

УДК 551.510.535

## ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ АНИЗОТРОПИИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ АВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛОВ ИСЗ

А. А. Боголюбов, Л. М. Ерухимов, В. А. Кряжев, Е. Н. Мясников

Показано, что при определении формы неоднородностей методом корреляционного анализа флуктуаций сигналов орбитальных ИСЗ необходимо учитывать конечную толщину слоя, содержащего неоднородности. С помощью этого метода установлено, что неоднородности авроральной ионосферы, ответственные за флуктуации амплитуды сигналов, вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля  $H$ ; они имеют форму, близкую к аксиально-симметричной в плоскости, ортогональной  $H$ , и могут быть сосредоточены в локальных областях, протяженных вдоль  $H$  ( $L_H \geq 100 \div 200$  км) и имеющих достаточно малые северо-южные размеры ( $L_{с-ю} \leq 10$  км).

При исследовании неоднородностей  $F$ -области ионосферы наряду с локальными методами измерений с борта ИСЗ и ракет используется метод радиопросвечивания сигналами ИСЗ. Последний метод позволяет получить информацию о форме спектра неоднородностей в плоскости, ортогональной направлению распространения зондирующей радиоволны и по данным измерениям восстановить трехмерную форму спектра неоднородностей. Для этого обычно используются измерения флуктуаций сигнала в нескольких пространственно-разнесенных точках. В работах [1, 2] на основе метода корреляционного анализа, предложенного в [3, 4], был сделан вывод о существовании в авроральной ионосфере неоднородностей, имеющих блинообразную форму.

Форма неоднородностей моделировалась эллипсоидом, одна из осей ( $a$ ) которого была направлена вдоль геомагнитного поля  $H$ , другие оси ( $b, c$ ) — соответственно в геомагнитных направлениях восток — запад и север — юг.

Согласно [2] в широтном разрезе полярной ионосферы наблюдаются неоднородности с отношением характерных масштабов  $a:b:c$ , составляющим 10:10:1, 10:5:1, 3:1:1, 1:1:1. Таким образом, из данных корреляционного анализа следует, что наряду со слабо вытянутыми аксиально-симметричными и даже изотропными неоднородностями в авроральной ионосфере [1] имеются неоднородности слоистые, сильно вытянутые в восточно-западном геомагнитном направлении.

Однако в вопросе о форме неоднородностей в настоящее время имеются противоречия. Согласно [5, 6] неоднородности в районе полярных широт должны быть сильно вытянуты вдоль геомагнитного поля, причем их характерный масштаб вдоль  $H$  в области полярной шапки может составлять 10 ÷ 30 км.

Представляет интерес сопоставление измерений анизотропии неоднородностей в полярной ионосфере методом корреляционного анализа с результатами [5]. Весьма существенно при этом учитывать, что степень корреляции между подобными флуктуациями на антеннах, расположенных в направлении орбитального движения ИСЗ, зависит не только от формы спектра неоднородностей, но также от эффективной толщи рассеивающего зондирующую радиоволну ионосферного слоя.

Поэтому эффективная форма «тени» от неоднородностей, получаемая методом корреляционного анализа, не соответствует форме неоднородностей. Кроме того, данные измерений существенно зависят от характера локализации и размера областей, занимаемых неоднородностями.

Проведенный в настоящей работе анализ результатов измерений степени вытянутости и ориентации корреляционного эллипса показал, что неоднородности должны быть сильно вытянуты вдоль геомагнитного поля  $H$ , причем в плоскости, ортогональной  $H$ , их форма может быть близка к аксиально-симметричной. Значительный разброс экспериментальных значений степени вытянутости и ориентации дифракционной картины, по-видимому, обусловлен неоднородностью «пятен» (пэтчей), где неоднородная мелкомасштабная структура ( $l_{\perp} \leq 1$  км) выражена особенно ярко. Последнее является важной особенностью неоднородной структуры авроральной ионосферы.

**Методика эксперимента.** В данном эксперименте осуществлялся пространственно разнесенный прием сигналов на частоте 400 МГц от орбитальных ИСЗ типа NNSSA в пункте пос. Верхнетуломский Мурманской области.

Указанные спутники имеют полярную орбиту, близкую к круговой, высота которой над поверхностью Земли примерно равна 1000 км. Прием сигналов осуществлялся на три пространственно-разнесенные антенны, расположенные в вершинах равнобедренного треугольника, имеющего основание в направлении восток—запад, равное 150 м, и боковые стороны по 130 м. Скорость съема данных по каждому приемному каналу была порядка 100 Гц, динамический диапазон аналого-цифрового преобразователя составлял 42 дБ.

Длительность обрабатываемых участков варьировалась в зависимости от характера записи и составляла от 1 до 8 секунд.

Для удобства дальнейшего изложения все параметры дифракционной картины будут относиться к плоскости «фазового экрана», ортогональной направлению  $k$  — волнового вектора зондирующей радиоволны. В случае приема сигналов орбитального ИСЗ, скорость движения которого намного превышает характерные скорости движения неоднородностей в ионосфере, перемещение дифракционной картины на Земле вызвано движением спутника. В проекции на плоскость «фазового экрана» скорость движения дифракционной картины  $V_d$  противоположна по знаку скорости спутника  $V_c$ , а величина ее зависит от дальности до рассеивающего неоднородного слоя:

$$V_d = z_n V_c / (z_c - z_n), \quad (1)$$

где  $z_c$  — дальность до ИСЗ,  $z_n$  — дальность до рассеивающего слоя. Измеряемое с помощью трех пространственно-разнесенных антенн направление «кажущейся» скорости дрейфа  $V_k$  дифракционной картины отличается от  $V_d$  и существенно зависит от характера анизотропии ионосферных неоднородностей.

При расположении антенн в вершинах равнобедренного треугольника, имеющих координаты соответственно  $(0;0)$ ,  $(L;0)$  и  $(L/2; (L/2) \operatorname{tg} \theta)$ , где  $\theta$  — угол при основании треугольника, можно определить составляющие скорости  $V_k$  в направлении каждой пары приемных антенн:

$$V_{k_{12}} = \frac{L}{T_{12}}, \quad V_{k_{13}} = \frac{L}{2 \cos \theta T_{13}}, \quad V_{k_{23}} = \frac{L}{2 \cos \theta T_{23}}. \quad (2)$$

Времена  $T_{ij}$  равны значениям сдвигов максимумов соответствующих кросскорреляционных функций.

Очевидно, что в плоскости фазового экрана  $xu$  направление скорости  $V_k$  будет преимущественно совпадать с направлением максимального градиента функции корреляции неоднородностей  $\Gamma_N(x, y)$ . Следовательно, измеряя изменение направления скорости  $V_k$  в течение пролета ИСЗ, можно сделать выводы о характере анизотропии неоднородностей.

По данным разнесенного приема может быть дополнительно определена эффективная пространственная форма флуктуаций дифракционной картины. Для этого вычисляются характеристические скорости  $V_c$ , равные

$$V_{ci} = d_{ij}/\tau_i, \quad (3)$$

где  $d_{ij}$  — расстояние между пространственно разнесенными антеннами,  $\tau_i$  — находится из условия равенства максимума каждой из кросскорреляционных функций значению автокорреляционной функции при временном сдвиге  $\tau_i$ ,

$$\Gamma_{i-j}(\tau_i) = \Gamma_{ij}(T_i). \quad (4)$$

Последнее означает, что коэффициент корреляции дифракционной картины в пространственно разнесенных точках эквивалентен значению функции автокорреляции в момент времени  $\tau_i$ , что, в частности, должно иметь место в случае замороженного переноса дифракционной картины.

С помощью метода корреляционного анализа можно определить на уровне Земли отношение осей  $R_1$  и ориентацию  $\psi_1$  характеристического эллипса, которым аппроксимируются контуры равной корреляции [3]. Для нашей приемной геометрии соотношения имеют вид

$$A = \frac{\tau_2^2 - \tau_3^2}{\operatorname{tg} \theta}, \quad B = \frac{\tau_1^2 (1 + \operatorname{tg}^{-2} \theta)}{2} - \frac{\tau_2^2 + \tau_3^2}{\operatorname{tg}^2 \theta},$$

$$C = \frac{\tau_1^2 (1 - \operatorname{tg}^{-2} \theta)}{2} + \frac{\tau_2^2 + \tau_3^2}{2}, \quad \psi_1 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{A}{B}, \quad (5)$$

$$R_1^2 = \frac{C + \sqrt{A^2 + B^2}}{C - \sqrt{A^2 + B^2}},$$

где  $\psi_1$  — угол в плоскости расположения приемных антенн между направлением малой оси эллипса и направлением на восток.

При интерпретации результатов измерений необходимо учитывать, что форма и ориентация характеристического эллипса определяются не только формой спектра неоднородностей, но и эффективной толщиной  $(\Delta z/z)_{\text{эфф}}$  рассеивающего неоднородного слоя. Можно показать, например, что при условии малых флуктуационных набегов фазы ( $S_0^2 \ll 1$ ) и  $(\Delta z/z)_{\text{эфф}} < 1$  функция корреляции флуктуаций поля  $\Gamma_E(x)$  между антеннами, расположенными на расстоянии  $x_1$  в направлении движения ИСЗ, пропорциональна  $\Gamma_N\{x_1 (\Delta z/z)_{\text{эфф}}\}$  — функции корреляции неоднородностей концентрации для значения аргумента, равного  $x (\Delta z/z)_{\text{эфф}}$ . В то же время в направлении, ортогональном  $V_c$ , с учетом сферической расходимости радиоволны имеем

$$\Gamma_E(y_1) \sim \Gamma_N(y(z_c - z_n)/z_c). \quad (6)$$

В силу рассмотренных соотношений характеристические эллипсы, измеряемые на эксперименте, не могут рассматриваться в качестве эффективной «тени» от неоднородности. Для правильной интерпретации

данных необходимо учитывать изменение степени корреляции флуктуаций поля за счет эффективной толщины рассеивающего слоя.

**Экспериментальные результаты.** На рис. 1 показаны результаты корреляционной обработки пролета 04.03.82 г. (21<sup>10</sup> UT), полученные в пос. Верхнегуломский для сигнала на частоте 400 МГц ИСЗ NNSSA. На графиках приведены в зависимости от азимута ИСЗ  $A_c$  значения следующих величин:

- отношения осей  $R$  характеристических эллипсов в плоскости, ортогональной волновому вектору  $k$  зондирующей радиоволны,
- угла  $\varphi$  между проекцией направления  $V_k$  на плоскость, ортогональную  $k$ , и горизонтальной осью в этой плоскости,
- угла  $\psi$  между направлением малой оси эллипса и горизонтальной осью.

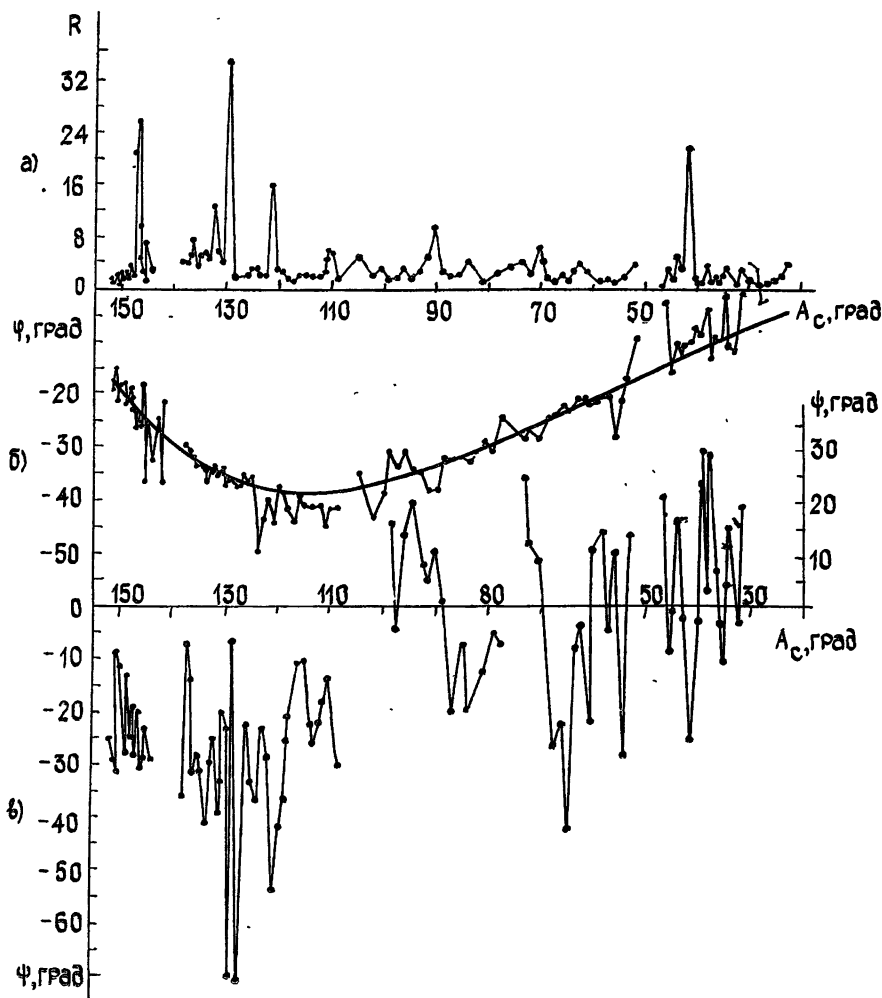


Рис. 1.

Согласно [6], направление скорости  $V_k$  хорошо соответствует нормали к проекции на плоскость «фазового экрана» направления геомагнитного поля  $H$ . Модельный расчет нормали к проекции  $H$  приведен на том же графике (б) плавной кривой. Последнее, как было отмечено в [6], свидетельствует о том, что неоднородности ионосферы сильно

вытянуты вдоль  $H$ , поэтому измеряемые флуктуации амплитуды сигнала ИСЗ отражают поперечную к  $H$  структуру неоднородностей.

Из приведенных данных видно, что зависимость от азимута угла  $\psi$ , определяющего ориентацию малой оси характеристического эллипса, существенно отличается от аналогичной зависимости угла  $\phi$ . Имеет место также значительно больший разброс значений для угла  $\psi$ . При интерпретации результатов измерений предполагалось, что в плоскости, ортогональной лучу  $k$ , координаты  $x$  (в направлении движения ИСЗ) и  $y \perp x$  на высоте  $z_H$  рассеивающего слоя и на уровне расположения приемных антенн  $x_1$  и  $y_1$  (при  $z = 0$ ) связаны следующими соотношениями:

$$x_1 = x (\Delta z / z_H)_{\text{эфф}}, \quad y_1 = y z_c / (z_c - z_H) \sim y. \quad (7)$$

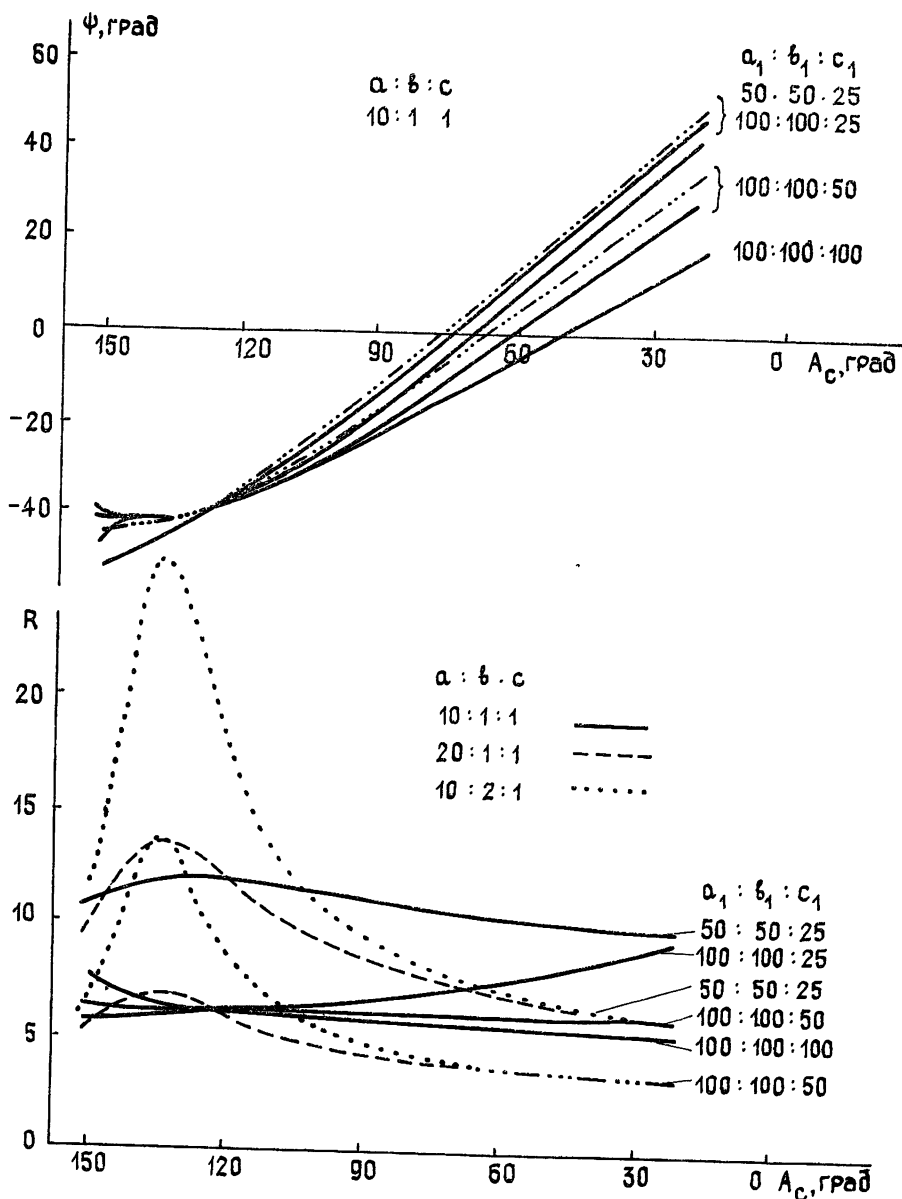


Рис. 2.

С учетом преобразований (7) в плоскости, ортогональной  $k$ , рассчитывались угол  $\psi$  и отношение осей  $R$  эллипса эффективной «тени» от неоднородности, задаваемой формой трехосного эллипсоида. На рис. 2 представлены соответствующие зависимости для неоднородностей, имеющих различные значения отношений главных осей  $a:b:c$ , где ось  $a$  — направлена вдоль  $H$ ,  $b$  — вдоль направления геомагнитный восток—запад,  $c$  — соответственно север—юг. Считалось, что величина  $\Delta z_{\text{эфф}}$  может быть представлена также формой эллипсоида с характерными размерами главных осей  $a_1, b_1, c_1$ , расположенных в указанных направлениях.

Из результатов расчета хорошо видно, что экспериментальным данным удовлетворяет модель вытянутых вдоль  $H$  неоднородностей, форма которых близка к аксиально-симметричной, причем характерные отношения осей  $a/b, a/c$  составляют порядка  $10 \div 20$ . Значительный разброс значений  $\psi$  и  $R$ , полученных в эксперименте, может быть обусловлен изменениями эффективной толщины  $\Delta z_{\text{эфф}}$ . Видно, что для данного пролета при  $\Delta z_{\text{эфф}} = \text{const}$  значение  $R$  для аксиально-симметричных неоднородностей практически не зависит от положения ИСЗ, однако существенно изменяется при изменении  $\Delta z_{\text{эфф}}$ . Большим значениям  $R$  соответствует малая величина  $\Delta z_{\text{эфф}}$ . С этой точки зрения представляет интерес использование данного метода для диагностики локальных неоднородных образований в ионосфере — «пятен», где неоднородная структура имеет существенно иные характеристики. Как правило, в этих областях имеет место резкое увеличение интенсивности флуктуаций электронной концентрации.

На рис. 3 для того же пролета приведены значения индекса флуктуаций [7]

$$S_4 = (1/0,52) (\sqrt{\langle \Delta A^2 \rangle} / \langle A \rangle) \quad (8)$$

и значения показателя степени  $p$  степенного спектра флуктуаций амплитуды  $S_A(\nu) \sim \nu^{-p}$  для частот  $\nu$ , больших частоты  $\nu_0 \sim 5 \div 8$  Гц насыщения спектра. Для сравнения на том же графике приведены значения параметра  $R$ .

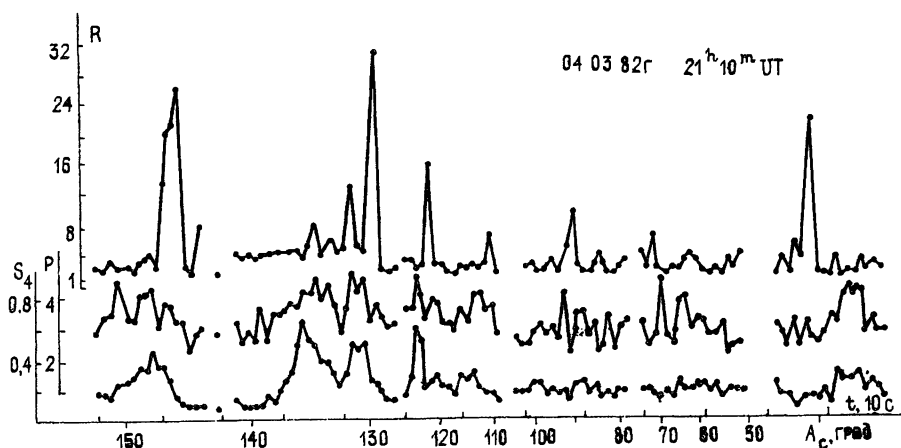


Рис. 3.

Из рисунка видно, что в областях, где имеют место большие флуктуации  $S_4$ , наблюдается также большой разброс значений параметра  $R$ . Интересно отметить, что значения показателя степени  $p$  тоже испытывают значительные флуктуации.

Заметим, что наличие четко выраженных локальных областей является характерной особенностью неоднородной структуры авроральной ионосферы.

На рис. 4 приведен пример регистрации амплитуды сигнала ИСЗ на частоте 400 МГц для пролета 26.02.82 г. (21<sup>15</sup> UT) по трем разнесенным каналам. На записи хорошо видны две узкие зоны увеличения индекса мерцаний. Характерные длительности зон составляют  $2 \div 4$  с, что соответствует масштабам в направлении север—юг  $L_{с-ю} \approx 7 \div 15$  км.

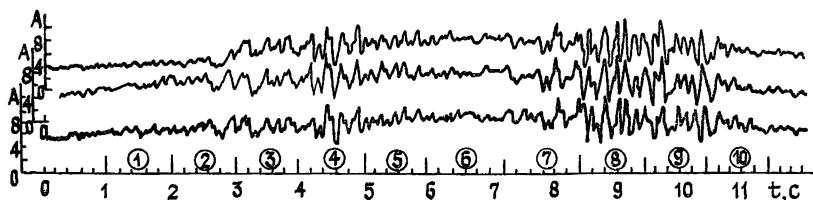


Рис. 4

На рис. 5 показано распределение эффективных высот неоднородностей. Цифры на рисунке соответствуют интервалам осреднения, указанным на рис. 4. Из рис. 4 видно, что локальные неоднородные «пятна» представляют протяженные структуры, вертикальные масштабы которых составляют  $100 \div 200$  км. Проекция структуры пятна на меридиональную плоскость составляет угол с горизонтом около  $78^\circ$ , что примерно совпадает с наклоном геомагнитного поля вблизи пункта наблюдения. Последнее свидетельствует о вытянутости областей вдоль  $H$ . Для данного пролета локальные «пятна» наблюдались при распространении зондирующей радиоволны в направлениях, близких к  $H$ , что позволило четко разрешить вертикальную структуру неоднородных областей. Представляет интерес исследовать размеры «пятен» в восточно-западном направлении. Эксперимент показывает, что наиболее часто локальные области регистрируются при распространении волны в направлении геомагнитной  $L$ -оболочки. Последнее, по-видимому, свидетельствует о протяженности пятен в геомагнитном восточно-западном направлении. Анализ этих результатов предполагается провести в дальнейшем.

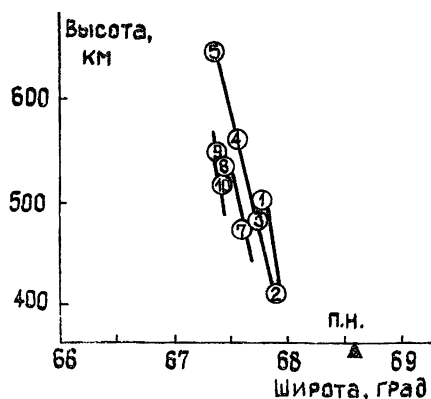


Рис. 5.

В настоящей работе показано, что при использовании для определения эффективной формы неоднородностей метода пространственно разнесенного приема сигналов орбитальных ИСЗ необходимо учитывать эффективные пространственные размеры областей, содержащих неоднородности. Измерения, проведенные в условиях авроральной ионосферы, свидетельствуют о том, что часто наблюдаются случаи, когда неоднородная структура наиболее ярко выражена в отдельных областях—«пятнах», размеры которых в направлении геомагнитного поля  $H$  составляют  $L_H \geq 100 \div 200$  км, в северо-южном направлении могут быть достаточно малы:  $L_{с-ю} \leq 10$  км.

Результаты корреляционного анализа флуктуаций сигналов свидетельствуют о том, что неоднородности плазмы с масштабами  $100 \text{ м} \ll \leq L_{\perp} \leq 10 \text{ км}$  сильно вытянуты вдоль  $H$  и имеют форму, близкую к аксиально-симметричной.

Авторы благодарят А. М. Лернера и Н. А. Овчинникова за помощь при проведении модельных расчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Rino C. L., Livingston R. C., Matthews S. Y.—J. Geophys. Res. Lett., 1978, 5, № 12, p. 1034.
2. Livingston R. C., Rino C. L., Owen J., Tsunoda R. T.—J. Geophys. Res., 1982, 87, № 12, p. 10519.
3. Briggs B. N., Phillips G. J., Shiun D. H.—Proc. Phys. Soc., 1950, 53, p. 106.
4. Armstrong J. W., Coles W. A.—J. Geophys. Res., 1972, 77, № 25, p. 4602.
5. Ерухимов Л. М., Лернер А. М., Косоларенко В. И., Мысликов Е. Н.—Planet. Space Sci., 1981, 29, № 9, p. 931.
6. Ерухимов Л. М., Боголюбов А. А. и др. — Геомагнетизм и аэронавигация, 1983, № 6, с. 20.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию  
10 октября 1983 г.

#### ON VARIATIONS OF IRREGULARITY ANISOTROPY OF THE AURORAL IONOSPHERE BY AES SIGNALS

A. A. Bogolyubov, L. M. Erukhimov, V. A. Kryazhev, E. N. Myasnikov

It is shown that it is necessary to take into account the effective depth of the scattering layer containing small-scale irregularities when studying the form of irregularities by the method of the correlation analysis of the orbital AES signal fluctuations. It is estimated by this method that irregularities of the auroral ionosphere responsible for the signal amplitude fluctuations are elongated along field lines of the geomagnetic field  $H$  and have the form close to the axially symmetric one. As a rule the most intensive irregularities are concentrated in local regions the dimensions of which in the direction  $H$  amount  $L_H \geq 100-200 \text{ км}$ , in the geomagnetic N—S direction  $L_{N-S} \leq \leq 10 \text{ км}$ , in the geomagnetic E—W direction these regions have a larger expansion than in N—S one ( $L_{E-W} > L_{N-S}$ ), respectively.

---