Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 303–306.

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-303
ORCID: 0000-0003-4029-1298

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИОНОГРАММ СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

Ф.С. Лыткин, А.Е. Степанов, В.И. Попов, А.Ю. Гололобов

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск, Россия, lytkinfs@ikfia.ysn.ru

MODEL ANALYSIS OF SUBAURORAL IONOGRAMS DURING THE FORMATION OF A POLARIZATION JET

F.S. Lytkin, A.E. Stepanov, V.I. Popov, A.Yu. Gololobov

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia, lytkinfs@ikfia.ysn.ru

Аннотация. Проведено численное моделирование ионограмм вертикального зондирования в условиях субавроральной ионосферы при возникновении поляризационного джета. Ионосфера задается двумерной моделью в виде объединения двух параболических слоев с различными параметрами. На основе трассировки радиолучей синтезированы ионограммы и проведено их сопоставление с реальными наблюдениями. Показано, что формирование отдельного следа F3s определяется повышением высоты максимума электронной концентрации в зоне джета. Установлено влияние параметров модели на положение и форму следа. Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными и могут быть использованы для интерпретации ионограмм в условиях субавроральной ионосферы.

Ключевые слова: ионограмма, синтез ионограмм, трассировка радиолучей, моделирование субавроральной ионосферы, поляризационный джет, изменение параметров модели ионосферы

Abstract. This paper presents a numerical simulation of vertical sounding ionograms under subauroral ionospheric conditions during the formation of a polarization jet. The ionosphere is represented by a two-dimensional model consisting of two parabolic layers with different parameters. Based on radio ray tracing, ionograms are synthesized and compared with actual observations. It is shown that the formation of an individual F3s trace is determined by an increase in the height of the maximum electron density in the jet zone. The influence of model parameters on the position and shape of the trace is determined. The obtained results are consistent with experimental data and can be used to interpret ionograms under subauroral ionospheric conditions.

Keywords: ionogram, ionogram synthesis, ray tracing, subauroral ionosphere modeling, polarization jet, variation of ionospheric model parameters

ВВЕДЕНИЕ

Субавроральная ионосфера является областью формирования интенсивных электрических полей и узких струй быстрых ионных дрейфов во время магнитных возмущений [Степанов и др., 2017]. Одним из таких проявлений является поляризационный джет — узкая область усиленного западного дрейфа плазмы на высотах F-области ионосферы, харапктеризующаяся горизонтальными градиентами электронной концентрации и провалом плотности в слое F2 [Anderson et al., 1991].

Впервые это явление было обнаружено по данным спутника «Космос-184» [Гальперин и др., 1973; Galperin et al., 1974], позднее оно рассматривалось как субавроральный ионный дрейф (SAID) [Spiro et al., 1979]. Одним из его проявлений на ионограммах вертикального зондирования является дополнительный след выше основного слоя F2, обозначаемый как F3s [Шульгина Н.В., 1974]. В связи с редкостью и кратковременностью таких следов актуальной задачей является моделирование их формирования в условиях неоднородной субавроральной ионосферы.

Целью данной работы является численное моделирование ионограмм в условиях двумерной неоднородной ионосферы и анализ особенностей формирования следа F3s при варьировании или изменении параметров модели.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе используется двумерная модель ионосферной плазмы с заданным вертикальным профилем электронной концентрации и горизонтальными неоднородностями, имитирующими область поляризационного джета. По полученному распределению выполняется трассировка радиолучей в диапазоне частот и углов возвышения, после чего синтезируются ионограммы для анализа положения и формы следа F3s.

Подобные особенности ионосферы, обусловленные наличием горизонтальных неоднородностей электронной концентрации (стенок), ранее рассматривались в [Hoeg, Ungstrup, 1983]. В этой работе были рассмотрены и смоделированы отражения радиоволн, приходящие на ионозонд от северного квадранта при возникновении неоднородностей, превышающих плотность фоновой ионосферы, т. е. от стенки главного ионосферного провала. Также в [Мамруков и др., 1973] был выполнен расчет ионограмм для случая ракурсно-чувствительных отражений от ионосферных неоднородностей, что близко к рассматриваемой здесь задаче моделирования дополнительных следов.

В качестве вертикального профиля слоя F2 использован параболический слой, рассмотренный в [Дэвис, 1973], где распределение электронной концентрации по высоте задается формулой:

$$N(h) = N_m\left(\frac{2(h-h_0)}{y_m} - \left(\frac{h-h_0}{y_m}\right)^2\right),$$

где N_m — максимальная электронная концентрация (м⁻³), h_0 – высота нижней границы слоя (км), y_m — полутолщина слоя (км). По форме профиль представляет собой параболу, симметричную относительно h_0. Полученный вертикальный профиль является однородным по горизонтальной координате и описывает невозмущенное состояние ионосферы.

Показатель преломления вычисляется по формуле Эпплтона через локальную электронную концентрацию, а направление луча определяется уравнением геометрической оптики в градиентной среде. Вблизи критической точки шаг интегрирования автоматически уменьшается. Расчет проводится для частот 1–15 МГц с шагом 0.1 МГц; для каждого отраженного луча фиксируется частота и виртуальная высота. Трассировка выполняется без учета магнитного поля Земли.

На начальном этапе для имитации поляризационного джета в модель вводилась горизонтальная неоднородность электронной концентрации в пределах единственного параболического слоя: концентрация в центральной зоне понижалась относительно краев при сохранении той же высоты максимума. Синтезированные при таких параметрах ионограммы демонстрировали расщепление следа слоя F2 (рис. 2, справа), однако отдельного следа F3s, характерного для поляризационного джета на ионограммах, получить не удавалось. Анализ показал, что причиной является расположение неоднородности на той же высоте, что и основной слой: лучи, отраженные от центральной зоны, не отделяются от основного следа F2, а лишь видоизменяют его.

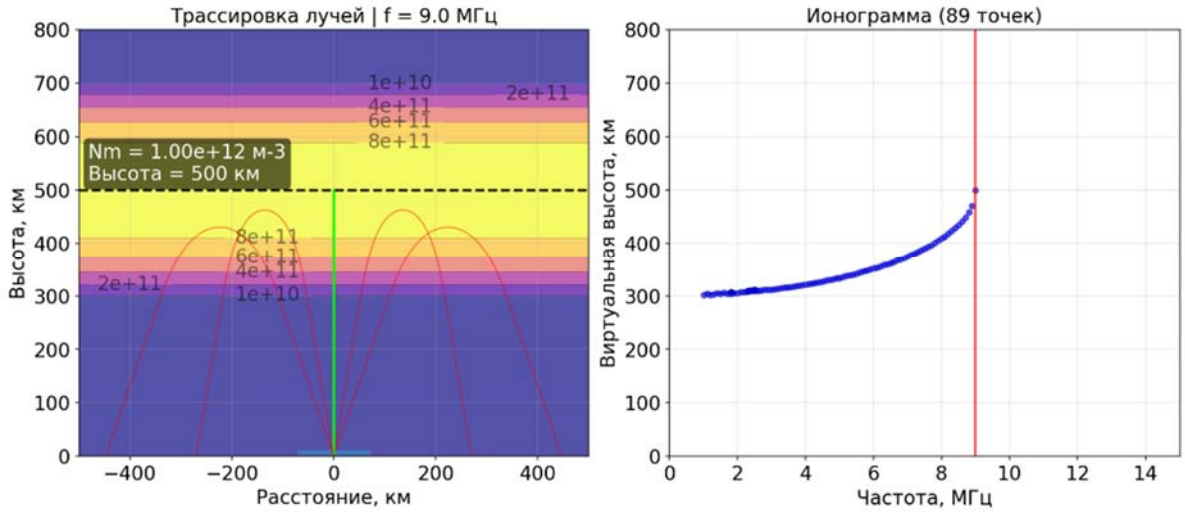

Рис. 1. Трассировка лучей при частоте зондирования 9 МГц (слева) и полученная ионограмма (справа)

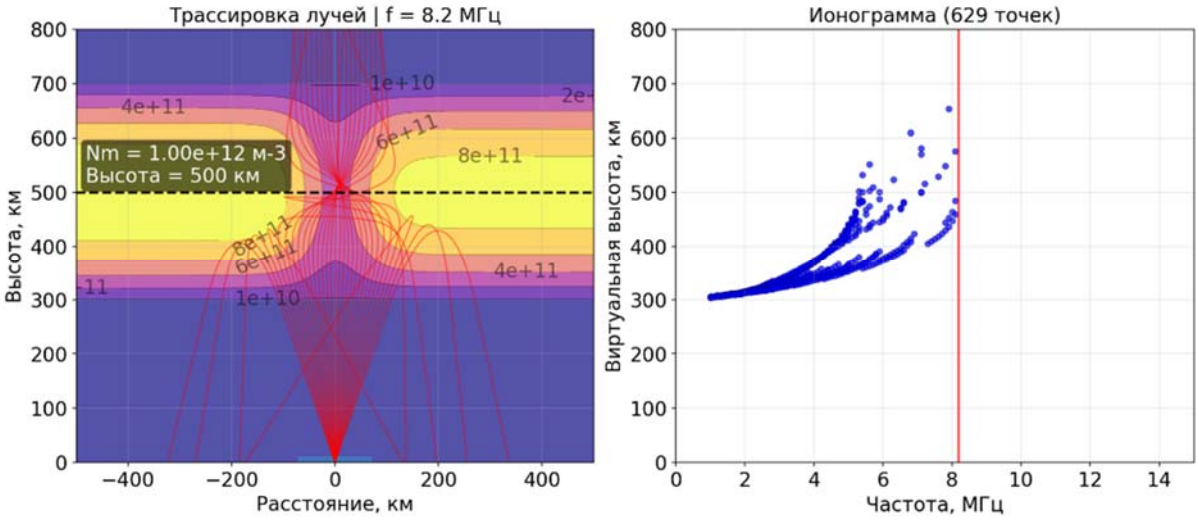

Рис. 2. Синтезированная ионограмма при горизонтальной неоднородности

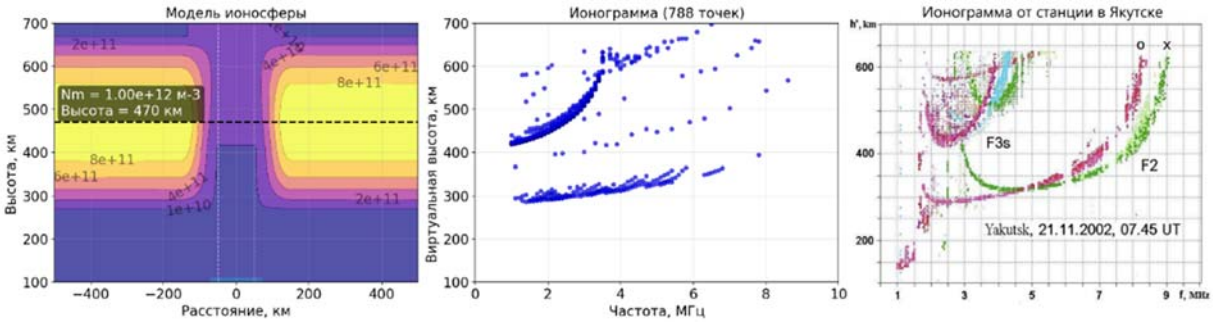

Рис. 3. Модель смешивания слоев (слева), соответствующая ионограмма (в центре) и ионограмма, полученная в Якутске (справа)

Для устранения этого недостатка была использована модель смешивания двух слоев с различными высотами максимума. Близкий подход к моделированию области поляризационного джета использовался в [Филиппов и др., 1984], где локальное изменение высоты максимума слоя F2 задавалось аналитической функцией горизонтальной координаты. Фоновая ионосфера описывается моделью с параметрами $h_{m,A}$, $N_{m,A}$, а зона джета в центре области — моделью с повышенной высотой максимума и пониженной концентрацией ($h_{m,B} > h_{m,A}$, $N_{m,B} < N_{m,A}$), что имитирует характерный для поляризационного джета провал электронной концентрации в слое F2. Подбор параметров проводился отдельно для F3s и F2, таким образом, были получены следы, похожие на реальные соответствующие отражения.

Итоговое распределение $N_e(x, h)$ вычисляется как сумма двух профилей, где весовая функция плавно меняется от нуля в центральной зоне джета до единицы на краях области. В результате модель ионосферы имеет симметричный вид, где по центру сниженная концентрация электронов приподнимается, создавая тем самым куполообразный «нарост» сверху модели (рис. 3, слева). Текущая форма купола является следствием выбранного способа смешивания двух параболических профилей.

Количество лучей трассировки было существенно увеличено для сложных изгибов модели, из-за чего увеличилось количество точек на ионограмме. Разрывы следа F2 в диапазоне 6–9 МГц объясняются дискретностью зондирования, где соседние лучи отражаются от угла слоя по обе стороны станции. Предполагается, что между такими соседними лучами существует промежуточная траектория, возвращающаяся в область станции. Дополнительные точки между двумя следами, а также над следом F3s и после него, являются результатом лучей, которые отражаются несколько раз от стенок джета, тем самым делая более длинный путь с огибанием. Для сравнения на рис. 3 справа приведена ионограмма, полученная в Якутске 21.11.2002 в 07:45 UT.

В ходе численных экспериментов проведено варьирование параметров модели ионосферы. Установлено следующее.

— Высота следа на ионограмме определяется заданной высотой максимума электронной концентрации;

— Критическая частота слоя определяется максимальным значением электронной концентрации;

— Кривизна следа зависит от полутолщины слоя.

Данные закономерности справедливы как для основного слоя F2, так и для дополнительного следа F3s. Кроме того, в рамках модели учитывается толщина области поляризационного джета.

Сравнение синтезированной и реальной ионограмм от 21 ноября 2002 г. (рис. 3) показывает качественное соответствие по высоте и форме следа F3s. Основное расхождение связано с длиной следа F2: на синтезированной ионограмме он оказывается короче, чем на реальной. Это может быть связано с дискретностью набора трассируемых лучей: при больших высотах отражения соседние лучи сильнее расходятся в пространстве, поэтому часть траекторий не возвращается в область станции. Анализ результатов показывает, что ключевым условием появления отдельного следа F3s является повышение высоты максимума электронной концентрации в зоне джета, а не только уменьшение концентрации. При сохранении прежней высоты максимума горизонтальная неоднородность лишь деформирует след F2, но не приводит к его отделению в самостоятельный след F3s. Использование модели смешивания двух параболических профилей позволяет воспроизвести разделение следов, наблюдаемое на реальных ионограммах.

Дальнейшее развитие модели связано с использованием более реалистичных профилей электронной концентрации, уточнением алгоритма трассировки лучей, учетом магнитного поля Земли и применением экспериментальных данных для моделирования конкретных событий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено численное моделирование ионограмм вертикального зондирования в двумерной неоднородной ионосфере, имитирующей область поляризационного джета. На основе трассировки радиолучей исследовано формирование дополнительного следа F3s. Показано, что модель с единственным параболическим слоем и горизонтальной

неоднородностью концентрации не формирует отдельный след F3s, а вызывает только деформацию основного следа F2. Установлено, что основным фактором отделения следа F3s является повышение высоты максимума электронной концентрации в зоне поляризационного джета.

Синтезированные ионограммы качественно согласуются с реальными наблюдениями по высоте и форме следа F3s. Полученные результаты подтверждают возможность использования предложенной модели для интерпретации ионограмм в условиях субавроральных неоднородностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. I. Вопросы методики и некоторые результаты измерений в магнитно-спокойное время // Косм. иссл. 1973. Т. 11, № 2. С. 273–283.

Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. Москва: Издательство «МИР», 1973. 484 с.

Мамруков А.П., Халипов В.Л., Филиппов В.М. Расчет ионограмм для ракурсно-чувствительных отражений от ионосферы // Геофизические явления в полярной области. Якутск: Изд. ЯФ СО АН СССР, 1973. С. 92–97.

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, 2017. 176 с.

Филиппов В.М., Шестакова Л.В., Гальперин Ю.И. Полоса быстрого дрейфа ионов в субавроральной F-области и её проявление в структуре высокоширотной ионосферы // Космические исследования. 1984. Т. 22. № 4. С. 557–564.

Шульгина Н.В. Спорадические образования в F-области // Авроральные явления 70. Апатиты: КФ АН СССР. 1974. С. 44–46.

Anderson P.C., Heelis R.A., Hanson W.B. The ionospheric signatures of rapid subauroral ion drifts // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1991. V. 96, N. A4. P. 5785–5792.

Galperin Yu.I., Ponomarev V.N., Zosimova A.G. Plasma convection in the polar ionosphere // Ann. Geophys. 1974. V. 30, N 1. P. 1–7.

Hoeg P. and Ungstrup E. Interpretation of ionograms in the vicinity of the dayside auroral oval by ray tracing // Radio Sci. 1983. V. 18, N. 5, P. 725–737.

Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. N 8. P. 657–660.