

## Уравнение дистанционного радиозондирования в методе частичных отражений

С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина МОН Украины,  
61077, пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина  
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 27 сентября 2007 г.*

Получено уравнение дистанционного зондирования в методе частичных отражений. Проведены модельные и экспериментальные исследования высотной, частотной, сезонной и суточной зависимостей отношения сигнал/помеха для обыкновенной и необыкновенной компонент частично отраженного сигнала. Изучено влияние магнитной активности на величину этого отношения. Показано, что результаты модельных и экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются между собой.

### Введение

Одним из эффективных методов дистанционного радиозондирования (ДР) нижней ионосферы (60 ÷ 90 км) является метод частичных отражений (ЧО). Данный метод был предложен в 1953 г. Гарднером и Поззи [1] и используется для высотно-временного мониторинга таких ионосферных параметров, как концентрация электронов (см., например, [2-4]), частота соударений электронов с нейтралами [2], величина и направление скорости атмосферного ветра [5-7] и др. В последнее время метод ЧО применяется для выявления и оценки параметров волновых возмущений (ВВ) [8-10].

При проектировании и эксплуатации средних и высокочастотных радаров для ДР методом ЧО важной является априорная информация о высотном диапазоне применимости метода ЧО, его работоспособности в возмущенных условиях, а также об оптимальных характеристиках измерительной установки. До настоящего времени этот вопрос решался экспериментальным путем. Поэтому возникла необходимость в нахождении теоретической зависимости параметров частично отраженного сигнала от различных моделей среды и в их сравнении с резуль-

татами экспериментов. Теоретические исследования нужны также для расчета погрешностей определения электронной концентрации, скорости и направления ветра, относительной амплитуды ВВ и др.

Целью работы является получение и анализ основного уравнения ДР в методе ЧО, исследование зависимости отношения сигнал/помеха от времени суток, сезона и уровня магнитной активности, а также сравнение модельных и экспериментальных результатов.

### Исходные соотношения

Как известно [11], основным уравнением ДР называют уравнение, связывающее параметры сигнала с параметрами исследуемого объекта. В нашем случае им является рассеивающий объект, а в качестве параметра радиосигнала удобно выбрать отношение сигнал/помеха по мощности  $q$ .

Для нахождения  $q$  воспользуемся теорией ДР и радиолокации (см., например, [11-13]).

Определим эффективную площадь рассеяния (ЭПР)  $\sigma$  объема нижней ионосферы как площадь эквивалентного изотропного рассеи-

вателя, создающего то же значение рассеянной мощности вблизи рассеивающего объема, что и реальный объект исследования. Плотность потока энергии у рассеивающего объема определяется следующим соотношением:

$$\Pi_1 = \frac{PG}{4\pi R_1^2} e^{-2K_1}, \quad (1)$$

где  $P$  – импульсная мощность передающего устройства;  $G$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $R_1$  – расстояние от передающей системы до цели;  $K_1$  – интегральный коэффициент поглощения по напряженности поля волны, прошедшей расстояние  $R_1$ .

Мощность, рассеиваемая целью, составляет:

$$P_{s0} = \Pi_1 \sigma. \quad (2)$$

Плотность потока рассеянной энергии у приемной антенны равна

$$\Pi_2 = \frac{P_{s0}}{4\pi R_2^2} e^{-2K_2} = \Pi_{20} e^{-2K_2}. \quad (3)$$

Здесь  $K_2$  – интегральный коэффициент поглощения по напряженности поля волны на пути от цели до приемной антенны  $R_2$ ;  $\Pi_{20} = P_{s0}/4\pi R_2^2$  – то же, что и  $\Pi_2$  в отсутствие поглощения радиосигнала.

Подставляя (2) в (3), получим окончательное выражение для ЭПР:

$$\sigma = 4\pi R_2^2 \frac{\Pi_2}{\Pi_1} e^{2K_2} = 4\pi R_2^2 \frac{\Pi_{20}}{\Pi_1} = 4\pi R_2^2 \rho, \quad (4)$$

где  $\rho = \Pi_{20}/\Pi_1$  – модуль коэффициента отражения (рассеяния) радиоволн по мощности.

Из соотношения (3) с учетом (1) и (2) следует, что плотность потока энергии  $\Pi_2 = \Pi_2(R_1, R_2)$  определяется выражением:

$$\Pi_2 = \frac{PG\sigma}{(4\pi R_1 R_2)^2} e^{-2(K_1+K_2)}. \quad (5)$$

В случае излучения вертикально вверх и однопозиционного зондирования  $R_1 = R_2 = h$ ,  $K_1 = K_2 = K$  и соотношения (4), (5) для  $\sigma(h)$  и  $\Pi_2(h)$  принимают вид:

$$\sigma = 4\pi h^2 \rho, \quad \Pi_2 = \frac{PG\sigma}{(4\pi h^2)^2} e^{-4K}.$$

Здесь  $h$  – высота средней части рассеивающего объема. (Обычно высотная протяженность импульсного объема  $c\tau/2 \ll h$ , где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\tau$  – длительность зондирующего импульса.)

Мощность сигнала на выходе приемной антенны

$$P_s = \Pi_2 S_a = \frac{PGS_a\sigma}{(4\pi h^2)^2} e^{-4K},$$

где  $S_a$  – эффективная площадь приемной антенны. Тогда величина  $q$  будет определяться из соотношения:

$$q = \frac{P_s}{P_n} = \frac{PGS_a\sigma}{(4\pi h^2)^2 kT_n \Delta f} e^{-4K}.$$

Здесь  $P_n = kT_n \Delta f$  – мощность помехи и шума;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания радиоприемного устройства;  $T_n$  – эквивалентная шумовая температура, определяемая в диапазоне частот  $1 \div 10$  МГц в основном уровне внешних помех (атмосферных, промышленных, вызванных радиоизлучением других радиосистем и т. п.).

С учетом потерь  $L_{af}$  и  $L_p$ , возникающих соответственно в антенно-фидерном тракте и в канале распространения, уравнение ДР при вертикальном зондировании можно записать в общем виде:

$$q = \frac{PGS_a\sigma}{(4\pi h^2)^2 L_{af} L_p kT_n \Delta f} e^{-4K}. \quad (6)$$

Заметим, что множитель  $L_p$  учитывает другие механизмы ослабления сигнала (кроме поглощения) при его распространении, например, за счет рассеяния неоднородностями среды.

Найдем коэффициент отражения в методе ЧО. Механизм ЧО до настоящего времени дискутируется. Возможны следующие механизмы: объемное рассеяние радиоволн случайными неоднородностями электронной концентрации с характерным размером  $l \sim \lambda$ , где  $\lambda$  – длина радиоволны; френелевское отражение радиоволн резкими градиентами показателя преломления  $n$  (при этом вертикальный размер неоднородностей  $l_z \ll \lambda$ , горизонтальные размеры  $l_{x,y} \gg \lambda$ ); комбинация двух этих механизмов [14]. Наиболее простые соотношения получаются в случае френелевского механизма. Теория объемного рассеяния более физична и позволяет корректно учесть конечность рассеивающего объема. Важно, что теория, учитывающая оба механизма, дает в практически интересных случаях примерно те же результаты, что и две первые теории. Различие в амплитудах ЧО сигнала редко превышает 10 % [15].

Будем считать для простоты, что имеет место френелевское отражение радиоволн. Хорошо известно, что при нормальном падении на границу раздела двух сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  коэффициент отражения по напряженности поля

$$\rho_E = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} = \frac{\Delta n}{n_2 + n_1}.$$

При  $n_2 \approx n_1 = n$  имеем  $\rho_E \approx \Delta n/2n$ . Тогда при  $n_{o,x} \approx 1$  среднее по ансамблю реализаций значение модуля  $\rho$  равно

$$\bar{\rho}_{o,x} \approx \frac{|\overline{\Delta n_{o,x}}|^2}{4}, \quad (7)$$

где индексы  $o$  и  $x$  относятся к обыкновенной и необыкновенной компонентам радиоволны,  $n_{o,x}$  и  $\Delta n_{o,x}$  – соответственно комплексный показатель преломления и его флуктуации. В квазипродольном приближении теории Эппл-

тона–Хартри [16] с учетом кинетических поправок [17] выражение для  $n$  (при  $|n-1| \ll 1$ ) примет следующий вид:

$$n_{o,x} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{B_1 \omega_p^2 (\omega \pm \omega_L)}{\omega [( \omega \pm \omega_L )^2 + (B_2 v)^2]} - i \frac{1}{2} \frac{\omega_p^2 v}{\omega [( \omega \pm \omega_L )^2 + (A v)^2]}. \quad (8)$$

Здесь  $\omega = 2\pi f$  – циклическая частота радиоволны,  $\omega_p$  – циклическая плазменная частота,  $\omega_L$  – продольная составляющая гирочастоты электронов (как известно, гирочастота является псевдовектором),  $v$  – частота соударений моноэнергетических электронов с нейтралами. В выражении (8)  $A = 0.84$ ,  $B_1 = 2.18$ ,  $B_2 = 0.76$  [17].

Из (8) находим, что

$$\Delta n_{o,x} \approx -\frac{1}{2} \frac{\omega_p^2}{\omega} \left( \frac{B_1 (\omega \pm \omega_L)}{(\omega \pm \omega_L)^2 + (B_2 v)^2} + i \frac{v}{(\omega \pm \omega_L)^2 + (A v)^2} \right) \frac{\Delta N}{N},$$

$$\overline{|\Delta n_{o,x}|^2} \approx \frac{1}{4} \frac{\omega_p^4 (B_1^2 (\omega \pm \omega_L)^2 + v^2) \overline{\sigma_N^2}}{\omega^2 [( \omega \pm \omega_L )^2 + (A v)^2]^2}, \quad (9)$$

где  $N$  – концентрация электронов,  $\Delta N$  – ее флуктуации,  $\overline{\sigma_N^2} = (\Delta N/N)^2$  – дисперсия относительных флуктуаций  $N$ . При получении соотношения (9) для простоты полагалось, что  $A \approx B_2$ .

Подставляя (7) и (9) в (4), получим выражение для ЭПР в методе ЧО:

$$\sigma_{o,x} = \frac{\pi h^2 \omega_p^4 (B_1^2 (\omega \pm \omega_L)^2 + v^2) \overline{\sigma_N^2}}{4 \omega^2 [( \omega \pm \omega_L )^2 + (A v)^2]^2}. \quad (10)$$

С учетом (10) основное уравнение ДР (6) в методе ЧО принимает следующий вид\*:

$$q_{o,x} = \frac{PGS_a \widetilde{\sigma}_N^2}{64\pi h^2 L_{cf} L_p k T_n \Delta f} \times \frac{\omega_p^4 (B_1^2 (\omega \pm \omega_L)^2 + v^2)}{\omega^2 [(\omega \pm \omega_L)^2 + (Av)^2]} e^{-4K_{o,x}}. \quad (11)$$

В случае, если  $(\omega \pm \omega_L)^2 \gg v^2$ , выражение (11) упрощается:

$$q_{o,x} = \frac{PGS_a \widetilde{\sigma}_N^2}{64\pi h^2 L_{cf} L_p k T_n \Delta f} \frac{\omega_p^4}{\omega^2 (\omega \pm \omega_L)^2} e^{-4K_{o,x}}. \quad (12)$$

Если  $(\omega \pm \omega_L)^2 \ll v^2$ , то выражение (11) примет следующий вид:

$$q_{o,x} = \frac{PGS_a \widetilde{\sigma}_N^2}{64\pi h^2 L_{cf} L_p k T_n \Delta f} \frac{\omega_p^4}{A^2 \omega^2 v^2} e^{-4K_{o,x}}. \quad (13)$$

Исходя из (11)–(13), проанализируем зависимости  $q_{o,x}$  от параметров установки и изучаемой среды. Видно, что  $q_{o,x} \propto P/\Delta f \approx P\tau = E$ , т. е. прямо пропорционально энергии зондирующего импульса. (Здесь считается, что осуществляется квазиоптимальная фильтрация, при которой длительность зондирующих импульсов  $\tau \approx \Delta f^{-1}$ ). Кроме того, поскольку  $q_{o,x} \propto GS_a$ , а  $S_a \propto G$ , то  $q_{o,x}$  также прямо пропорционально квадрату коэффициента усиления передающей антенны. Заметим, что  $q_{o,x} \propto h^{-2}$ . Зависимость от высоты более слабая, чем в радиолокации точечных целей, где  $q \propto h^{-4}$ . Величина  $q_{o,x} \propto \omega_p^4$  и, следовательно, пропорциональна квадрату электронной концентрации. В нижней ионосфере значение  $N$  изменяется на четыре порядка, что приводит к вариациям

$q_{o,x}$ , составляющим восемь порядков величины. Имеет место также сильная зависимость  $q_{o,x}$  от рабочей частоты радара  $f$ . В наиболее интересной области высот, где  $(\omega \pm \omega_L)^2 \gg v^2$ ,  $q_{o,x} \propto \omega^{-2} (\omega \pm \omega_L)^{-2}$ . В частности, при  $\omega \gg \omega_L$  получаем, что  $q_{o,x} \propto \omega^{-4} \propto f^{-4}$ . Наконец, отношение сигнал/помеха линейным образом зависит от дисперсии флуктуаций электронной концентрации.

### Результаты компьютерного моделирования

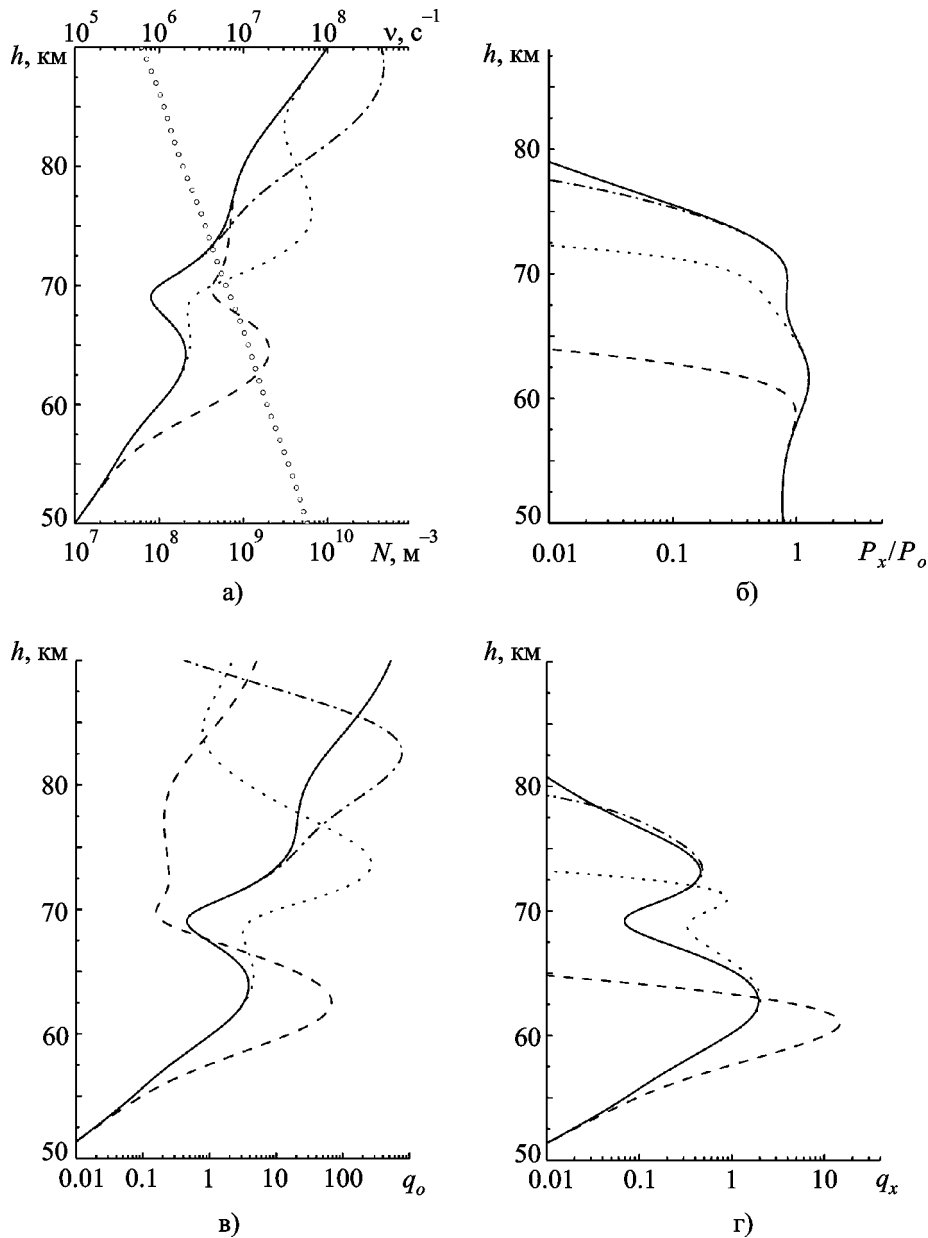
Целью компьютерного моделирования было исследование зависимости отношения сигнал/помеха для обыкновенной ( $q_o$ ) и необыкновенной ( $q_x$ ) компонент частично отраженного сигнала от высоты, времени суток, а также от частоты зондирующей радиоволны в спокойных и магнитовозмущенных условиях. Такие зависимости позволяют определить высотно-частотный диапазон, для которого метод ЧО является эффективным, а значит, и условия, при которых погрешность полученных с его помощью результатов не превышает наперед заданной величины.

Модельные профили  $v(h)$  и  $N(h)$  дневной и ночной нижней ионосферы, используемые для получения  $q_{o,x}$ , представлены на рис. 1, а и рис. 2, а соответственно. Они описывают спокойную ионосферу, а также появление слоев повышенной концентрации, вызванных высыпаниями частиц различных энергий в периоды геомагнитных возмущений. В спокойных условиях в дневное время в профиле  $N(h)$  может возникать впадина, свидетельствующая о существовании слоев С (при  $h \leq 70$  км) и D (при  $h \geq 70$  км).

Профиль  $v(h)$  для всех условий принимался одинаковым (см. рис. 1, а). Для простоты считалось, что масштаб изменений  $v(h)$  в пределах нижней ионосферы остается неизменным. Это привело к некоторому завышению значений  $v$  на высотах 80 ÷ 90 км, что из-за сильного поглощения радиосигналов при  $h \lesssim 80$  км, однако, не вызвало значительных изменений в результатах моделирования.

Высотные и частотные зависимости отношения сигнал/помеха рассчитывались с учетом параметров радара ЧО, расположенного в Ра-

\*Уравнение подобного вида (без учета кинетических поправок  $A$  и  $B_1$ ) впервые было получено и детально проанализировано одним из соавторов, Л. Ф. Черногором, в 1972 г. Оно было опубликовано в малодоступной статье.



**Рис. 1.** Модельные профили электронной концентрации и частоты соударений моноэнергетических электронов (кружки) (а), высотные зависимости отношения мощностей необыкновенной и обыкновенной компонент частично отраженного сигнала (б), а также отношений сигнал/помеха для обыкновенной (в) и необыкновенной (г) компонент рассеянного сигнала в дневное время для различных моделей среды: спокойные условия (сплошная линия), наличие слоя с максимумом ионизации на высотах 65 км (штриховая линия), 75 км (пунктирная линия) и 85 км (штрих-пунктирная линия)

диофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина. Значения этих параметров следующие:  $PG \approx 10$  МВт,  $S_a \approx 10^5$  м<sup>2</sup>,  $f = 2.4$  МГц,  $\Delta f \approx 60$  кГц. Считалось, что  $T_n$  равнялась

$1.5 \cdot 10^8$  и  $1.5 \cdot 10^9$  К для дневного и ночного времени суток соответственно [18-20]. Заметим, что в ночное время значение  $P_n$ , а значит и  $T_n$ , на порядок выше, так как уменьшается поглощение радиоволн в ионосфере. Значения

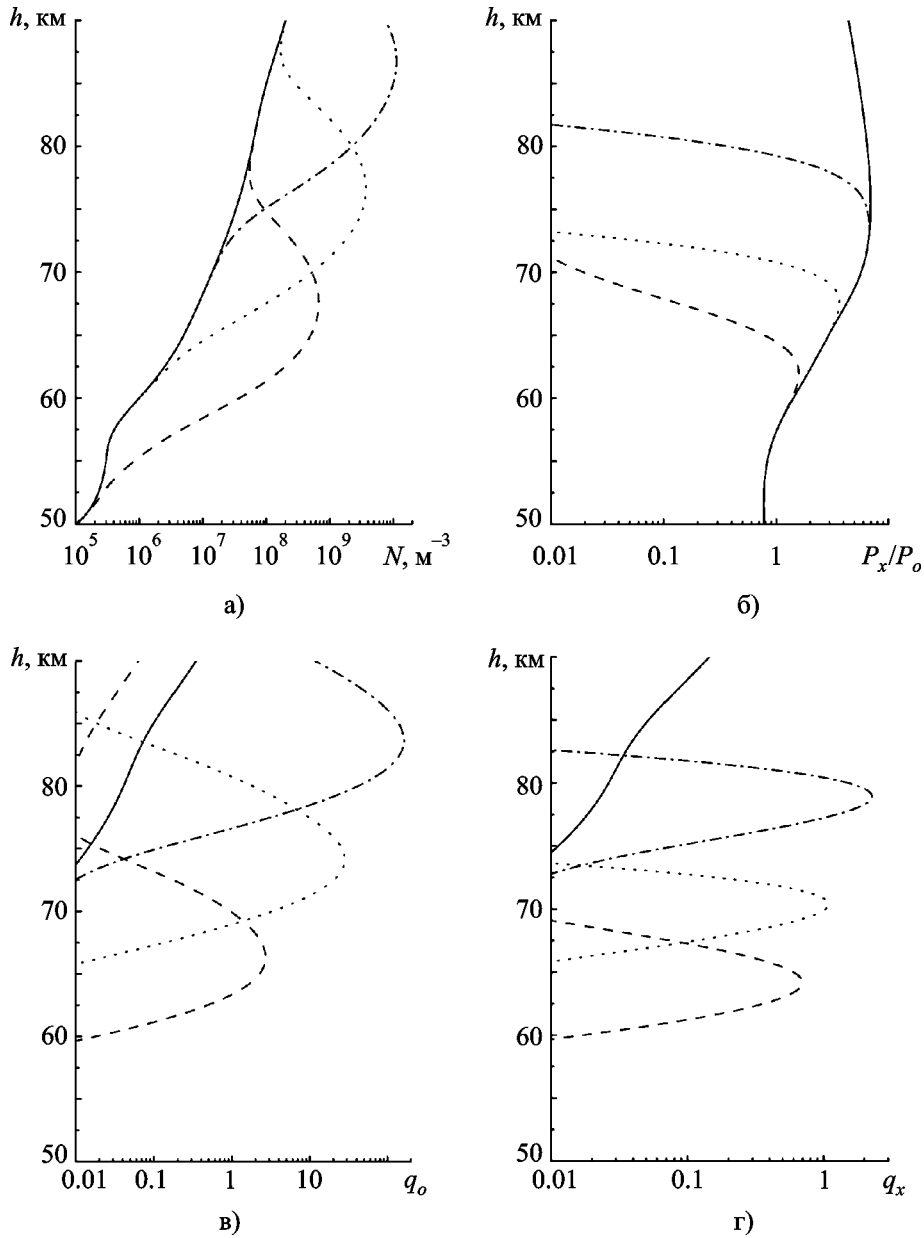


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для ночного времени

$\widetilde{\sigma}_N^2$  обычно лежат в пределах  $10^{-4} \div 10^{-2}$ . Для расчетов было выбрано наиболее вероятное значение  $\widetilde{\sigma}_N^2 \approx 10^{-3}$ . Поскольку КПД передающей антенны  $\eta_1 \approx 0.5$ ,  $L_{af} \approx \eta_1^{-1} \approx 2$ . При исследовании нижней ионосферы излучаются радиоволны линейной поляризации. Мощности обыкновенной и необыкновенной компонент радиоволны при входе в ионосферу составляют  $P_{o,x} \approx \eta_2 P$ , где  $\eta_2 \approx 0.5$ . Поэтому  $L_p \approx \eta_2^{-1} \approx 2$ .

Высотные профили отношения мощностей необыкновенной и обыкновенной компонент частично отраженного сигнала, с помощью которых определяется электронная концентрация по методике дифференциального поглощения, показаны на рис. 1, б и рис. 2, б для дневного и ночного времени соответственно. Выражение для упомянутого отношения имеет вид:

$$\frac{P_x}{P_o} \approx \frac{[(\omega + \omega_L)^2 + (Av)^2]^2}{[(\omega - \omega_L)^2 + (Av)^2]^2} \times \left[ \frac{B_1^2(\omega - \omega_L)^2 + v^2}{B_1^2(\omega + \omega_L)^2 + v^2} \right] e^{-4(K_x - K_o)}$$

Из этих рисунков видно, что днем восстановление  $N$  в спокойных условиях и при появлении слоя с максимумом ионизации на высоте 85 км возможно лишь в диапазоне высот  $h \approx 62 \div 80$  км. (Напомним, что восстановление  $N$  возможно лишь на участке, где с ростом  $h$  отношение  $P_x/P_o$  уменьшается [2]). В спокойных условиях принципиально возможно восстановление впадины в профиле  $N(h)$  между слоями С и D, находящейся на высотах  $65 \div 72$  км.

При появлении слоев с максимумами ионизации на  $h_m = 75$  км и  $h_m = 65$  км верхняя граница этого высотного диапазона уменьшается до 72 и 64 км соответственно. В ночное время в спокойных условиях диапазон высот восстановления  $N$  на первый взгляд существенно расширяется. Однако при этом, как будет показано ниже, за счет малых значений  $q_{o,x}$  существенно возрастает погрешность определения  $N$ , что практически затрудняет применение методики дифференциального поглощения в ночное время суток даже в существенно возмущенных условиях.

Высотные зависимости  $q_{o,x}$  для дневного времени суток представлены на рис. 1, в и рис. 1, г соответственно. В спокойных условиях величина  $q_o$  имеет хорошо выраженный максимум на высоте  $h \approx 64$  км. Его значение приближенно равно 4. Величина  $q_x$  имеет два максимума на высотах 63 и 73 км. Их значения составляют около 2 и 0.5 соответственно. Выше 75 км  $q_x$  существенно убывает с ростом высоты (примерно на 4 порядка уже на  $h \approx 87$  км).

В возмущенных условиях зависимости  $q_o(h)$  имеют дополнительный максимум, который располагается ниже максимума ионизации слоя. Для модельных профилей  $N(h)$  среды, изображенных штриховой, пунктирной

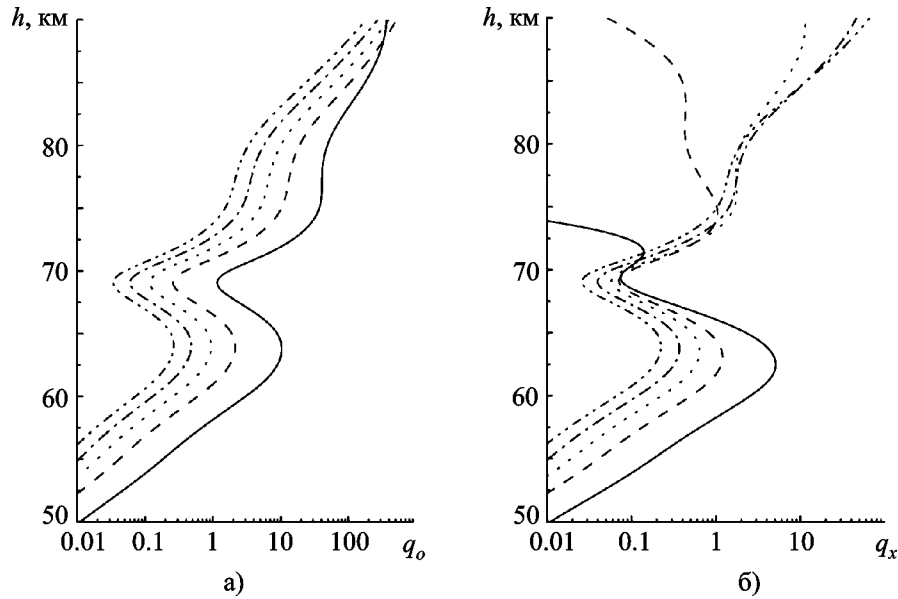
и штрих-пунктирной линиями (см. рис. 1, а) максимумы отношения сигнал/помеха расположены на высотах 63 км ( $q_o \approx 68$ ), 74 км ( $q_o \approx 271$ ) и 83 км ( $q_o \approx 775$ ).

Высотная зависимость  $q_x(h)$  для слоя с  $h_m = 65$  км (штриховая кривая на рис. 1, г) имеет один максимум на высоте 61 км ( $q_x = 15$ ). Для слоя с максимумом ионизации на высоте 75 км  $q_x(h)$  имеет два максимума. Один из них расположен на высоте 63 км, как и при невозмущенных условиях, а другой – на высоте 71 км ( $q_x = 1$ ). Появление слоя с максимумом ионизации на высоте 85 км почти не влияет на высотную зависимость  $q_x$ , поскольку происходит практически полное поглощение необыкновенной компоненты частично отраженного сигнала в нижележащих слоях.

На рис. 2, в и рис. 2, г приведены высотные профили  $q_{o,x}$  для ночного времени. В спокойных условиях  $q_{o,x}$  плавно возрастают с увеличением высоты и достигают при  $h \approx 90$  км значений 0.3 и 0.1 соответственно.

Появление слоя с максимумом ионизации на  $h_m = 65$  км приводит к возникновению максимумов отношений сигнал/помеха на высотах 66 км ( $q_o \approx 3$ ) и 64 км ( $q_x \approx 1$ ) соответственно. Для слоя с  $h_m = 75$  км (пунктирная линия на рис. 2, в и рис. 2, г) максимумы в зависимостях  $q_{o,x}$  располагаются на высотах 74 км ( $q_o = 28$ ) и 70 км ( $q_x \approx 1$ ). Наибольшие значения отношений сигнал/помеха для слоя, максимум ионизации которого расположен на высоте 85 км, составляют  $q_o = 163$  ( $h = 84$  км) и  $q_x \approx 2$  ( $h = 79$  км).

Поведение профилей  $q_{o,x}$  с ростом несущей частоты радиосигнала проиллюстрировано на рис. 3. Показано, что при  $h \leq 87$  км для обыкновенной компоненты радиосигнала имеет место уменьшение  $q_o$  с ростом частоты (рис. 3, а). Для необыкновенной компоненты (рис. 3, б) при увеличении несущей частоты происходит уменьшение  $q_x$  при  $h \leq 70$  км и его увеличение при  $h \geq 85$  км. При изменении  $f$  от 1.6 до 6 МГц отношение  $q_o$  варьируется в пределах  $9 \div 0.2$ ,  $37 \div 1.5$  и  $177 \div 24$  на высотах 65, 75 и 85 км соответственно, а значения  $q_x$  на тех же высотах лежат в пределах  $2 \div 0.2$ ,  $0 \div 1.7$  и  $0 \div 12$ .



**Рис. 3.** Расчетные зависимости профилей отношения сигнал/помеха для обыкновенной (а) и необыкновенной (б) компонент от несущей частоты радиосигнала для профиля  $N(h)$ , изображенного сплошной линией на рис. 1, а. Здесь сплошная, штриховая, пунктирная, штрих-пунктирная линии и линия со штрихом и двумя точками соответствуют частотам 1.6, 3, 4, 5 и 6 МГц

### Результаты экспериментального исследования отношения сигнал/помеха

*Краткие сведения о радаре ЧО.* Основные технические характеристики радара СЧ–ВЧ диапазонов, расположенного в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, следующие: рабочая частота  $f = 2 \div 6$  МГц; частота повторения импульсов  $F_p = 1 \div 100$  Гц; ширина полосы пропускания радиоприемного устройства  $\Delta f = 60$  кГц; импульсная мощность радиопередающего устройства  $P = 100$  кВт; коэффициент усиления антенны  $G \approx 100$ ; разрешение по высоте  $\Delta z \approx 3$  км; диапазон исследуемых высот  $z = 60 \div 132$  км. Более подробное их описание, а также схема антенной системы приведены в работах [20, 21].

*Методика измерения и обработки.* В экспериментах измерялись временные зависимости амплитуд смеси сигнал + помеха  $A_{sn}$  и помеха  $A_n$  с временной дискретизацией 0.1 с

для обыкновенной и необыкновенной компонент сигнала. Далее на интервале времени  $\Delta T = 15$  мин находились оценки  $\overline{A_{sn}^2}$  и  $\overline{A_n^2}$ . После этого для каждой из компонент формировались временные ряды

$$q = \frac{\overline{A_{sn}^2} - \overline{A_n^2}}{\overline{A_n^2}}.$$

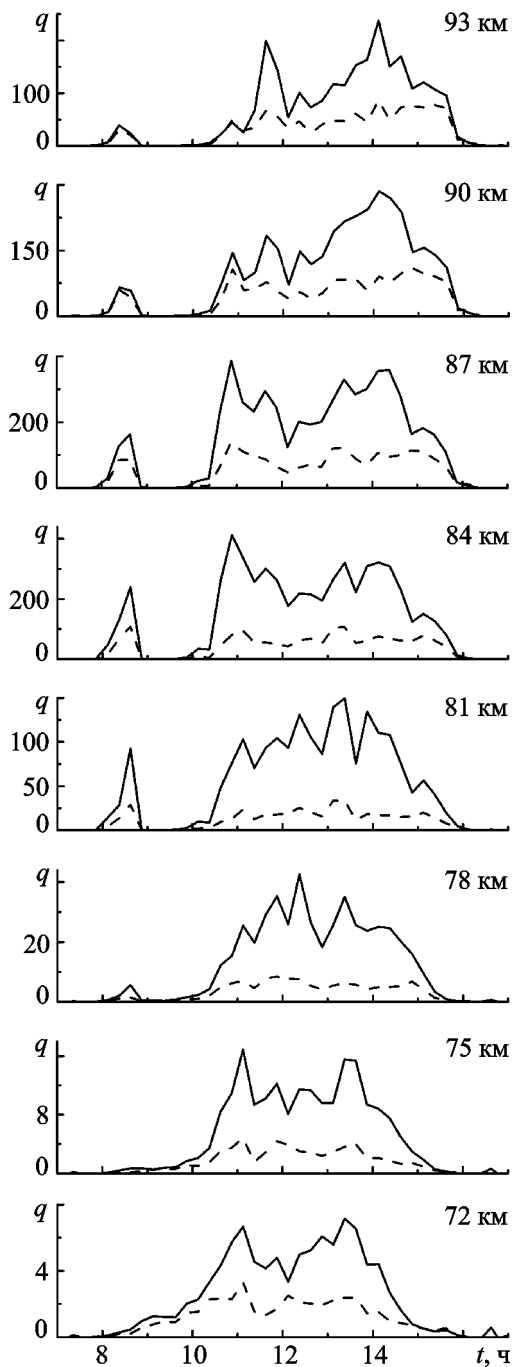
Относительная погрешность оценки  $q$  не превышала 5 %.

Зависимости  $q(t)$  для обеих компонент сигнала ( $q_{o,x}$ ) подлежали дальнейшему анализу.

Более подробно результаты исследований статистических характеристик частично отраженных сигналов и помех описаны в наших работах [20, 22].

*Суточная зависимость.* На рис. 4 показан пример суточной зависимости  $q_o$  и  $q_x$  для ряда высот. В ночное время (не показано на рисунке) обычно  $q_{o,x} < 1$ , иногда имели место отдельные всплески  $q_{o,x}$  продолжительностью 5 ÷ 10 мин.

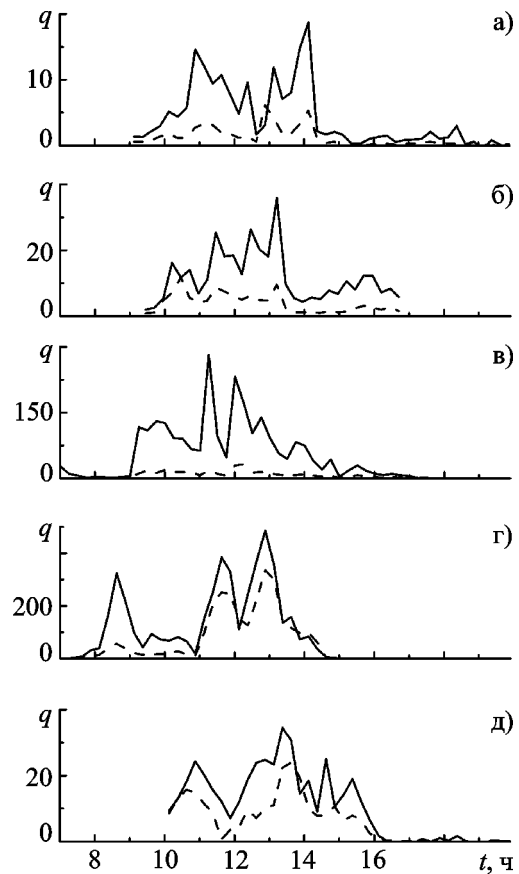




**Рис. 4.** Пример экспериментальной суточно-высотной зависимости отношения сигнал/помеха  $q$  для периода времени года, близкого к зимнему солнцестоянию (20.01.2005 г.). Сплошная и штриховая линии соответствуют обыкновенной  $q_o$  и необыкновенной  $q_x$  компонентам соответственно

В дневное время на различных высотах значения  $q_o$  возрастали до  $8 \div 420$ , а  $q_x$  – до  $4 \div 150$  соответственно. Интервал времени  $\Delta t$ , при котором  $q_{o,x} > 1$ , составлял около 8 ч. Для каждой высоты наблюдались значительные вариации  $q_{o,x}$  в течение дневного времени суток.

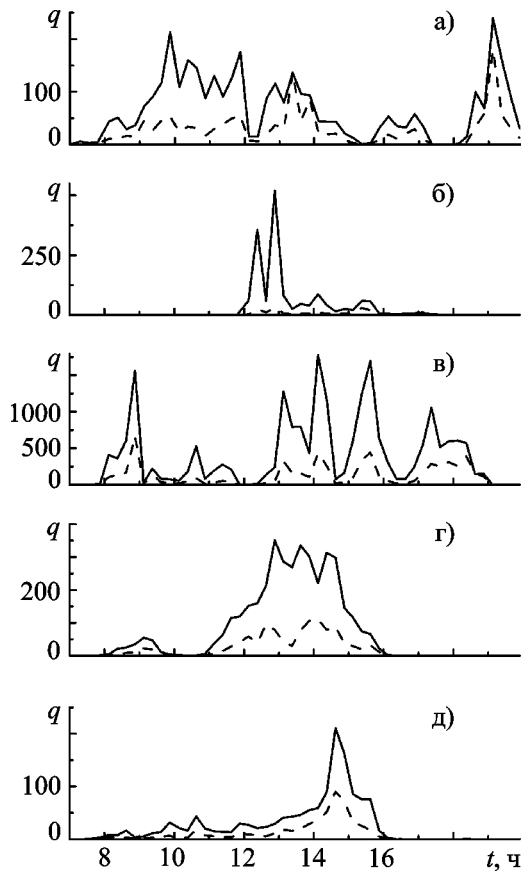
*Сезонная зависимость.* Пример временной зависимости  $q_{o,x}$  для различных сезонов в магнитоспокойных условиях представлен на рис. 5. Из рисунка видно, что интервал  $\Delta t$  изменяется в зависимости от сезона. Он минимален зимой и составляет  $7 \div 8$  ч. Весной и летом значения  $\Delta t$  возрастают до  $10 \div 12$  ч. Максимальные значения  $q_{o,max}$  варьируются от 20 до 500,



**Рис. 5.** Примеры экспериментальной суточно-сезонной зависимости отношения сигнал/помеха  $q$  на высоте 84 км для весеннего (29.03.2005 г.) (а), летнего (09.08.2005 г.) (б), осеннего (29.09.2004 г.) (в) и зимнего (01.12.2004 г. (з) и 02.02.2005 г. (д)) времени года. Сплошная линия –  $q_o$ , штриховая –  $q_x$

а  $q_{x\max}$  – от 5 до 350. Не выявлена статистически значимая зависимость  $q_{o\max}$  и  $q_{x\max}$  от сезона, поскольку их вариации ото дня ко дню в течение одного сезона в ряде наблюдений превышают сезонные вариации (см, например, рис. 5, г и рис. 5, д).

*Влияние магнитной активности.* На рис. 6 приведены временные зависимости  $q_{o,x}$  при высоком уровне магнитной активности (суммарный за сутки индекс  $K_p$  превышал значение 30). В ряде случаев имело место увеличение максимальных значений  $q_{o,x}$  в 5÷10 раз по сравнению с магнитоспокойными сутками.



**Рис. 6.** Примеры экспериментальной зависимости отношения сигнал/помеха  $q$  на высоте 84 км для магнитовозмущенных суток в летнее (13.07.2005 г.) (а), осеннее (03.09.2005 г.) (б), 15.09.2005 г. (в) и зимнее (19.01.2005 г.) (г), и 22.01.2005 г. (д)) время года. Сплошная линия –  $q_o$ , штриховая –  $q_x$

В магнитовозмущенные дни наблюдались также отдельные всплески  $q_{o,x}$  продолжительностью 1÷2 ч. Значения  $q_{o,x}$  в максимумах этих всплесков в 3÷6 раз превышали их средние значения за время наблюдения (см. рис. 6). Значения  $q_{o\max}$  варьировались от 250 до 1800, а  $q_{x\max}$  – от 100 до 600.

## Обсуждение

Уравнение дистанционного радиозондирования методом ЧО позволяет установить границы применимости различных методик определения параметров нижней ионосферы. Обычно при исследовании этих параметров относительная погрешность не превышает 30÷50 % при  $q_{o,x} > 1 \div 3$  [2, 23]. Как видно из рис. 1 и рис. 2, такие значения  $q_{o,x}$  при спокойных условиях достигаются лишь в дневное время на высотах 60÷75 км. Если используется только обыкновенная компонента частично отраженного сигнала (при определении параметров ветра и ВВ), этот диапазон высот составляет 60÷90 км. На  $h < 60$  км отношение сигнал/помеха мало за счет малых значений  $N$ . Уменьшение  $q_x$  при  $h > 75$  км связано с резким возрастанием поглощения необыкновенной компоненты (увеличением  $K_x$ ).

При высоком уровне магнитной активности за счет возникновения слоев повышенной ионизации, вызванных потоками высокоэнергичных частиц, иногда появляется возможность исследования нижней ионосферы и в ночное время (см. рис. 2). Интервал высот, на которых  $q_{o,x} > 1$ , обычно ограничивается толщиной слоя и не превышает 5÷10 км.

Заметим, что дневные профили  $N(h)$  (см. рис. 1, а) соответствуют полуденной нижней ионосфере. Поэтому значения  $N$  близки к максимальным, а высотные интервалы применимости методов (методик) исследования параметров нижней ионосферы, использующих частично отраженные сигналы, являются минимально возможными. При благоприятных условиях (при уменьшении  $N$ , а значит и поглощения радиосигналов и радиопомех) область применимости этих методов расширяется:  $h = 60 \div 85$  км (при восстановлении профилей  $N(h)$ ) и  $h = 60 \div 95$  км (при нахождении скорости ветра и параметров ВВ).

Уменьшение  $q_o$  с ростом частоты при  $h = 60 \div 87$  км указывает на то, что для обыкновенной компоненты в выражении (11) основной вклад дает множитель, стоящий перед экспонентой и отвечающий за отражение (рассеяние) радиоволн. При этом, как следует из (12) и (13),  $q_o$  примерно обратно пропорционально  $f^{-2}$  и  $f^{-4}$  соответственно в нижней и верхней частях исследуемого диапазона высот. Для необыкновенной компоненты ситуация иная. На высотах  $60 \div 70$  км поглощение несущественно (значение  $K_x$  – малое), поэтому  $q_x \propto \bar{p}_x$  и уменьшается с ростом частоты. При  $h \geq 85$  км частотная зависимость  $q_x$  в основном определяется зависимостью  $K_x(f)$ . Поскольку  $K_x \propto f^{-2}$ , на этих высотах наблюдается увеличение  $q_x$  с ростом частоты.

Заметим, что при получении зависимостей  $q_{o,x}(f)$  учитывалось лишь влияние ионосферы на величину отношения сигнал/помеха. При этом эквивалентная шумовая температура для простоты считалась постоянной в диапазоне частот  $1.6 \div 6$  МГц. В реальных условиях с ростом частоты от 1.6 до 6 МГц происходит уменьшение  $T_n$  примерно на порядок величины (см., например, [19]).

Экспериментальные исследования временных зависимостей  $q_{o,x}$  показали, что интервал времени  $\Delta t$  примерно равен длительности светового дня на высотах нижней ионосферы. Этим вызвана сезонная зависимость величины  $\Delta t$ . Как известно, средние значения  $N$  на фиксированных высотах в диапазоне высот  $60 \div 90$  км в течение года изменяются относительно слабо (в  $1.5 \div 2$  раза). В то же время при  $h = \text{const}$  часто наблюдаются существенные вариации  $N$  (на порядок и более) в течение суток или от дня ко дню, что особенно ярко выражено в зимнее время (зимняя аномалия) [24]. Такие вариации имели место и в наших регистрациях (см. рис. 4-6). Они могут быть связаны с распространением атмосферных волн, источниками которых могут служить прохождения погодных фронтов, неравномерный прогрев подстилающей поверхности, “перепады” космической погоды и др. [3, 4, 24]. Подобие временных изменений  $q_{o,x}$  на различных высотах (см. рис. 4) указывает на то, что характерный вертикальный масштаб этих изменений составляет не менее нескольких десятков километров.

Определенный вклад в вариации  $q_{o,x}$  вносит также непостоянство  $T_n$  в течение времени наблюдения.

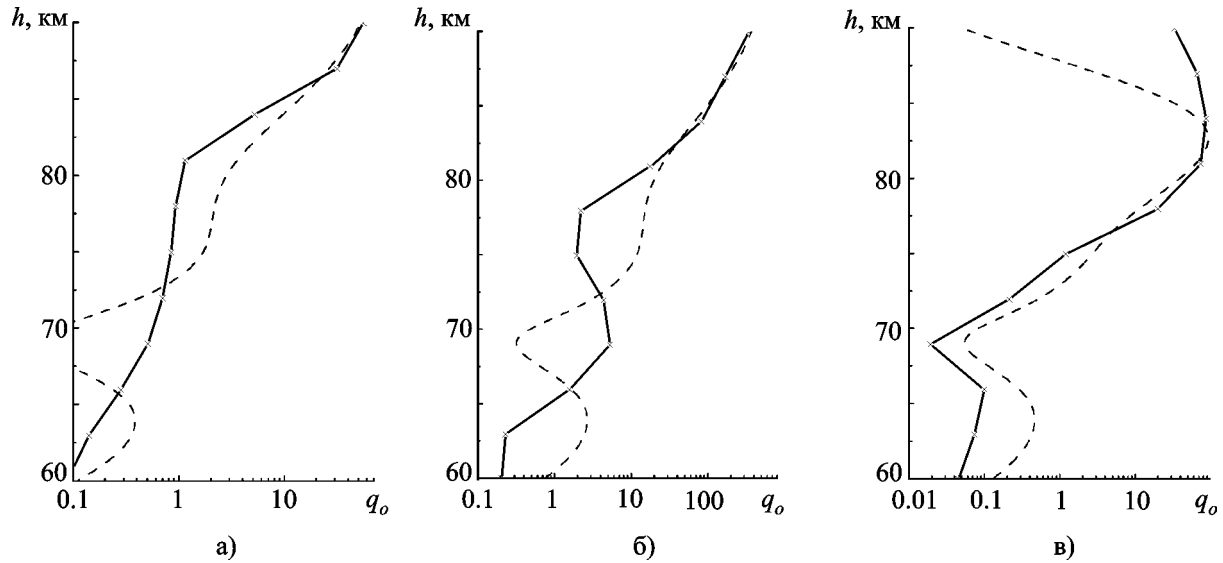
Возрастание уровня магнитной активности часто вызывает увеличение  $N$  в нижней ионосфере за счет дополнительной ионизации атмосферы высокоэнергичными частицами. Это приводит к появлению слоев повышенной ионизации и нередко носит квазипериодический характер. Наблюдаемые в эксперименте всплески  $q_{o,x}$  в магнитовозмущенные дни (см. рис. 6) могут быть обусловлены появлением таких слоев. Как показали модельные исследования (см. рис. 1), при наличии слоя с повышенным значением  $N$  отношения  $q_{o,x}$  могут возрастать на порядок величины и более, что и наблюдалось нами в экспериментах.

Для проверки адекватности основного уравнения ДР в методе ЧО реальным условиям было проведено сравнение теоретического и экспериментального профилей  $q_o$  для магнитоспокойных и магнитовозмущенных дней (рис. 7). Из рисунка видно, что профили  $q_o$  удовлетворительно (по порядку величины) согласуются друг с другом. Наблюдаемые различия могут быть вызваны целым рядом причин: погрешностями эксперимента, различием модельного и реального профилей  $N$ , использованием неточных значений  $\sigma_N^2$  и  $T_n$ , учетом зависимости  $\sigma_N^2(h)$  и др. Различие модельного и реального профилей  $q_o$  в период магнитных возмущений при  $h > 85$  км может быть вызвано “просачиванием” части энергии зеркально отраженного сигнала за счет дисперсионного расплывания зондирующего импульса и увеличения роли наклонных отражений, а также использованием завышенных значений  $v$  при  $h \gtrsim 80$  км.

## Выводы

1. Получено уравнение ДР ионосферы в методе ЧО. Проанализированы зависимости отношения сигнал/помеха для обыкновенной и необыкновенной компонент радиосигнала от параметров радара и нижней ионосферы.

2. Проведены модельные исследования высотных и частотных зависимостей отношения сигнал/помеха для обыкновенной и необыкновенной компонент частично отраженного сигнала в спокойных и магнитовозмущенных



**Рис. 7.** Сравнение модельных (штриховая линия) и экспериментальных (сплошная линия) профилей отношения сигнал/помеха для обыкновенной компоненты частично отраженного сигнала, полученных для магнитоспокойных суток 29.03.2005 г. (а), 29.09.2004 г. (б), а также в период умеренной магнитной бури 22.12.2004 г. (в). При моделировании зависимости  $q_o(h)$  использовался профиль  $N(h)$ , показанный на рис. 1 сплошной линией,  $\widetilde{\sigma}_N^2 = 2 \cdot 10^{-4}$  (а) и  $\widetilde{\sigma}_N^2 = 8 \cdot 10^{-4}$  (б), а также профиль  $N(h)$ , показанный на рис. 1 штрих-пунктирной линией,  $\widetilde{\sigma}_N^2 = 2 \cdot 10^{-4}$  (в)

условиях. Найдены области применимости различных методик получения параметров нижней ионосферы. Показано, что для полуденной ионосферы восстановление профилей  $N(h)$  при помощи методики дифференциального поглощения возможно на высотах  $60 \div 75$  км, а нахождение профилей параметров атмосферного ветра и ВВ – на высотах  $65 \div 90$  км.

3. Проведены экспериментальные исследования суточной и сезонной зависимостей отношения сигнал/помеха. Продемонстрировано, что для различных высот значения  $q$  изменялись примерно на два порядка. Найдена зависимость времени существования частично отраженного сигнала ( $q_{o,x} > 1$ ) от сезона, вызванная различной продолжительностью светового дня. Не обнаружена заметная сезонная зависимость отношения сигнал/помеха. Наблюдались существенные (в  $2 \div 10$  раз) временные вариации  $q_{o,x}$ , которые могли быть вызваны прохождением атмосферных волн с периодами, изменяющимися в широких пределах (от 1 ч и более). Показано, что вертикальный размер вызванных ими возмущений составляет не менее нескольких десятков километров.

4. При высоком уровне магнитной активности наблюдались всплески  $q_{o,x}$  продолжительностью  $1 \div 2$  ч, которые могут быть связаны с образованием слоев повышенной ионизации под действием выпадающих высокоэнергичных частиц. Значения  $q_{o,x}$  в максимумах всплесков в  $5 \div 10$  раз превышали максимальные значения  $q_{o,x}$  в спокойных условиях и в  $3 \div 6$  раз их средние значения за время наблюдения.

5. Проведено сравнение модельных и экспериментальных высотных профилей отношения сигнал/помеха. Показано, что эти профили удовлетворительно согласуются между собой, что свидетельствует об адекватности полученного уравнения ДР. Наблюдаемые различия вызваны рядом причин: погрешностями определения отношения сигнал/помеха, несовпадением модельного и реального профиля электронной концентрации, использованием неточных значений дисперсии относительных флуктуаций электронной концентрации и учетом ее высотной зависимости, а также использованием приближенных значений эквивалентной шумовой температуры.

Авторы выражают благодарность Гармашу К. П. и Сомову В. Г. за модернизацию радара ЧО, а также Гритчину А. И. и Подносу В. А. за организацию и проведение систематических измерений.

### Литература

- Gardner F. F., Pawsey J. L. Study of the ionospheric D-region using partial reflections // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1953. – Vol. 3, No. 8. – P. 321-324.
- Иванов В. А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений. – Йошкар-Ола: ВИНТИ, 1985. – 196 с.
- Гоков А. М., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Экспериментальное исследование реакции среднеширотной D-области ионосферы на рентгеновские и оптические вспышки // *Космічна наука і технологія.* – 2005. – Т. 11, № 3/4. – С. 56-67.
- Гоков А. М., Черногор Л. Ф. Вариации концентрации электронов в среднеширотной D-области ионосферы во время магнитных бурь // *Космічна наука і технологія.* – 2005. – Т. 11, № 5/6. – С. 12-21.
- Manson A. H., Meek C. E., Hall G., McMurray R. Winds and waves from the Canadian prairies (CNSR) triple-MF radar system // *Geophys. Res. Lett.* – 1993. – Vol. 20, No. 13. – P. 1375-1378.
- Namboothiri S. P., Manson A. H., and Meek C. E. Variations of mean winds and tides in the upper middle atmosphere over a solar cycle, Saskatoon, Canada, 52°N, 107°W // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1993. – Vol. 55, No. 10. – P. 1325-1334.
- Панасенко С. В., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Черногор Л. Ф. Результаты исследования динамических процессов в мезосфере при помощи радара частичных отражений // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2005. – №3. – С. 36-54.
- Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Радарные наблюдения квазипериодических процессов в мезосфере. 1. Теоретические основы и результаты компьютерного моделирования // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2004. – Т. 9, №4. – С. 404-416.
- Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Радарные методы наблюдения квазипериодических процессов в мезосфере. 2. Методика и результаты наблюдения // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2005. – Т. 10, №1. – С. 38-49.
- Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Выявление волновых возмущений в мезосфере с помощью СЧ – ВЧ-радар // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2006. – Т. 46, №4. – С. 525-535.
- Черногор Л. Ф. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса. Учебное пособие. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2007. – 348 с.
- Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
- Фалькович С. Е., Волосюк В. К., Горбуненко О. А. Радиотехнические системы дистанционного зондирования. Учебное пособие. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет “ХАИ”, 2002. – 157 с.
- Gage K. S. On the morphology of the scattering medium as seen by MST/ST radars / *Handbook for MAP.* – 1983. – Vol. 9. – P. 57-68.
- Мисюра В. А., Пивень Л. А., Федоренко Ю. П. Исследование природы частично отраженных сигналов / В кн.: Ускорение частиц и плазменные эффекты в космосе. – Киев: Наукова думка, 1978. – С. 32-48.
- Budden K. G. The propagation of radio waves: The theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere. – Cambridge, 1988. – XVI, 669 p.
- Шлюгер И. С., Васюков В. В., Князюк В. С., Миллих Г. М. Кросс-модуляция импульсных радиоволн в нижней ионосфере при большой мощности возмущающего импульса // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1975. – Т. 18, №5. – С. 673-681.
- Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
- Алебастров В. А., Гойхман Э. Ш., Заморин И. М., Колосов А. А., Корато В. А., Кузьминский Ф. А., Кукис Б. С. Основы загоризонтной радиолокации. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
- Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики помех, воздействующих на сигналы радара частичных отражений // *Радиофизика и электроника.* – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2003. – Т. 8, №2. – С. 295-303.
- Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.* – 1999. – №7. – С. 3-15.
- Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики радиосигналов, принимаемых радаром частичных отражений // *Радиофизика и электроника.* – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2004. – Т. 9, №1. – С. 234-247.
- Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Вяхирев В. Д., Гончаров Н. П., Гришкевич Л. В. О погрешностях определения концентрации электронов в D-области ионосферы методом частичных отражений // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 1983. – Т. 23, №2. – С. 202-207.
- Данилов А. Д., Казимировский Э. С., Вергасова Г. В., Хачикян Г. Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 272 с.

**Рівняння дистанційного  
радіозондування в методі  
часткових відбиттів**

**С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор**

Одержано рівняння дистанційного зондування в методі часткових відбиттів. Проведено модельні та експериментальні дослідження висотної, частотної, сезонної та добової залежностей відношення сигнал/завада для звичайної та незвичайної компонент частково відбитого сигналу. Вивчено вплив магнітної активності на величину цього відношення. Показано, що результати модельних та експериментальних досліджень задовільно узгоджуються між собою.

**Equation of Remote  
Radio Sounding in the Partial  
Reflection Technique**

**S. V. Panasenko and L. F. Chernogor**

The equation of remote radio sounding in the partial reflection technique has been derived. Model and experimental studies of the height, frequency, season and diurnal dependence of signal-to-noise ratio for the ordinary and extraordinary components of partially reflected signals are carried out. The influence of magnetic activity on this ratio is studied. The results of model studies have been shown to be in satisfactory agreement with experimental results.