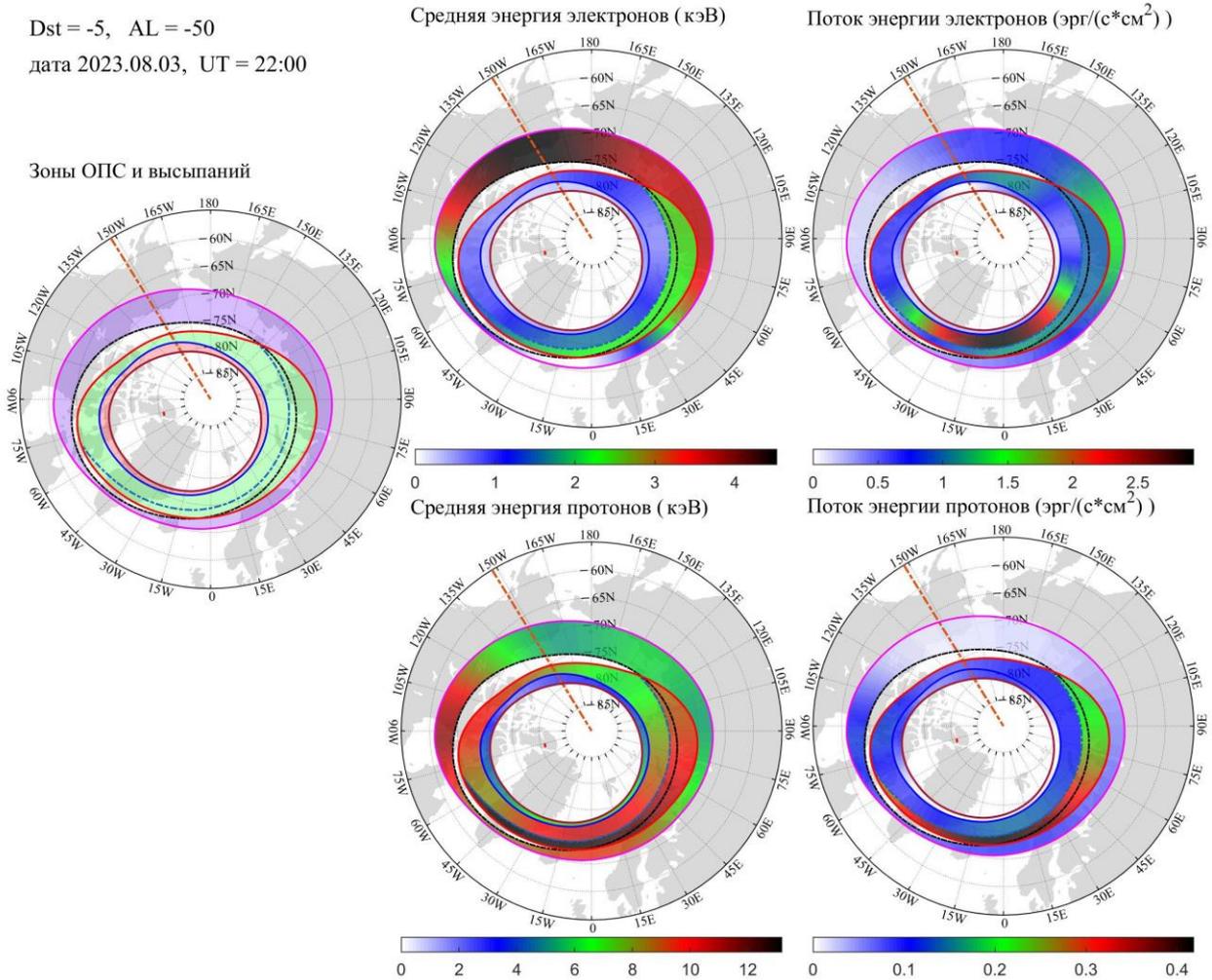


Рисунок 1. Параметры зон высыпаний в спокойных условиях перед началом магнитной бури.

6. Характеристики высыпаний при разном уровне геомагнитной активности

На рис. 1-4 показаны результаты применения модели для входных параметров, которые имели место во время магнитной бури 04 – 05 августа 2023 г. с двумя минимумами в $Dst \approx -52$ нТл и $Dst \approx -92$ нТл, между которыми было сильное внезапное сжатие магнитосферы при отрицательной компоненте B_z ММП. Во время бури индексы Dst и AL достигали своих минимальных значений в разные моменты времени. Рис. 1 соответствует спокойным условиям перед бурей при значениях индексов $Dst \approx -5$ нТл и $AL \approx -50$ нТл в момент времени UT = 22:00, 03 августа 2023 г. На рис. 2 показан момент времени UT = 03:00, 05 августа 2023 г., когда было достигнуто минимальное значение индекса $AL = -1400$ нТл при значении $Dst \approx -35$ нТл между минимумами Dst . На рис. 3 показан момент времени UT = 06:00, 05 августа 2023 г., когда было достигнуто минимальное значение индекса $Dst \approx -92$ нТл при значении $AL \approx -875$ нТл. На рис. 4 показан момент времени UT = 08:00, 05 августа 2023 г. в начале фазы восстановления, когда в дневном секторе риометром в обсерватории Ловозеро было зафиксировано высыпание. В этот момент, когда не было магнитосферной суббури и индекс $AL \approx -100$ нТл был небольшим, а индекс $Dst \approx -60$ нТл имел достаточно большое значение, риометром в обсерватории Ловозеро было зафиксировано высыпание.

На всех приведенных в статье рисунках приняты следующие обозначения. Красная штрихпунктирная линия на панелях указывает направление на Солнце. Внутри каждой панели красной точкой обозначено положение полюса геомагнитного диполя по эмпирической модели геомагнитного поля IGRF.

Крайняя левая панель в каждом рисунке иллюстрирует положение границ зон авроральных высыпаний. Зона высыпаний аврорального овала (АОР) обозначена зеленым цветом. Полярная граница АОР – сплошная синяя линия, экваториальная граница – сплошная красная линия. Синяя штрихпунктирная линия в ночном секторе разделяет АОР на две зоны: зону пространственно-структурированных высыпаний и зону ускоренных электронных высыпаний. В этих зонах средняя энергия и плотность потока энергии высыпающихся частиц как электронов, так и протонов заметно отличаются.

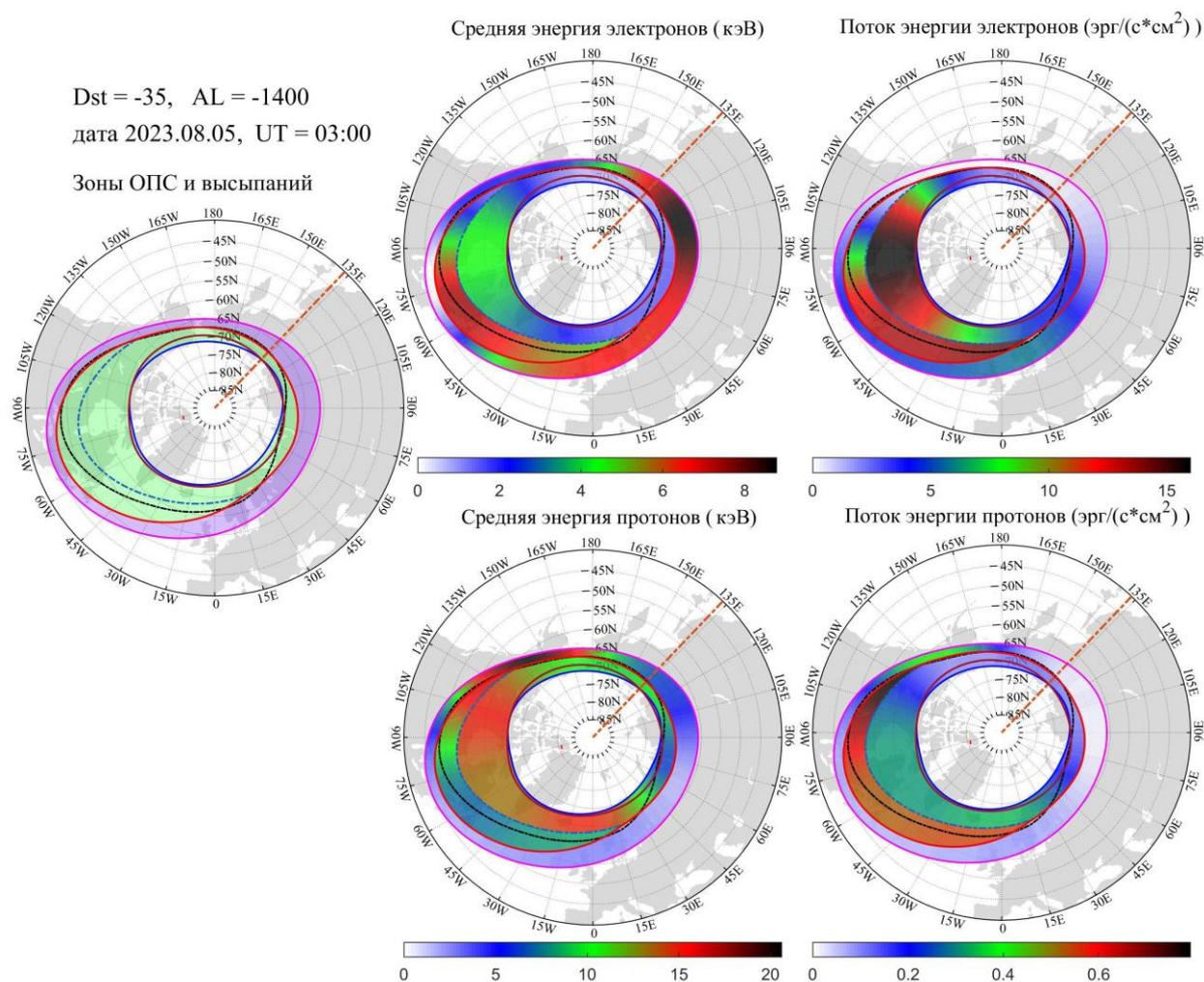


Рисунок 2. Параметры зон высыпаний во время сильной суббури на фоне магнитной бури в момент минимума AL при умеренном Dst .

Зона диффузных авроральных высыпаний (DAZ), расположенная экваториальнее AOP, показана фиолетовым цветом, а ее экваториальная граница обозначена сплошной фиолетовой линией. Приполюсная граница DAZ показана черной штрихпунктирной линией.

Зона мягких диффузных высыпаний (SDP), расположенная полярнее AOP, выделена красно-коричневым цветом. Экваториальной границей SDP является полярная граница AOP (сплошная синяя линия). Коричневая штрихпунктирная линия указывает на положение полюсной границы SDP.

При малых и умеренных по модулю значениях индекса AL зона мягких диффузных высыпаний (SDP) окаймляет весь авроральный овал (AOP), а также в дневном и предполуночном секторах между зоной аврорального овала и диффузной авроральной зоной имеется разрыв, как это видно на рис. 1 и 4. С ростом (по модулю) значений индекса AL зона SDP сначала частично, а затем и полностью уходит в зону аврорального овала (AOP), а разрыв между зонами AOP и DAZ сначала уменьшается, а затем исчезает, как это видно на рис. 2 и 3.

На всех рисунках верхние панели демонстрируют планетарные распределения в северном полушарии средних энергий и потоков энергии электронов, а нижние – протонов.

При малых и умеренных по модулю значениях индекса AL зона мягких диффузных высыпаний (SDP) окаймляет весь авроральный овал (AOP), а также в дневном и предполуночном секторах между зоной аврорального овала и диффузной авроральной зоной имеется разрыв, как это видно на рис. 1 и 4. С ростом (по модулю) значений индекса AL зона SDP сначала частично, а затем и полностью уходит в зону аврорального овала (AOP), а разрыв между зонами AOP и DAZ сначала уменьшается, а затем исчезает, как это видно на рис. 2 и 3.

На всех рисунках на панелях верхней строки показаны распределение средней энергии высыпающихся электронов и распределение потока их энергии, а на панелях нижней строки показаны аналогичные распределения для высыпающихся протонов.

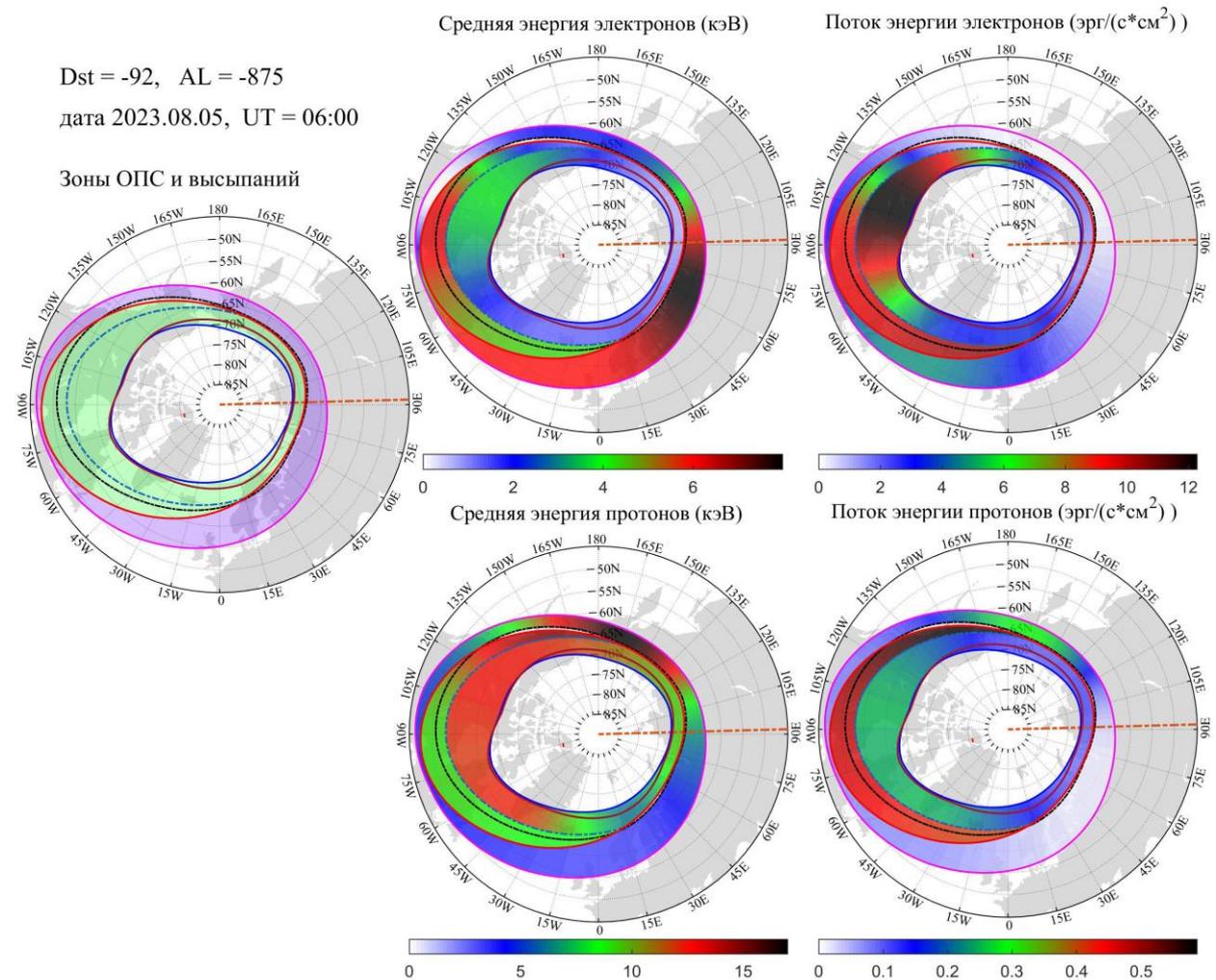


Рисунок 3. Параметры зон высыпаний во время сильной суббури на фоне магнитной бури в момент минимума Dst при большом AL.

7. Заключение

В работе представлено описание новой версии эмпирической модели высыпаний электронов и протонов для северного полушария APM_GEO, в которой границы зон высыпаний, а также средние энергии и плотности потока энергии высыпавшихся электронов и протонов рассчитываются как в исправленных геомагнитных координатах, так и в географических на сетке, регулярной по долготе и с фиксированным числом точек по широте в зонах высыпаний. Входными параметрами модели являются дата, время по UT и значения геомагнитных индексов Dst и AL. По сравнению с ранее опубликованными версиями модели, в которых в географических координатах рассчитывались только границы зон высыпаний, добавлено вычисление в этих зонах распределений средней энергии и плотности потока энергии высыпавшихся электронов в географических координатах, а также добавлено вычисление распределений средней энергии и плотности потока энергии высыпавшихся протонов как в исправленных геомагнитных координатах, так и в географических координатах. Кроме того, внутри области аврорального овала улучшено описание границ зоны ускоренных электронных высыпаний между дневным и ночным секторами. Модель реализована в виде комплекса программ на языке FORTRAN, в котором применяются параллельные вычисления и используется программа RECALC-08 (созданная Н.А. Цыганенко) и перепрограммированная для применения параллельных вычислений программа модели IGRF).

Данные спутника DMSP F6 и F7 взяты на страницах <http://sd-www.jhuapl.edu>, индексы магнитной активности взяты - на страницах <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> и <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>.

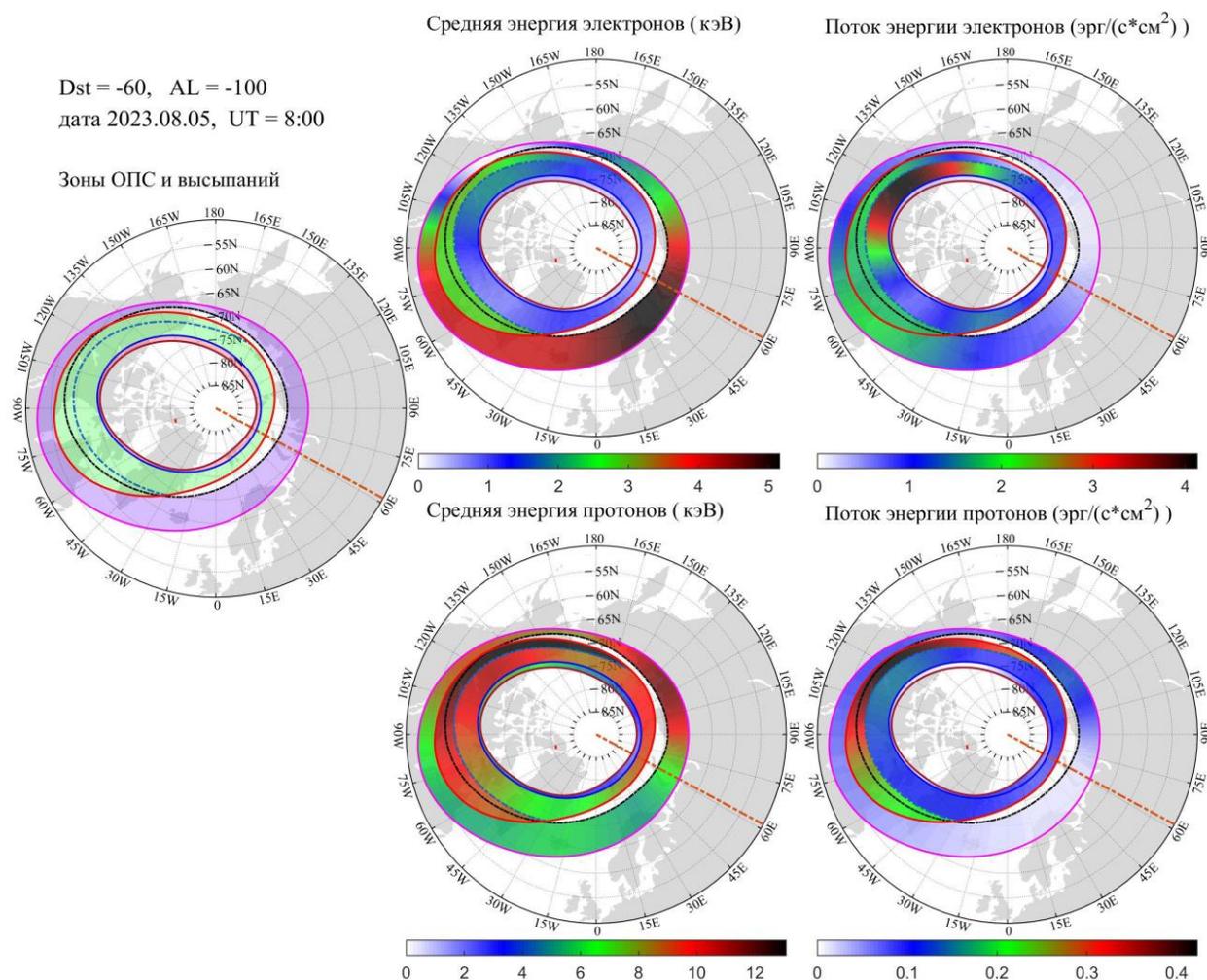


Рисунок 4. Параметры зон высыпаний в начале фазы восстановления сильной магнитной бури в отсутствии суббури при большом Dst и малом AL, когда в дневном секторе риометром в обсерватории Ловозеро было зафиксировано высыпание.

Литература

- *Feldstein Ya.I.* Certain problems of aurora and geomagnetism // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 3. No. 2. P. 227-239. 1963.
- *Khorosheva O.V.* Extension and spatial orientation of auroral arcs // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 3. No. 2. P. 363-366. 1963.
- *Feldstein Ya.I., Starkov G.V.* Dynamics of auroral belt and polar geomagnetic disturbances // *Planet. Space Sci.* V. 15. P. 209-229. 1967.
- *Starkov G.V.* The mathematical description of auroral luminosity boundaries // *Geomagnetism and Aeronomy*. V. 34. P. 363-366. 1994.
- *McDiarmid I.B., Burrows J.R., Budsinski E.E.* Average characteristics of magnetospheric electrons (159 eV to 200 keV) at 1400 km // *J. Geophys. Res.* V. 80. P. 73-79. 1975.
- *Spiro R.W., Reiff P.H., Mahler L.J.* Precipitating electron energy flux and auroral zone conductances – an empirical model // *J. Geophys. Res.* V. 87. P. 8215-8227. 1982.
- *Hardy D.A., Gussenhoven M.S., Brautingam D.* A statistical model of auroral electron precipitation // *J. Geophys. Res.* V. 90. P. 4229-4248. 1985.
- *Sotirelis T., Newell P.T.* Boundary oriented electron precipitation model // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 18655-18673. 2000.
- *Sergeev V.A., Gvozdevsky B.B.* MT-index- a possible new index to characterize the magnetic configuration of magnetotail // *Ann. Geophys.* V. 13. P. 1093-1103. 1995.
- *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Yu.V.* Auroral Precipitation Model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // *J. Atm. S.-Terr. Phys.* V. 102. Issue (September). P. 157 – 171. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007>
- *Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е.* Особенности планетарного распределения ионных высыпаний при разных уровнях магнитной активности // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 55. № 5. С. 611-622. 2015.
- *Воробьев В.Г., Ягодкина О.И.* Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 45. № 4. С. 467-473. 2005.
- *Старков Г.В., Реженов Б.В., Воробьев В.Г., Фельдштейн Я.И., Громова Л.И.* Структура авроральных вторжений в дневном секторе // *Геомагнетизм и аэрномия*. Т. 42. № 2. С. 186-194. 2002.