

УДК 550.388.2

ВАРИАЦИИ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

© 2021 г. А. Е. Степанов^{1, *}, А. Ю. Гололобов^{2, **}, В. Л. Халипов³, И. А. Голиков¹

¹Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН (ИКФИА СО РАН), г. Якутск, Россия

²Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова (СВФУ), г. Якутск, Россия

³Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

*e-mail: a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru

**e-mail: golart87@gmail.com

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

После доработки 03.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

Сопоставлены результаты расчетов и экспериментальные данные по формированию и развитию поляризационного джета на субавроральных широтах. Показано, что чередование вертикальных и горизонтальных компонент скорости дрейфа ионосферной плазмы приводит к разным вариациям основных параметров слоя $F2$. Обнаружено, что в некоторых случаях перед формированием поляризационного джета наблюдается повышение критической частоты слоя $F2$. Возможным объяснением такого поведения слоя $F2$ является уменьшение скорости рекомбинации заряженных частиц из-за повышения высоты максимума слоя, приводящее к их накоплению на этих высотах. Рост критической частоты слоя $F2$ может являться дополнительным признаком развития поляризационного джета над станцией наблюдения.

DOI: 10.31857/S0016794021010156

1. ВВЕДЕНИЕ

Поляризационные джеты (ПД), или быстрые западные дрейфы ионосферной плазмы, на субавроральных широтах известны давно и активно изучались наземными и спутниковыми методами многими исследователями (см., например, [Гальперин и др., 1990; He et al., 2014; Степанов и др., 2017] и ссылки в них). В работе [Степанов и др., 2019б] по наземным ионозондовым измерениям скоростей дрейфа ионосферной плазмы было показано, что при развитии поляризационного джета над станцией наблюдения значения пиков вертикальных скоростей дрейфа относительно горизонтальных пиков могут не совпадать по времени и направлению, создавая различные ситуации их взаиморасположения. Было отмечено, что события ПД подразделены на 4 ситуации: 1) когда пики компонент скорости дрейфа совпадают по времени; 2) когда пик вертикальной компоненты скорости наблюдается до пика горизонтальной скорости; 3) когда пик вертикальной компоненты скорости наблюдается после пика горизонтальной скорости и 4) когда наблюдаются два пика вертикальных компонент скорости, до и после пика горизонтальной компоненты.

Целью данной работы является рассмотрение ионосферных параметров слоя $F2$ при развитии полосы поляризационного джета по наземным измерениям и проведение численных расчетов на модели высокоширотной ионосферы при различных ситуациях в чередовании компонент скоростей дрейфов ионосферной плазмы.

2. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Сначала рассмотрим влияние вертикальных и горизонтальных компонент скорости дрейфа поляризационного джета на распределение концентрации электронов в максимуме $F2$ -слоя и его высоты на субавроральных широтах. Для расчетов используется математическая модель высокоширотной ионосферы в переменных Эйлера, которая учитывает расхождение между географическим и геомагнитным полюсами [Гололобов и др., 2014; Голиков и др., 2016].

Расчеты проведены для условий весеннего равноденствия и при средней солнечной и умеренной геомагнитной активности, $F10.7 = 150 \times 10^{-22}$ Вт/м² Гц и $Kp \leq 3$ соответственно. Поляри-

зационный джет задавался как направленное к северу электрическое поле с напряженностью $E = 50$ мВ/м в интервале местного времени от 12 до 24 ч. Такое поле на высотах максимума ионосферной соответствует направленной на запад горизонтальной компоненте скорости, равной $V_{гор} = 1000$ м/с. Вертикальная компонента скорости дрейфа ($V_{вер}$) в полосе ПД составляла 100 м/с. Ширина полосы ПД принята равной 4° сразу за экваториальной границей области магнитосферной конвекции. Электрические поля (или компоненты скоростей дрейфа) включаются в примерном соответствии с экспериментальными результатами, приведенными в публикации [Степанов и др., 2019б].

Отметим, что в тексте статьи обозначения ионосферных параметров $N_e F2$ и $h_m F2$ относятся к численным расчетам, а $foF2$, $h'F2$ и $h_{max}F2$ — к экспериментальным измерениям.

Рисунок 1 иллюстрирует начальные и конечные результаты численных расчетов для интервала 16:00–20:00 ч местного времени. Четыре верхние панели ($a, b, в, z$) показывают задаваемые для расчетов начальные значения и интервал времени для горизонтальных ($V_{гор}$) и вертикальных ($V_{вер}$) компонент скорости дрейфа ионосферной плазмы. Значения компонент скоростей дрейфа $V_{вер}$ и $V_{гор}$ для всех четырех случаев одинаковы и составляют 100 и 1000 м/с (оси ординат для них, соответственно, расположены слева и справа от графиков). По оси абсцисс отложено время включения и выключения скоростей: a — одновременное включение/выключение обеих компонент скоростей; b — включение $V_{вер}$ на 1.5 ч раньше, чем включение $V_{гор}$; $в$ — включение $V_{вер}$ на 1.5 ч позже, чем включение $V_{гор}$; и z — двухпиковое включение $V_{вер}$, до и после максимумов $V_{гор}$ (см. Степанов и др. [2019а]).

Нижние панели ($a', b', в', z'$) представляют, соответственно, расчетные вариации суточных параметров $F2$ -слоя после вычислений на модели высокоширотной ионосферы; толстые кривые означают вариации плотности электронов слоя $F2$, а тонкие — вариации высоты максимума слоя. Здесь, для удобства сопоставлений с наземными измерениями, плотность электронов $N_e F2$ пересчитана в критические частоты $foF2$ по формуле $N_e = 1.24 \times 10^4 (f_{раб})^2 \text{ см}^{-3}$, где $f_{раб}$ дано в МГц [Руководство ..., 1977]. Вертикальными штриховыми линиями здесь отмечены интервалы включения и выключения электрических полей, продолжительность которых от 3 до 4.5 ч. Толстые штриховые кривые соответствуют условиям, когда не включены электрические поля, т.е. модель описывает спокойные условия в ионосфере. Отметим, что пики горизонтальных компонент скоростей при методе наложения эпох в работе [Степанов и др., 2019б] принимались за начало отсчета

времени в ту или другую сторону (сплошные вертикальные линии).

Из пары ($a-a'$) видим, что задаваемые горизонтальная и вертикальная компоненты скорости дрейфа плазмы достигают максимума своих значений одновременно (a); продолжительность включения обеих компонент — 3 ч; и в этих условиях электронная плотность слоя начинает резко падать (через 15–30 мин после включения полей) с резким ростом высоты $F2$ -слоя до 360 км (начальная высота слоя 300 км).

Пара ($b-b'$) иллюстрирует случай, когда максимум вертикальной компоненты скорости опережает максимум горизонтальной скорости на 1.5 ч (b). Продолжительность включения полей — 4 ч. Из панели (b') видно, что в первой половине интервала включения электрических полей плотность $N_e F2$ и высота максимума слоя $h_m F2$ начинают одновременно резко подниматься, вызывая заметный рост плотности и высоты слоя $F2$. Это связано с тем, что с подъемом всего слоя $F2$ скорости рекомбинации ионов на высотах максимума понижаются, т. к. уменьшаются плотности O^+ и N_2 , что ведет, в свою очередь, к увеличению электронной концентрации. Затем $N_e F2$ начинает резко падать с включением $V_{гор}$, что связано с выносом электронной концентрации с ночной на дневную сторону.

Пара ($в-в'$) показывает случай, когда максимум вертикальной компоненты скорости отстает от максимума горизонтальной на 1.5 ч ($в$). Продолжительность включения полей 4.75 ч. Из панели вычислений ($в'$) видно, что почти сразу после включения горизонтальной компоненты скорости плотность слоя $N_e F2$ начинает резко падать, а высота максимума слоя $N_e F2$ — резко подниматься. Здесь мы не видим повышения $N_e F2$, а высота слоя поднялась до 410 км (прирост 110 км).

Пара ($z-z'$) демонстрирует случай, когда вертикальная компонента скорости имеет два максимума, один из которых опережает максимум горизонтальной компоненты на 1 ч, другой отстает от него на 1 ч (z). Продолжительность включения полей — 4 ч. Из панели вычислений (z') видно, что в начале включения полей плотность $N_e F2$ растет, а затем резко падает. Видно, что в этом случае рост плотности не так заметен как в случае ($b-b'$). Вариации высоты максимума слоя $h_m F2$ имеют 2 горба, совпадающие с вариациями задаваемых вертикальных скоростей.

Теперь перейдем к наземным экспериментальным данным. Для анализа был выбран месяц март 1989 г. В этом месяце по данным ионосферной ст. Якутск было зарегистрировано 9 событий (дней) с поляризационным джетом. На f -графиках зарегистрированы резкие падения критиче-

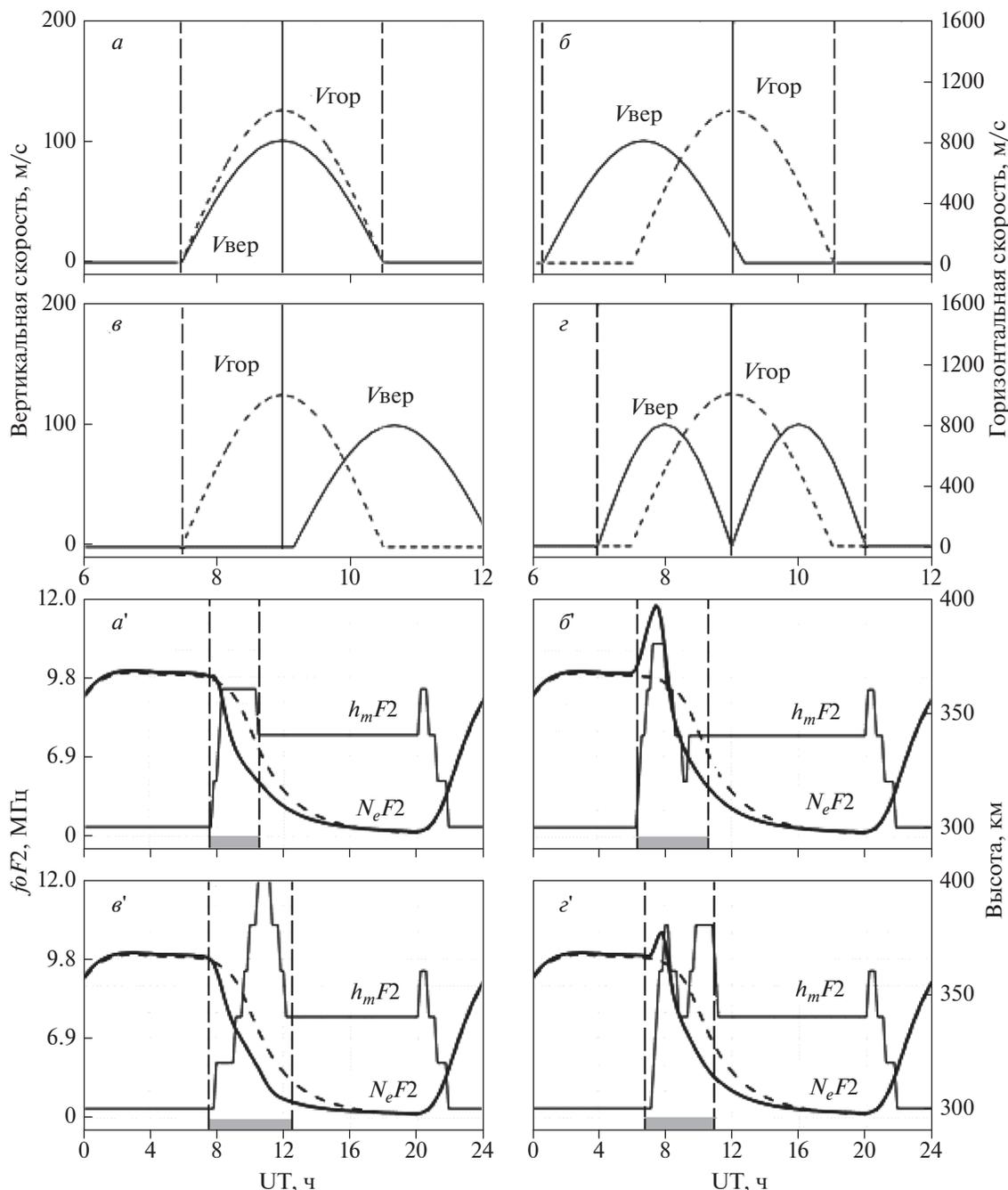


Рис. 1. (*a, б, в, з*) – задаваемые значения горизонтальных и вертикальных компонент скоростей поляризационного джета; (*a', б', в', з'*) – суточные значения плотности электронов $N_e F2$ в максимуме слоя $F2$ (жирные кривые – даны в МГц) и высоты максимума слоя $h_m F2$ (тонкие кривые). Толстые штриховые линии – значения плотности электронов без включения скоростей.

ских частот, а на ионограммах наблюдались характерные дополнительные следы и признаки $F3s$ [Степанов и др., 2017].

На рисунке 2 приведены суточные вариации критических частот $foF2$ (светлые кружочки) и минимальных высот слоя $F2$ (черные кружочки) в конкретные дни, когда регистрировались при-

знаки ПД на ионосферных данных ст. Якутск. На графиках шкала частот расположена с левой стороны, а шкала высот – с правой. По оси абсцисс отложено мировое время UT в часах. Разница с местным временем LT составляет 9 ч: $UT = LT + 9$ ч. До полуночи по местному времени данные обрабатывались через каждые 15 мин, после – через каждый час. Интервалы времени с условиями А

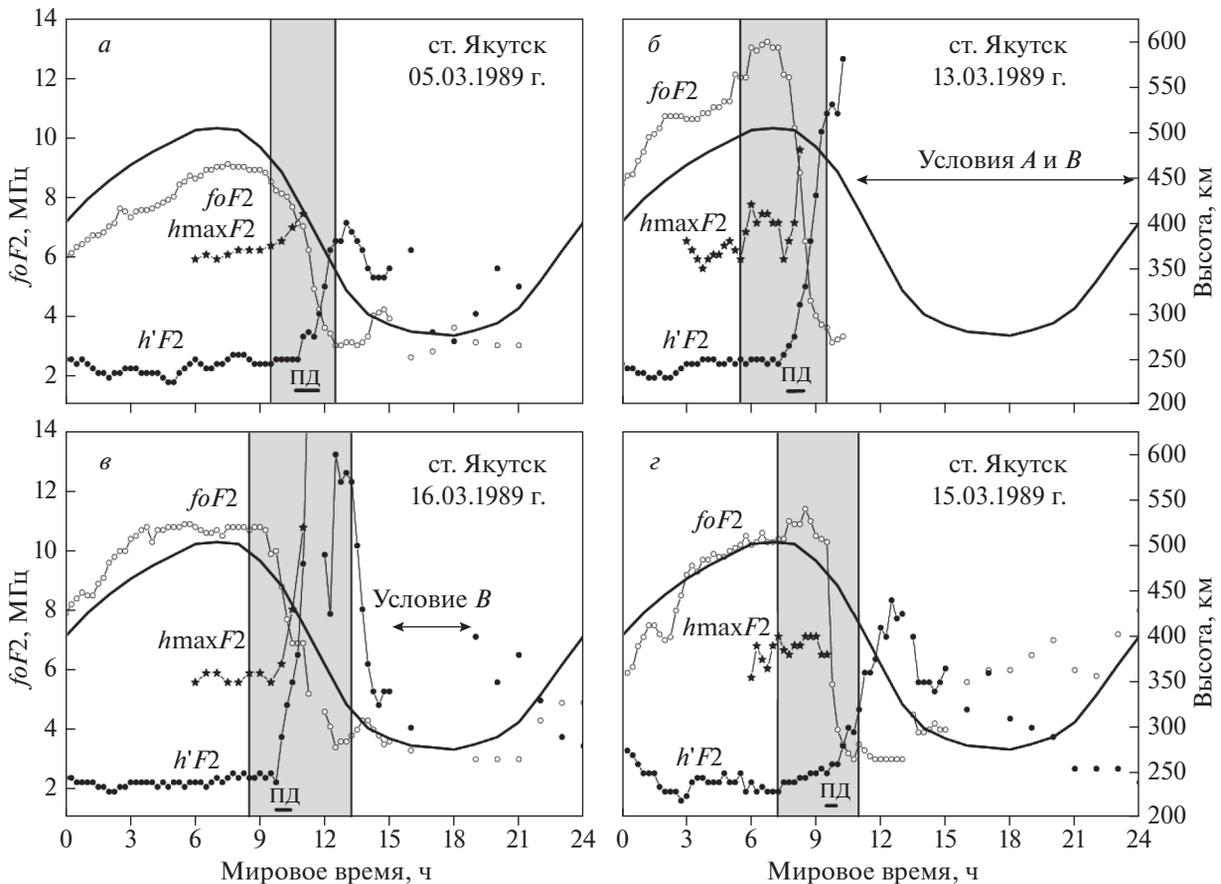


Рис. 2. Суточные изменения критических частот $foF2$ и минимальных высот $h'F2$ слоя $F2$ при развитии ПД над ст. Якутск за конкретные дни.

(экранировка слоя $F2$ нижележащим слоем E) и B (полное поглощение радиоволн) отмечены тонкими горизонтальными прямыми, а интервалы с признаками ПД на ионограммах станции – толстыми горизонтальными прямыми. Жирная кривая обозначает медианные значения критической частоты за март 1989 г.

Динамика событий ПД в реальной субавроральной ионосфере такова, что можно подобрать события, соответствующие результатам модельных вычислений, т.е. случаи, отвечающие различным вариациям взаиморасположения горизонтальных и вертикальных скоростей дрейфов (или компонент электрического поля) во время развития ПД. Отметим, что модельные расчеты не привязаны к конкретным экспериментальным измерениям, а рассматривают общую картину развития событий при определенных обстоятельствах.

Также отметим, что виртуальная высота максимума слоя $h_{max}F2$ по ионограммам наземного радиозондирования рассчитывается как высота, соответствующая высоте на частоте ($foF2 - 0.8$ МГц) [Руководство ..., 1977].

Из рисунка 2 видно, что во всех случаях с началом развития ПД начинает резко падать критическая частота $foF2$ (“срыв критической частоты” [Степанов и др., 2019а]) и подниматься минимальная высота слоя $h'F2$. Затемненные интервалы времени здесь отмечают виртуальные интервалы включения/выключения электрических полей из приведенных выше модельных расчетов. Суточные изменения параметров $foF2$ и $h'F2$ за 05.03.1989 г. наиболее близко соответствовали условиям, когда пики скоростей обеих компонент дрейфа ионосферной плазмы встречаются одновременно, т.е. модельным условиям и результатам пары ($a-a'$) рис. 1. Следующий случай от 13.03.1989 г. (рис. 2б) имеет отношение к паре ($b-b'$) рис. 1, когда максимум вертикальных скоростей опережает максимум горизонтальных скоростей на 1.5 ч. Здесь мы видим характерные повышения $foF2$ и N_eF2 перед их резкими падениями, т.е. рост плотности электронов за 0.5–2 ч перед срывом частоты. Также видим, что во время повышения критических частот повышается и виртуальная высота максимума слоя $F2$ по наземным данным (отмечена звездочками). На ри-

сунке 2в представлен случай от 16.03.1989 г., подобный случаю пары ($\theta-\theta'$) рис. 1. Здесь максимум вертикальных скоростей отстает от максимума горизонтальных скоростей на 1.5 ч. Видно, что совпадающими, кроме резких падений частот, являются относительно большие увеличения высот $h'F2$ по экспериментальным и h_mF2 по модельным значениям. Последний случай (15.03.1989 г.) мы относим к паре ($z-z'$) рис. 1, когда вертикальная скорость имеет два максимума, один из которых опережает максимум горизонтальных скоростей на 1 ч, другой же отстает от него на 1 ч. Видим, как и в модельных расчетах, небольшие (относительно случая на рис. 1б) характерные повышения $foF2$ и N_eF2 перед их резкими падениями, т.е. небольшой рост плотности электронов за 0.5–1.5 ч перед срывом частоты. Особенно это заметно на фоне медианных значений за март 1989 г. Чередующиеся пики вертикальных скоростей, в результатах модельных расчетов сказавшиеся на двухпиковом росте h_mF2 , в данных наземной станции не зафиксированы.

Анализ всех упомянутых выше событий ПД за март 1989 г. позволил заключить, что модельные расчеты показывают качественное согласие с экспериментальными результатами. В двух случаях резкое падение частоты встречается почти сразу после включения электрического поля (рис. 2а, 2в), а в двух остальных случаях резкое падение наблюдается после периодов кратковременного на 1.5–2 ч повышения критической частоты слоя $F2$. В событии ПД от 13.03.1989 г. (рис. 2б) по наземным данным видим подъем высоты максимума слоя $F2$ ($h_{max}F2$) и соответствующее повышение $foF2$. Такое развитие событий регистрируется и в случае от 15.03.1989 г. (рис. 2г), но в менее явно выраженных параметрах слоя $F2$. Возможным объяснением такого поведения является понижение скоростей рекомбинации ионов из-за повышения максимума слоя $F2$ и соответствующее их накопление на этих высотах. Другое объяснение такого повышения плотности электронов на высотах слоя $F2$ может заключаться в “сгонке ионизации”, или в неадиабатическом сжатии ионосферной плазмы, когда быстрый западный поток плазмы в полосе ПД сталкивается с менее быстрым потоком крупномасштабной конвекции. Следовательно, подъем N_eF2 или рост критических частот $foF2$ перед регистрацией ПД может являться вкладом двух независимых процессов в субавроральной ионосфере.

3. ВЫВОДЫ

В ходе сопоставления модельных и экспериментальных результатов по формированию и развитию поляризованного джета на субавроральных широтах получено следующее.

– Результаты расчетов с помощью высокоширотной модели показывают хорошее согласие с экспериментальными данными по регистрации ПД.

– Во всех четырех вариантах расчетов наличие вертикальных и горизонтальных скоростей в полосе ПД приводит к резким падениям критических частот (срывам) и подъему минимальных высот слоя $F2$.

– В вариантах, когда вертикальная компонента скорости дрейфа задавалась одновременно (a) и после (θ) горизонтальной скорости, повышенный плотности $N_{max}F2$ или увеличений $foF2$ не наблюдается.

– В вариантах (b и z) как по модельным расчетам, так и экспериментальным измерениям, наблюдаются сначала увеличения плотности слоя N_eF2 (или критической частоты $foF2$ по наземным данным) перед их резкими падениями, а также увеличения высот максимума слоя $h_{max}F2$ во время первой половины интервала включения электрических полей.

– Возможным объяснением повышения критических частот слоя $F2$ или роста N_eF2 перед их резкими срывами является уменьшение скоростей рекомбинации ионов из-за увеличения высоты максимума слоя, что ведет к накоплению ионов на этих высотах.

– Другое объяснение такого повышения плотности на высотах слоя $F2$ может заключаться в “сгонке ионизации”, или в неадиабатическом сжатии ионосферной плазмы, когда быстрый западный поток плазмы в полосе ПД сталкивается с менее быстрым потоком крупномасштабной конвекции.

– Рост критической частоты слоя $F2$ является дополнительным признаком развития ПД над станцией наблюдения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана проектом П.16.2.1 (рег. номер АААА-А17-117021450059-3), частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований грант № 18-45-140037 и программой РАН П7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука, 192 с. 1990.
- Гололобов А.Ю., Голиков И.А., Попов В.И. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом несовпадения географического и геомагнитного полюсов // Вестн. СВФУ. Т. 11. № 2. С. 46–54. 2014.
- Голиков И.А., Гололобов А.Ю., Попов В.И. Моделирование распределения температуры электронов в области $F2$ высокоширотной ионосферы для условий зимнего солнцестояния // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 4. С. 54–62. 2016.

- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. (Перевод с английского). Ред. Н.В. Медникова. М.: Наука. 342 с. 1977.
- Степанов А.Е., Кобякова С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным Якутской меридиональной цепочки станций // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 4. С. 73–79. 2019а.
- Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ. 176 с. 2017.
- Степанов А.Е., Халипов В.Л., Кобякова С.Е., Котова Г.А. Результаты наблюдений дрейфов ионосферной плазмы в области поляризационного джета // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 5. С. 578–581. 2019б.
- He F., Zhang X.-X., Chen B. Solar Cycle, seasonal, and diurnal variations of subauroral ion drifts: Statistical results // J. Geophys. Res. V. 11. № A6. P. 5076–5086. 2014.