

УДК 550.388

В. М. Филипов, В. Н. Алексеев, В. В. Афонин

СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ШИРОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ В ОБЛАСТИ ГЛАВНОГО ПРОВАЛА ИОНИЗАЦИИ

Приведены результаты одновременных комплексных измерений структуры субавроральной ионосферы при наблюдениях высыпаний заряженных частиц на спутнике «Интеркосмос-19», концентрации и температуры электронов на спутнике «Космос-900», параметров ионосферы методами ВЗ, ВНЗ и конвекции плазмы методом Д1 на станциях Жиганск ($L \sim 4$) и Якутск ($L \sim 3$) и свечения линии 630.0 нм сканирующим фотометром на ст. Жиганск за 26–27.III 1979 г. Найдено, что полярная кромка провала формируется высыпаниями малоэнергичных электронов в диффузной авроральной зоне. Это подтверждается пространственным совпадением экваториальной границы диффузных высыпаний, определяемой по спутниковым и наземным оптическим измерениям, с полярной кромкой главного провала ионизации, определяемой с помощью наземных ионосферных наблюдений и спутниковых измерений N_e на спутнике «Космос-900». Результаты этих комплексных экспериментов также показывают, что одним из основных механизмов образования главного ионосферного провала могут быть особенности конвекции плазмы области F на широтах субавроральной зоны.

Наземные средства наблюдений в геофизике более пригодны для контроля и непрерывного наблюдения явлений в ограниченном регионе, в особенности сравнительно быстро меняющихся геофизических полей (поле магнитных вариаций, поля ОНЧ, дрейфа сияний и т. п.) последовательно в различных секторах местного времени для каждой станции. Для геофизических спутников характерны измерения как локальных, так и глобальных свойств среды — ионосферы и магнитосферы, а также изучение явлений, недоступных наблюдению с земной поверхности (например, прямое измерение полей электростатических волн, мелкомасштабных магнитных полей токов внутри форм полярных сияний, исследование характеристик первичных и вторичных авроральных частиц, авроральных электрических полей и др.) [1]. При этом траектория спутника в координатах географической широта — местное солнечное время лишь очень медленно меняется по мере прецессии орбиты. Поэтому оба типа геофизических наборов данных (наземные измерения и спутниковые данные) существенно дополняют друг друга. Следует отметить, что наземные данные обычно являются более массовыми для данного пункта наблюдений, но для их интерпретации особенно важен отбор «тестовых» ситуаций, когда имеются одновременные данные со спутника и с наземной станции, сопоставимые между собой.

В последнее время большое внимание уделяется исследованиям морфологических характеристик главного ионосферного провала с целью выяснения механизмов его образования. Эта задача представляется весьма актуальной как с точки зрения физики ионосферно-магнитосферного взаимодействия, так и с прикладной точки зрения в связи с влиянием провала

ШИТОВА ЛИНО

на многие характеристики линий КВ радиосвязи. При этом одним из ключевых вопросов является идентификация и отождествление следов отражений от стенок провала на ионограммах вертикального (ВЭ) и возвратно-наклонного (ВНЗ) зондирования ионосферы. В [2, 3] на основании анализа данных координированных измерений на меридиональной цепочке ионосферных станций в субавроральной зоне и одновременных данных о концентрации ионов O^+ со спутника «Ореол-2», а также по локализации экваториальной границы диффузных высыпаний (ГДВ) по данным о высыпании электронов с этого же спутника, был отождествлен след на ионограмме ВЭ и ВНЗ, соответствующего наклонному отражению от резкой полярной стенки провала, когда он расположен в поле зрения цепочки станций.

В этой работе мы приведем результаты целенаправленных координированных измерений за 26–27.III 1979 г., когда на спутнике «Интеркосмос-19» измерялись параметры вторгающихся электронов, на спутнике «Космос-900» — концентрация и температура электронов, а с помощью наземных геофизических методов регистрировалось свечение линии 630,0 нм сканирующим фотометром и измерялись параметры конвекции плазмы в области F методом Д1 и положение полярной кромки главного провала ионизации по данным меридиональной цепочки станций ВЭ и ВНЗ в Якутии.

В итоге этих комплексных экспериментов появилась возможность детального сопоставления последовательных положений ГДВ электронов по измерениям на спутнике «Интеркосмос-19» и положений полярной кромки главного ионосферного провала по наблюдениям со спутника «Космос-900» и по наземным оптическим и ионосферным измерениям, а также исследования изменений в картине дрейфа плазмы в зависимости от локализации станции наблюдения относительно полярной стенки провала и ГДВ.

В работе также сопоставлены широтные профили ионизации по измерениям на спутнике «Космос-900» и по наземным наблюдениям методами ВЭ и ВНЗ. Таким образом, можно говорить об экспериментальной проверке адекватности метода ВНЗ при локализации полярной кромки провала с привлечением спутниковой информации.

Спутник «Интеркосмос-19» был выведен на орбиту с наклоном 74° и высотой апогея 1000 км 27.II 1979 г. Спутник имеет трехосную стабилизацию в орбитальной системе координат с ориентацией на Землю (с точностью $10 \div 15^\circ$). Параметры вторгающихся электронов измерялись с помощью спектрометра СФ-3, осуществляющего регистрацию электронов в ряде диапазонов энергий от 10 эВ до 15 кэВ с энергетическим разрешением $\Delta E/E \approx 0,2$ и временным разрешением, определяемым режимом телеметрии от 10 мс до 2,5 с [4].

Спутник «Космос-900» запущен 30.III 1977 г. на круговую орбиту с высотой ~ 500 км и наклоном 83° , полный период обращения вокруг Земли ~ 95 мин [5]. За время от момента запуска до рассматриваемого периода высота орбиты спутника уменьшилась до ~ 370 км. Электронная концентрация N_e измерялась при помощи трехэлектродной ловушки с «плавающим» потенциалом внешней сетки [6], электронная температура T_e высокочастотным зондом, который является видоизмененным ленгмюровским зондом [7].

Для сопоставления широтных профилей ионизации по данным наземных и спутниковых наблюдений анализировались результаты одновременных измерений N_e за январь — март 1979 г. Из имеющегося массива спутниковых данных нам удалось выбрать не более десятка случаев, когда имелись сопоставимые данные при пролетах спутника вблизи меридиана якутской цепочки станций. На рис. 1 приведен один из типичных случаев одновременных наземных и спутниковых измерений N_e за 25.I 1979 г. В нижней части рисунка указаны мировое время периода наблюдений и географические долгота λ и широта ϕ . Местоположение станций ВЭ и

ВНЗ обозначено стрелками. Для сравнения также проиллюстрирована локализация свечения эмиссии 630,0 нм по данным ст. Жиганск.

Из рисунка видно, что наблюдается провал в широтном распределении ионизации, отождествляемый нами с главным (или среднеширотным) ионосферным провалом, в диапазоне широт $\varphi \approx 62 \div 65^\circ$. Широтный профиль электронной температуры показывает резкое увеличение T_e в области провала N_e . Ранее по измерениям на спутнике «Космос-900» была установлена зависимость повышения электронной температуры в области провала от мирового времени: в $\sim 06^h$ UT максимум T_e наблюдается в области дна провала, а в $\sim 18^h$ UT — вблизи полярной стенки провала [8]. Рассматриваемые в данной работе результаты измерений не противоречат

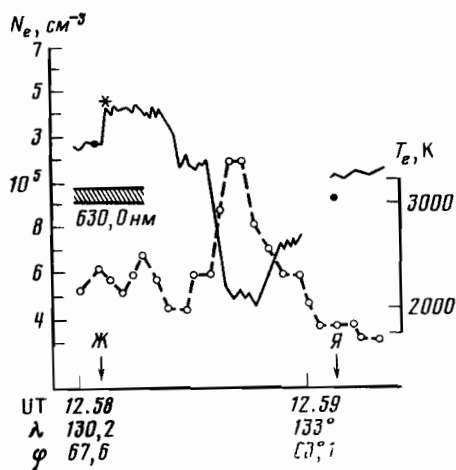


Рис. 1. Одновременные наземные и спутниковые измерения широтного профиля электронной концентрации за 25.I 1979 г. Сплошная линия — профиль N_e , пунктирная — профиль T_e по данным «Космоса-900», точки — значения N_e по данным станций ВЗ Жиганск (Ж) и Якутск (Я), звездочка — значения N_e по данным станции ВЗ Якутск. Виток 10 197, сеанс 10204

такой зависимости. Из рисунка также видно хорошее совпадение значений электронной концентрации не только по данным ВЗ, но также и по данным ВНЗ: ст. Якутск регистрирует следы отражений от полярной стенки провала, которая наблюдается по спутниковым данным.

Далее будут анализироваться результаты одновременных спутниковых и наземных измерений широтного распределения некоторых параметров субавроральной верхней ионосферы. Из данных измерений со спутника «Интеркосмос-19» нами отбирались пересечения ГДВ в диапазоне высот от 500 до 1000 км в вечерне-полуночном секторе. Для определения ГДВ анализировались те участки пролетов, где интенсивность регистрируемых электронов с энергиями 0,5 и 1,0 кэВ достигала значений $\sim 2 \cdot 10^7$ электрон/см²·с·ср·кэВ, так как результаты расчетов ионизирующей способности электронов диффузной зоны [9] показали, что именно при таких и больших интенсивностях могут наблюдаться получаемые при наземных измерениях значения электронной концентрации ($\sim 10^5$ электрон/см³) на полярной кромке провала.

Положения ГДВ по измерениям на витках, когда спутник пролетал далеко от меридиана наземной цепочки станций, интерполированы на меридиан Якутска по модели ГДВ [10] для учета разницы в MLT. В послеполуночном секторе положения ГДВ получены по измерениям в сопряженной точке в южном полушарии и перенесены в северное полушарие на те же координаты Λ_0 —MLT (Λ_0 — инвариантная широта) так как тщательные исследования развития сияний в сопряженных областях при помощи двух реактивных самолетов показали, что развитие сияний (яркость, образование складок и петель) аналогично в сопряженных областях [11]. Основываясь на современной модели постоянного геомагнитного поля, авторы [11] показали, что полярные сияния южного полушария, спроектированные вдоль геомагнитных силовых линий в северное полушарие, совпадают по форме с сияниями северного полушария [12].

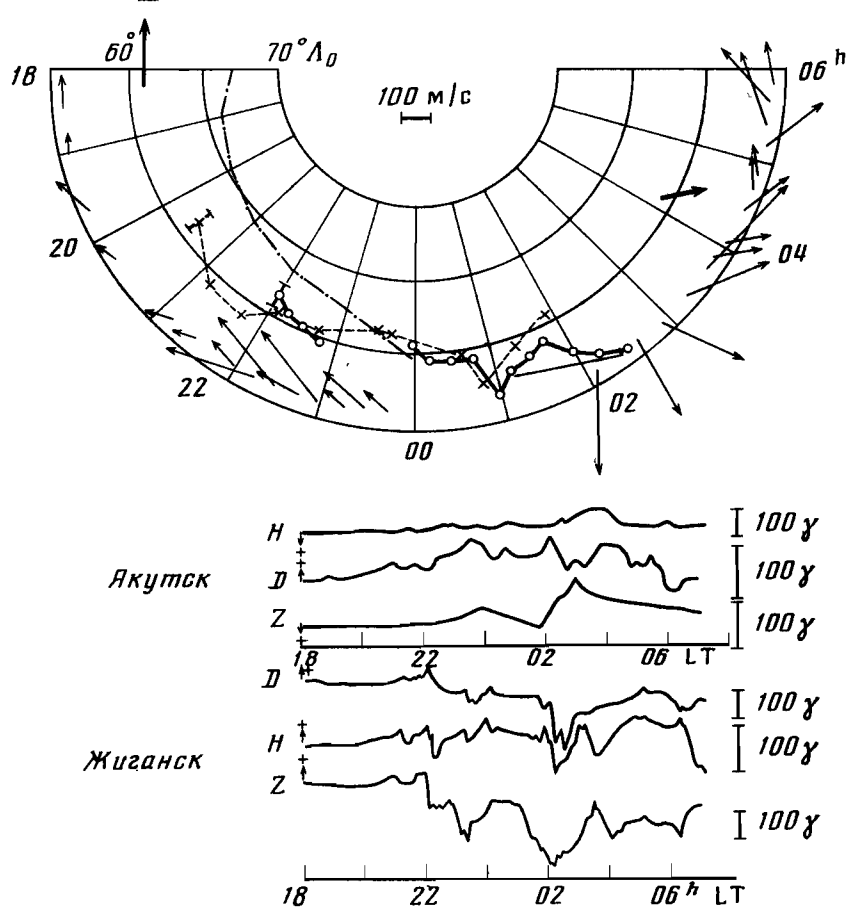


Рис. 2. Результаты комплексных измерений за 26–27.III 1979 г. Сплошная линия – положения полярной кромки провала по данным станции ВНЗ Якутск; штриховая – положения ГДВ по данным «Интеркосмоса-19». Тонкие стрелки – результаты измерений дрейфа ионизации методом Д1 на ст. Якутск; штрихпунктирная линия – модельные значения ГДВ. Внизу – магнитограммы станций Якутск и Жиганск за период измерений

На рис. 2 приведены положения ГДВ и полярной кромки провала совместно с результатами одновременных наблюдений конвекции плазмы в области F методом Д1; для сравнения показаны также модельные значения $\Lambda_0^{\text{ГДВ}}$. Из рисунка видно, что в области дна провала наблюдается устойчивый дрейф ионизации на запад (в системе координат, связанной с Землей). Смена направления дрейфа происходит при «наплывании» полярной кромки провала на зенит ст. Якутск (~ 02.30 LT [2, 3]). В пределах ошибок измерений экваториальная граница зоны вторжения малоэнергичных электронов, полученная по спутниковым данным в вечернем и полуночном секторах, и положение полярной стенки провала, определяемое по результатам наземных измерений методом ВНЗ, совпадают.

В работе [13] впервые экспериментально было показано, что рост потерь ионизации в области главного провала за счет ее сноса из ночной F -области в результате горизонтального дрейфа может оказаться основной причиной понижения концентрации ионов в этой области. Независимо (но позже) Кнудсен [14] предположил, что провал образуется в результате обычной рекомбинации в отсутствие ионизирующих факторов. В [15] приводится дальнейшее развитие модели Кнудсена, где предлагается различное временное поведение для плазмы в предполуночном

секторе. Авторы [15] предполагают, что плазма в провале испытывает движение вместе с атмосферой (коротацию) к востоку до точки зстоя и затем движется к западу в вечерне-полуночном секторе. Такая структура дрейфа плазмы создается в результате конкуренции коротации и магнитосферной конвекции, если двухпетлевая структура наклонена к меридиану полдень-полночь таким образом, что точка зстоя движется от 18^h MLT к полуночи. Западные направления конвекции плазмы в области провала были получены при наблюдениях за мерцаниями радиосигналов геостационарных спутников [16]. Сопасаующиеся с этим результаты получены по измерениям со станции некогерентного рассеяния в Миллстоун-Хилле [17]. Таким образом, в рамках изложенных результатов измерений конвекции плазмы в области F в районе главного провала можно предпо-

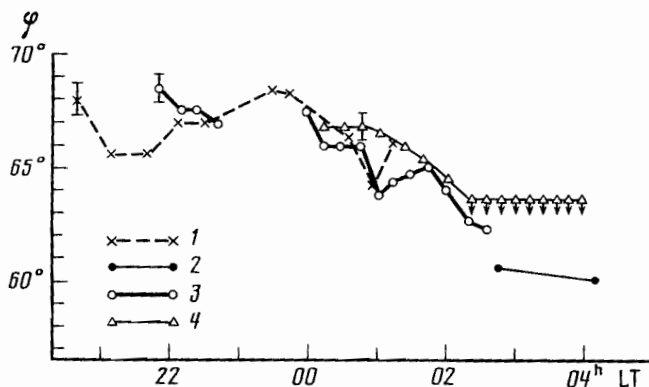


Рис. 3. Результаты комплексных наземных и спутниковых наблюдений крупномасштабной структуры субавроральной ионосферы 26–27.III 1979 г. в координатах географическая широта – местное время
 1 – положения ГДВ по измерениям на спутнике «Интеркосмос-19»; 2 – локализация полярной стенки провала по данным «Космос-900»; 3 – положение полярной кромки провала по данным ВНЗ; 4 – экваториальная граница фонового свечения эмиссии 630,0 нм

лагать, что в области дна провала определяющим фактором баланса ионизации является замедление или даже «застой» ионосферной плазмы на этих широтах в результате частичной или полной компенсации коротационного сноса плазмы накладывающимся компонентом дрейфа к западу, и как следствие этого, исчезновение ионизации в области F из-за обычных рекомбинационных процессов [2, 3].

На рис. 3 приведены результаты вышеописанных комплексных наблюдений с добавлением результатов измерений N_e на спутнике «Космос-900» и оптических измерений свечения эмиссии 630,0 нм на ст. Жиганск, по которым зарегистрировано фоновое свечение, окаймленное с полюса дискретной полосой сияния типа $qNB1cN1$. Экваториальная граница фона в ~ 00.00 LT локализована на $\varphi \approx 67^\circ$. В период активизации происходит усиление фонового свечения и смещение его до $\varphi \approx 64^\circ$. С ~ 02.00 LT, т. е. с момента начала второй магнитосферной суббури [12], наблюдаются сияния типа $qNB1cN2$, $rnNP1cZ$, а экваториальная граница фона смещается к югу. На рис. 3 стрелки означают смещение границы к экватору от поля зрения ст. Жиганск.

Как было описано выше, полярная кромка главного провала ионизации «наплывает» на зенит ст. Якутск в $\sim 0.2.30$ LT. Полученные после этого момента (02.47 LT) положения полярной стенки главного провала по измерениям N_e на «Космосе-900» (см. рис. 3) локализованы в диапазоне широт $\varphi \approx 60 \div 61^\circ$. Из рисунка видно, что одновременные наземные

и спутниковые измерения N_e показывают резкое смещение главного провала до низких широт после $\sim 02^h$ LT.

Таким образом, по результатам вышеприведенных наземных и спутниковых измерений широтного распределения параметров субавроральной ионосферы можно сделать следующие выводы.

Подтверждены результаты работ [3, 10] о механизме формирования полярной кромки главного провала ионизации вторжения мягкоэнергичных электронов, о чем свидетельствует совпадение границ фонового свечения 630,0 нм и ГДВ, определяемой по наблюдениям высыпания частиц на спутнике «Интеркосмос-19», с положением полярной стенки провала, полученным по измерениям N_e спутником «Космос-900» и методом ВНЗ.

Наземные и спутниковые измерения по локализации северной стенки главного провала достаточно хорошо согласуются между собой.

Таким образом, результаты одновременных наблюдений N_e доказывают достоверность и применимость метода ВНЗ для определения положения полярной кромки провала, что позволяет использовать этот метод при диагностике крупномасштабной структуры высокоширотной ионосферы.

Методом Д1 в области дна провала зарегистрировано направление дрейфа ионизации области F относительно Земли, а именно, скорость его противоположна коротационной, что создает здесь замедление или «запой» ионосферной плазмы в невращающейся системе координат и, следовательно, является одним из основных механизмов формирования главного провала [2, 13–15].

В заключение авторы благодарят Ф. К. Шуйскую за предоставление результатов измерений на спектрометре СФ-3, Л. В. Шестакову и Н. С. Строд за помощь в обработке материалов наблюдений на спутнике «Космос-900».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шафер Ю. Г., Гальперин Ю. И., Пономарев Е. А. Некоторые вопросы планирования совместных спутниковых и наземных наблюдений // Верхняя атмосфера высоких широт. Якутск: ЯФ СО АН СССР. 1969. Вып. 1. С. 9–19.
2. Сивцева Л. Д., Филиппов В. М., Халипов В. Л. и др. Исследование среднеширотного ионосферного провала с помощью наземных геофизических методов и синхронных измерений со спутников // Космич. исслед. 1983. Т. 21. Вып. 4. С. 584–608.
3. Сивцева Л. Д., Филиппов В. М., Халипов В. Л. и др. Координированные исследования процессов в субавроральной верхней ионосфере и провала концентрации легких ионов // Космич. исслед. 1984. Т. 22. Вып. 5. С. 721–741.
4. Аряжкин В. М., Лисаков Ю. В., Шуйская Ф. К. Спектрометр мягких электронов СФ-3 на спутнике Интеркосмос-19 // Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: ИЗМИРАН, 1980. С. 163–177.
5. Грингауз К. И., Тверской Б. Л. Лаборатория в магнитосфере // Правда. 1977. 3 апр.
6. Беляшин А. П., Гдалевич Г. Л., Жданов В. И., Озеров В. Д. Аппаратура и методика измерений неоднородностей концентрации при помощи установленной на спутнике Космос-900 ловушки с «плавающим» потенциалом внешней сетки // Космическое приборостроение. М.: Наука. 1981. С. 54.
7. Шмилауэр Я., Афонин В. В. Некоторые особенности поведения электронной температуры в субавроральной и в средней областях по измерениям на спутнике «ИК-14» // Тр. Международного симпозиума по физике ионосферы и магнитосферы Земли и солнечного ветра. Калуга. 1976. Т. 2. С. 215–225.
8. Макарова Л. Н., Грингауз К. И., Афонин В. В. Контроль мировым временем повышения температуры электронов в области провала // Полярная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи. Апатиты: 1984. С. 65–66.
9. Белинская С. И., Халипов В. Л. Некоторые аэрономические эффекты в диффузной зоне сияний // Исследование по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: 1983. № 63. С. 115–124.
10. Гальперин Ю. И., Кранье Ж., Лисаков Ю. В. и др. Диффузия авроральная зона. I. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и околополуночном секторах // Космич. исслед. 1977. Т. 15. С. 421–434.
11. Belon A. E., Mather K. B., Glass N. W. The conjugacy of visual Aurora // Antarctic J. U. S. 1967. V. 2. P. 124–127.

е
о
у
е
я
т
е
х
но
на
но
чно
их
тся
мые
мор-
елью
сьма
взаи-
овала

12. *Акасофу С.* Полярные и магнитосферные суббури. М.: Мир, 1971. 317 с.
13. *Гальперин Ю. И., Пономарев В. Н., Зосимова А. Г.* Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури // Космич. исслед. 1973. Т. 11. Вып. 2. С. 273–296.
14. *Knudsen W. C.* Magnetospheric convection and high-latitude F_2 -ionosphere // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 7. P. 1046–1055.
15. *Spiro R. W., Heelis R. A., Hanson W. B.* Ion convection and the convection of the mid-latitude F -region ionization trough // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. № 49. P. 4255–4267.
16. *McDougall J. M.* Measurements of ionospheric electric field convection by the long-line technique // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. № A6. P. 4781–4789.
17. *Wand R. H.* Model representation of the ionospheric electric field over Millstone hill ($\Lambda=56^\circ$) // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. № A7. P. 5801–5808.

Поступила в редакцию
15.V.1986