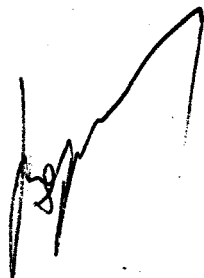




**Ракетное
зондирование
верхней
атмосферы
и ионосферы**

СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ



*Ракетное
зондирование
верхней атмосферы
и ионосферы
до высоты 1500 км*

*Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
К. И. Грингауз*

Ростов-на-Дону

Издательство Ростовского университета
1989

P19
УДК 551.510:550.380.8;629.79

*Печатается по решению отделения физики
и атомной энергетики Северо-Кавказского научного центра
высшей школы*

Рецензенты

доктор физико-математических наук М. Н. Изаков,
доктор физико-математических наук Е. Г. Фесенко,
кандидат физико-математических наук Н. В. Кривошеев

Редакционная коллегия:
К. И. Грингауз (отв. редактор),
П. Ф. Денисенко, В. Г. Истомин,
Н. Е. Шейдаков, Н. М. Шютте

Редактор *В. И. Литвиненко*

P $\frac{1704060000-060}{M175(03)-89}$ 24-89

ISBN 5-7507-0208-1

ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ ПО ДАННЫМ БОРТОВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ РАКЕТЕ «ВЕРТИКАЛЬ-10»

Г. Л. Гдалевич, В. Д. Озеров (СССР),
А. Верник, З. Крысиньски, Л. Наторф (ПНР)

Введение. Мелкомасштабные неоднородности концентрации плазмы F-области на средних широтах изучаются гораздо менее интенсивно, чем на низких и высоких широтах. Причина этого в слабости и редком появлении среднеширотных неоднородностей, что затрудняет измерения. Предыдущие локальные измерения показали, что амплитуда среднеширотных неоднородностей обычно составляет меньше 1% и что почти вся их мощность заключена в размерах неоднородностей менее чем на 1 км [1]. Среднеширотные неоднородности, связанные с градиентами плотности в субпровалах, исследовались Басу [2]. Корень из среднего квадрата амплитуды неоднородностей с размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров обычно превышает 10%, однако наибольший вклад в его величину принадлежит большим неоднородностям, которые превосходят меньшие неоднородности по амплитуде. Басу предложил, что градиентно-дрейфовая неустойчивость ответственна за генерацию неоднородностей. Статистический анализ большого количества локальных данных, полученных на ЭСРО-4, указывает на то, что в ночное время неоднородности с размерами более 1,55 км и амплитудами, превышающими 5%, заполняют зону, которая простирается до широт менее 40° [3]. В этой статье мы представляем результаты измерения неоднородностей плазмы, выполненного на ракете «Вертикаль-10». Геомагнитная обстановка в этот день была умеренно спокойной ($\Sigma K_p = 12+$). Ракета достигла апогея на высоте 1511 км. На борту было установлено несколько приборов для диагностики нейтральной среды и плазмы. Здесь обсуждаются данные спектрального анализа и зонда Ленгмюра.

Постановка эксперимента и результаты. Спектральный анализ ионосферных неоднородностей позволяет изучать их энергетику и выявлять природу и механизмы образования неоднородностей. В большинстве экспериментов по изучению неоднородностей спектральный анализ проводился во время обработки на Земле. При этом ограничения, накладываемые телеметрией, не позволяют получить всю информацию о неоднородностях. Поэтому при постановке экспери-

мента по изучению ионосферных неоднородностей на ракете «Вертикаль-10» было решено осуществить спектральный анализ непосредственно на борту летящей ракеты. Прибор был разработан в ПНР по согласованному со специалистами СССР техническому заданию и получил наименование «АСИН» (анализатор спектра ионосферных неоднородностей) [4]. Алгоритм работы прибора АСИН основан на цифровом преобразовании Фурье временного ряда данных, которое можно записать следующим образом:

$$X_k = X(f_k, T) / \Delta t = \sum_{n=0}^{N-1} X_n \exp [-i(2\pi/N)nk],$$

где $k=0, 1, 2, \dots, (N/2) - 1$; X_k — компонента k -го члена преобразования Фурье; Δt — интервалы времени равномерной дискретизации непрерывного сигнала; X_n — дискретное n -е значение анализируемого сигнала; $(2\pi/N) \cdot k = 2\pi f_k$ — дискретная частота k -го члена преобразования Фурье. Спектры мощности неоднородностей можно определить из уравнения

$$G_k = (2\Delta t/N) |X_k|^2.$$

Логарифмирование входного анализируемого сигнала позволило упростить внутреннюю структуру анализатора и уменьшить количество интегральных схем в приборе. Цифровая часть анализатора состоит из блока памяти «LOG», в котором входной сигнал X_n преобразуется: $\log(1 + X_n)$; блока памяти «APC», в котором размещены величины $\log[\exp(-i2\pi f_k n)]$, и блока памяти умножения «X», который реализует искомую зависимость. Пример реализации искомой зависимости для реальной части преобразования Фурье

$$10^{\{\log[1 + X_n] + \log[1 + \cos(2\pi nk/N)]\}} - 10^{\log[1 + X_n]} - \\ - 10^{\log[1 + \cos(2\pi nk/N)]} = X_n \cos(2\pi nk/N).$$

В блоках сумматора и накопителя формируются реальные и мнимые части преобразования Фурье для числа N дискретных величин сигнала и для $(N/2) - 1$ дискретных частот. Эти компоненты передаются через телеметрическую систему на Землю для последующей обработки.

Входной ток i_j ловушки в диапазоне от $2 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ А преобразуется в напряжение U от $2 \cdot 10^{-2}$ до 10 В. При выборе чувствительности к неоднородностям учитывалось, что флуктуации $\Delta i_j / i_j = 2\%$ наблюдаются на частоте $f_{min} = 1$ Гц, а на частоте $f_{max} = 220$ Гц $\Delta i_j / i_j$ может иметь величину $\sim 0,0009\%$. Частоты 1–220 Гц определяют ширину полосы, используемую при анализе. Напряжение U_j подается на вход телеметрии и параллельно на вход автоматической регулировки усиления АРУ для исключения низкочастотного тренда

сигнала. После этого только флуктуации сигнала поступают на входы фильтров с шириной полосы 1—14 и 14—220 Гц и коэффициентами усиления K_{U_1} и K_{U_2} . Затем напряжения $\Delta U_{1,2}$ преобразуются в модуль $|\Delta U_{1,2}|$ и определяется их знак $SGN\Delta U_{1,2} = SGNX$. Напряжения $|\Delta U_{1,2}|$ подаются на аналогово-цифровой преобразователь АЦП. В результате получаются дискретные величины входного сигнала X_n , которые идут (со своим знаком) в цифровую часть анализатора. Для полосы 1—14 Гц интервал дискретизации равен 32 мс, для полосы 14—22 Гц этот интервал равен 2 мс. Число дискретных величин $N=128$. Компоненты преобразования Фурье определяются для 16 дискретных частот (число дискретизированных значений сигнала 64) в полосе 1—14 Гц и для дискретных частот в полосе 14—220 Гц. Спектры определяются каждые 5 с.

При помощи спектроанализатора было получено более 200 спектров неоднородностей в диапазоне высот 200—1500 км. Для уменьшения ошибки в оценке истинного спектра подвергались усреднению каждые шесть последовательно измеренных спектров.

На рис. 1 показаны высотные профили спектральной интенсивности, соответствующие двум частотам: 1,58 и 25,39 Гц. Эти интенсивности были дополнительно усреднены по четырем частотным откликам для дальнейшего уменьшения ошибки. Эффективная ширина полосы на низких и высоких частотах была равна соответственно 5,89 и 93,75 Гц. Если скорость дрейфа плазмы намного меньше скорости ракеты, как это и предполагается, тогда при измерениях на меньшей частоте вертикальные размеры неоднородностей изменяются от 2,66 км на высоте 300 км до 0,83 км на высоте 1400 км. При измерениях на большей частоте соответствующие размеры равны 0,17 и 0,05 км. Бросающейся в глаза особенностью является повышенная спектральная интенсивность при подъеме ракеты в высотном диапазоне 700—1200 км, максимальная на высоте 950 км (см. рис. 1*). Это усиление особенно велико при измерениях на большей частоте. Более слабый эффект на меньшей частоте указывает на то, что наклон спектра меньше. Действительно, если предположить, что спектр имеет степенной вид: $p \sim f^{-\beta}$, тогда в диапазоне высот 775—1177 км средний спектральный индекс мощности равен $0,84 \pm 0,17$ в отличие от $1,71 \pm 0,56$ вне этой области (рис. 2*). Во время спуска ракеты спектральная интенсивность мала и обнаруживает минимальное количество вариаций. Спектральный индекс мощности равен $1,88 \pm 0,2$.

Между 700 и 1100 км во время подъема ракеты имеется четко выраженное обеднение: электронная плотность примерно на 40%

* Предполагается, что на протяжении 20 мин полета ракеты в этой области не происходили столь же глубокие временные изменения концентрации.

ниже, чем при спуске. Область обеднения характеризуется присутствием крупномасштабных неоднородностей [5]. Горизонтальное расстояние между областями, описываемыми этими профилями, составляет 17 км в направлении восток—запад на высоте 1000 км.

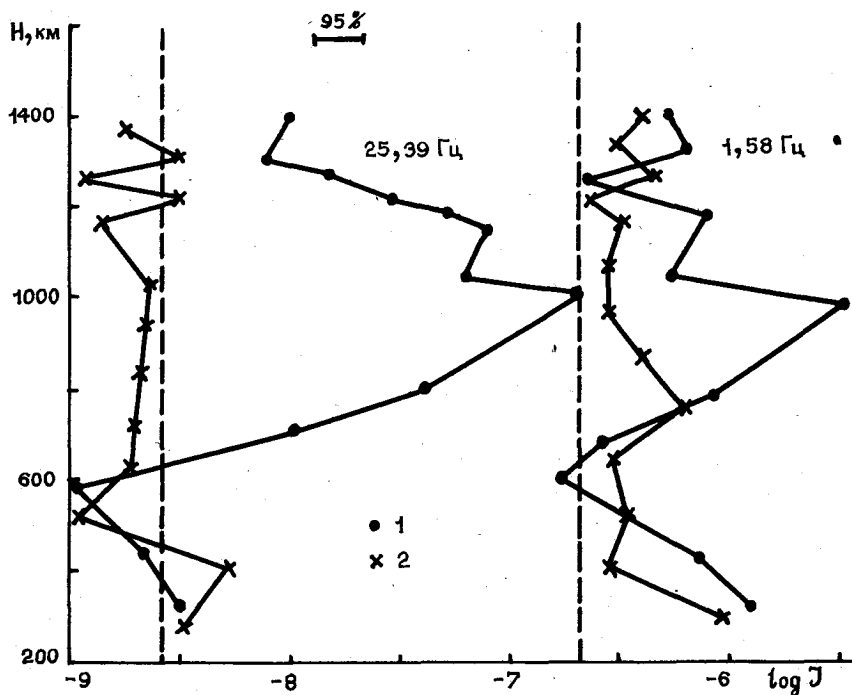


Рис. 1. Высотные профили спектральной интенсивности для частот 1,58 Гц и 25,39 Гц: 1—подъем, 2—спуск

Таким образом, горизонтальный градиент в восточном направлении намного больше, чем вертикальный. Этот градиент достигает максимума на высоте 950 км.

Ниже ~350 км профили, полученные при подъеме и спуске, различаются благодаря большому горизонтальному разнесению и градиентам электронной плотности. Возмущение, вызванное выделениями ракеты, также нельзя исключить как фактор, дающий вклад в расхождение профилей на этих высотах. Однако основным фактором, создающим различие профилей ниже 350 км, явилось прохождение АГВ во время полета ракеты.

Обсуждение результатов. Проведение спектрального анализа позволило получить данные о размерах и амплитуде неоднородностей в довольно большом диапазоне (несколько порядков). Обнаружено, что при подъеме ракеты на высотах от 400 до 1000 км амплитуда мелкомасштабных неоднородностей возрастает более чем на

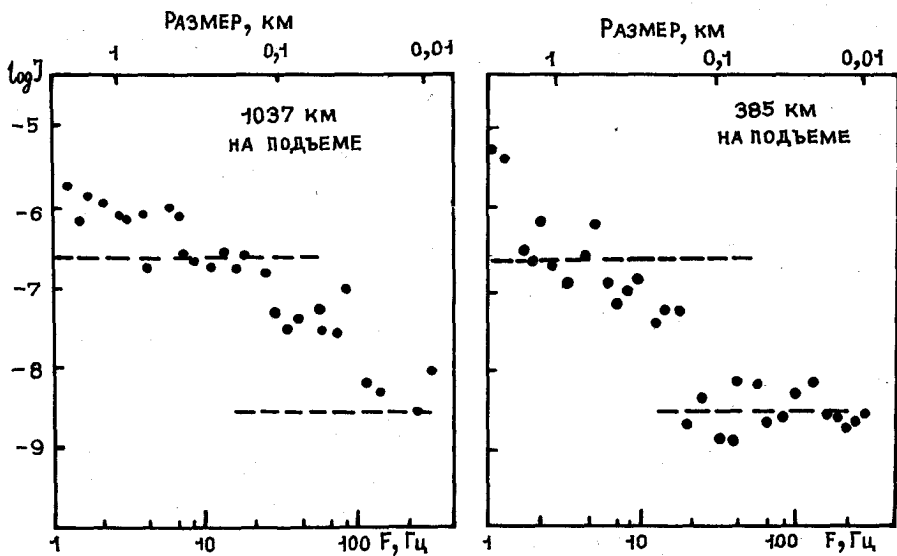


Рис. 2. Распределение спектральной интенсивности на высотах 1037 и 385 км. Пунктирные линии показывают уровень шума на соответствующих частотах

2 порядка, после чего снова спадает более чем на порядок. При этом спектральный индекс в максимуме амплитуды падает более чем в 2 раза, а протяженность спектральной кривой в области высоких частот увеличивается более чем на порядок. Ранее в печати не сообщалось о таком возрастании амплитуды мелкомасштабных неоднородностей на средних широтах. На нисходящей ветви траектории зарегистрированы неоднородности с размерами 1 км и выше с амплитудой (0,1—0,01%). Эти результаты соответствуют данным, получаемым на средних широтах в других экспериментах (см. [6]).

Данные спектроанализатора и зонда Ленгмюра показывают, что повышенная интенсивность неоднородностей совпадает с изолированным обеднением плотности плазмы. Хотя представленные здесь результаты относятся только к двум частотам, спектральная интенсивность была повышенной во всем диапазоне измеренных частот: это указывает на то, что неоднородности с размерами от

нескольких десятков метров до нескольких километров существуют одновременно. Кроме того, оказалось, что спектр флуктуаций плазмы внутри обеднения существенно более плоский, чем вне его.

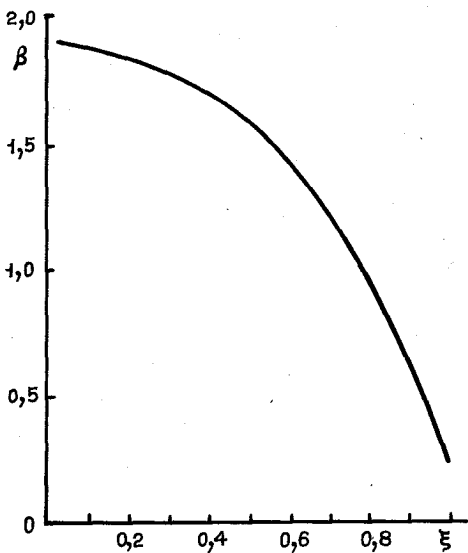
Для выяснения причин образования мелкомасштабных неоднородностей, наблюдаемых на средних широтах, привлекают различные плазменные неустойчивости, а также неплазменные источники (см. обзор [6]).

Градиентно-дрейфовые неустойчивости являются весьма вероятным источником генерации неоднородностей, наблюдаемых в нашем эксперименте. Однако линейная неустойчивость не может объяснить одновременное присутствие неоднородностей, различающихся по размеру более чем на два порядка. Поэтому необходимо привлечь нелинейную градиентно-дрейфовую неустойчивость или механизмы многоступенчатой неустойчивости. Важной теоретической проблемой является малая величина индекса спектра мощности внутри обеднения плотности.

Ряд обстоятельств и особенностей результатов обсуждаемого эксперимента позволяет сделать некоторые выводы. Повышенная интенсивность неоднородностей в области обеднения плотности плазмы свидетельствует о существенно большей амплитуде возмущения плазмы, вызвавшего неоднородность ее структуры. Это может привести к нелинейному изменению профиля волны колебания концентрации скорости и плотности потока частиц. Действительно, теоретическое рассмотрение показывает, что плотность частиц, колеблющихся не в поперечных, а, например, в продольных волнах, всегда совершает негармонические, квазициклоидальные колебания с заостренными максимумами, причем степень этой негармоничности возрастает по мере приближения к единице величины $\xi = a\vec{k}$ — скалярного произведения амплитудного смещения частицы от положения равновесия на волновой вектор. Эта особенность находит многократное подтверждение в исследованиях ионосферной плазмы [7—9]. Увеличение заостренности максимумов, естественно, должно повысить интенсивность высокочастотной части спектра неоднородностей. Это подтверждается результатами модельного расчета индекса спектральной мощности β в случае колебаний с различными величинами ξ от 0,05 до 0,999 и степенным законом спада амплитуды частотных компонент по мере возрастания частоты (рис. 3). Расчет проводился на ЭВМ ЕС-1055 по программе, основанной на фурье-преобразовании функции корреляции заданных величин плотности потока с использованием окна Бартлета [10]. Кривая $\beta(\xi)$ наглядно иллюстрирует нелинейную зависимость β от ξ с медленным снижением β при $\xi \lesssim 0,5$ и крутым спадом при асимптотическом приближении ξ к 1.

Итак, по-видимому, уменьшение спектрального индекса неоднородной структуры ионосферной плазмы на высотах ~ 700 —1100 км

Рис. 3. Результаты модельного расчета индекса спектральной мощности β



было обусловлено не столько уменьшением размеров неоднородностей, сколько возрастанием амплитуды возмущений плазмы и связанным с этим квазициклоидальным искажением формы профиля неоднородностей, что повысило амплитуду высокочастотных гармоник спектра и тем самым замедлило спадание интенсивности спектра с ростом частоты (волнового числа). Это подтверждается и резким обрывом спектральной кривой на частотах 10 Гц, характерным для высот 385 км, которого нет на спектрах, полученных на высотах 1037 км (см. рис. 2). Наличие обрыва спектра свидетельствует об ограниченности спектрального состава сигнала, которая, очевидно, связана с малой амплитудой возмущений, отмеченной на малых высотах.

Переход от кислородной ионосферы к водородной на высотах ~ 1000 км создает благоприятные условия для нарушения равновесной функции распределения частиц по скоростям, возникновения дрейфовых движений плазмы и возбуждения плазменных неустойчивостей (ср. [11, 12]). Возможно, обеднение плазмы на высотах 700—1100 км и связанные с ним эффекты также являются результатом влияния этих факторов при особенно благоприятном стечении обстоятельств.

Литература

1. Dyson P. L., McClure J. P., Hanson W. B//J. Geophys. Res. 1974. 10. 1497—1502.

2. Basu S.//J. Geophys. Res. 1978. 83. A1. 182—190.
3. Clark D. H., Raitt W. J.//Planet. Space Sci. 1976. 24. 9. 873—881.
4. Крысиньски З., Верник А. В., Бембенек Т.//Материалы 4-го национального симпозиума УРСИ по радиотехнике. Познань, 1984.
5. Георгниева К., Иванова Т., Губский В. Ф.//См. настоящий сб. С. 110—115.
6. Fejer B. G., Kelley M. C.//Rev. Geophys. Space. 1980. 18. 2. 401—454.
7. Озеров В. Д.//Сб. трудов международного симпозиума по физике ионосферы, магнитосферы, солнечного ветра. Т. 2. Гурбаново (ЧССР), 1977. С. 243—262.
8. Озеров В. Д.//Волновые возмущения в атмосфере (по результатам исследований в рамках Всесоюзной программы «Волновые возмущения»). Алма-Ата, 1980. С. 173—178.
9. Ozerov V. D.//World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. Boulder, Colorado. Solar-Geophysical Activity Reports for September 7—24, 1977 and November 22, 1977. Report UAG-83. 1982. 1. 174—182.
10. Всехсвятская И. С., Гдалевич Г. Л., Новикова Л. Н. и др.//Взаимодействие коротких радиоволн с ионосферой. М., 1982. С. 111—125.
11. Coppy B., Furth H. P., Rosenbluth M. N. et al.//Phys. Rev. Letters. 1966. 17. 7. 377—379.
12. Coppy B., Rewltdt G., Schep T.//Phys. Fluids. 1976. 19. 8. 1144—1162.