

УДК 550.388.2

© 1991 г.

В.А. Мисюра, А.М. Гоков, А.И. Григчин, Л.А. Пивень,  
В.Г. Сомов

### О ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАЦИЯХ ЧАСТОТЫ СТОЛКНОВЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ С НЕЙТРАЛАМИ В D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

По измеренным методом частичных отражений на средних широтах вблизи Харькова и Волгограда и на высоких широтах вблизи Мурманска исследованы суточные, сезонные и широтные зависимости частоты столкновений электронов  $\nu$  с нейтралами в D-области ионосферы. Показано, что сезонные изменения  $\nu$  в D-области составляют ~ 50–100%.

**Введение.** Знание вариаций высотных профилей частот столкновений электронов с нейтралами  $\nu(h)$  в нижней ионосфере ( $h$  – высота в км) важно при решении как научных, так и прикладных задач (радиосвязь, радионавигация, прогнозирование и т.п.). Однако в настоящее время в литературе нет единого мнения об изменениях  $\nu(h)$ -профиля в D-области. Ряд исследователей полагают, что вариации  $\nu(h)$  не превышают  $\pm 20\%$  (см., например, [1, 2]), с другой стороны, в [3–5] отмечается наличие как сезонных, так и широтных изменений  $\nu(h)$  в области D. Целенаправленных экспериментальных исследований вариации  $\nu(h)$  в D-области очень мало, они разрознены и трудно поддаются систематизации. В большинстве случаев  $\nu(h)$  в D-области вычисляют по моделям атмосферного давления  $p(h)$  и из известной зависимости  $\nu(h) = kp(h)$ , где обычно коэффициент  $k$  полагают известным (как правило, используют  $k = (6 - 9,5) \times 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  или определяют в ракетных экспериментах).

В настоящей работе экспериментально исследованы суточные, сезонные и широтные изменения  $\nu(h)$  в D-области по измерениям методами частичных отражений (ЧО) и импедансного зонда.

**Экспериментальные результаты.** Изучение возможных вариаций  $\nu(h)$  в D-области в течение светлого времени суток проводилось тремя способами. На рис. 1а приведены  $\nu(h)$ -профили, полученные в различные времена суток (19–20).08.1976 г. вблизи Волгограда. В этот период проводились одновременные измерения параметров ионосферы методом импедансного зонда на ракетах [6] и методом ЧО с помощью подвижного радиофизического комплекса [7] (основные параметры комплекса: рабочие частоты  $f = 2-6$  МГц, длительности зондирующих импульсов  $\tau_{\text{и}} = 25, 50$  мкс с частотой повторения  $F = 1-10$  Гц и эффективной импульсной мощностью  $PG \leq 10$  МВт). Высотные профили плотности электронов  $N(h)$  получены с помощью зондов в ракетных экспериментах [6] и уточнены нами согласно [8]. Профили  $\nu(h)$  вычислены с использованием этих  $N(h)$ -профилей по измерениям дифференциального поглощения магнитоионных компонент методом ЧО (использовалась известная методика дифференциального поглощения [9], в которой путем задания  $\nu(h)$  вычисляют  $N(h)$ -профиль с погрешностью  $\leq 30\%$  [9]). Мы же задавались  $N(h)$ -профилем, измеренным с помощью зондов одновременно с дифференциальным поглощением магнитоионных компонент методом ЧО и вычислили  $\nu(h)$  методом половинного деления области задания функции: известно [9], что отношение средних за сеанс измерений квадратов амплитуд  $A_{\text{н,о}}$  необыкновенной и обыкновенной компонент ЧО сигналов  $a(h) = \bar{A}_{\text{н}}^2(h) / \bar{A}_{\text{о}}^2(h)$  является функцией  $N$  и  $\nu$ . Поэтому для каждой фиксированной высоты  $h$  можно вычис-

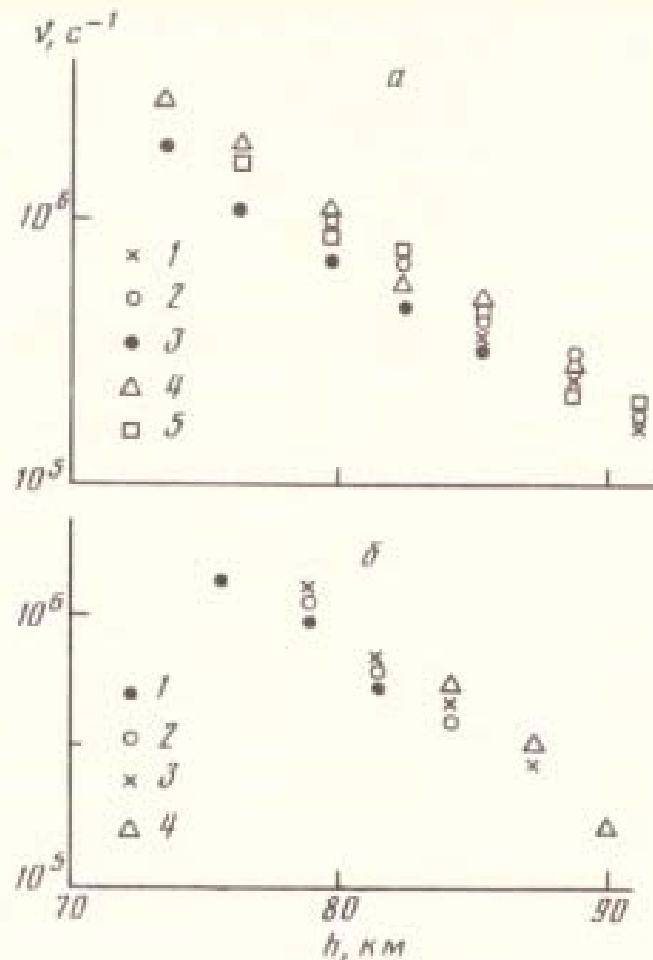


Рис. 1. Вариации  $\nu(h)$  в течение дня на средней широте,  $h > 70$  км (время местное): а - Волгоград 20.06.76 г.: 1 - 09.10, 2 - 11.47, 3 - 06.30; 19.06.76 г.: 4 - 11.51, 5 - 17.18. б - Харьков 31.07.81 г.: 1 - 09.30, 2 - 11.30, 3 - 13.30, 4 - 16.40

лечь  $\nu$ , зная  $N$  и измеряя в эксперименте  $a(h)$  путем подбора  $\nu$  из области возможных значений. Погрешность вычисления  $\nu(h)$ , таким образом, также будет  $\leq 30\%$ . На рис. 1 б приведены  $\nu(h)$ -профили, полученные вблизи Харькова 31.07.81 г. методом ЧО в течение дня.

Профили  $\nu(h)$  вычислены по методике [10] по одновременным измерениям  $a(h)$  и коэффициента корреляции  $\rho_{A_{0h}^1 A_{h1}^1}(h)$ . Согласно [10], погрешность вычисления  $\nu(h)$  в этом случае была  $\leq 30\%$ . Отметим, что кроме источников ошибок, отмеченных в [10], в каждом сеансе наблюдений необходимо следить за выполнением условия равномерности распределения неоднородностей в объеме рассеяния, поскольку слоистая структура неоднородностей вызывает появление дополнительных ошибок определения  $\rho_{A_{0h}^1 A_{h1}^1}$  и соответственно  $\nu(h)$  (особенно при использовании  $\tau_{\text{н}} = 50$  мкс). Приведенные примеры иллюстрируют изменения  $\nu(h)$  на  $h \geq 75$  км. На высотах  $h \leq 65$  км вариации  $\nu(h)$  изучались по регистрациям ЧО сигналов. Отбирались те регистрации, когда с  $h \leq 65$  км принимались отчетливые ЧО сигналы (отношение сигнал/шум  $\geq 10$ ); шумы вычитались по методике [11] (шумовые выборки делаются между излучением зондирующих импульсов). Профили  $\nu(h)$  вычислены из соотношений [9]  $a(h) \approx R(\nu)$ , где  $R(\nu)$  - отношение коэффициентов отражения для необыкновенной и обыкновенной компонент ЧО сигналов. В качестве примера на рис. 2а приведены изменения  $\nu(h)$  в течение дня 14.12.84., а на рис. 2б - в течение дня 19.03.83 г. на  $h \leq 65$  км (измерения выполнены вблизи Харькова). Приведенные примеры показывают, что изменения

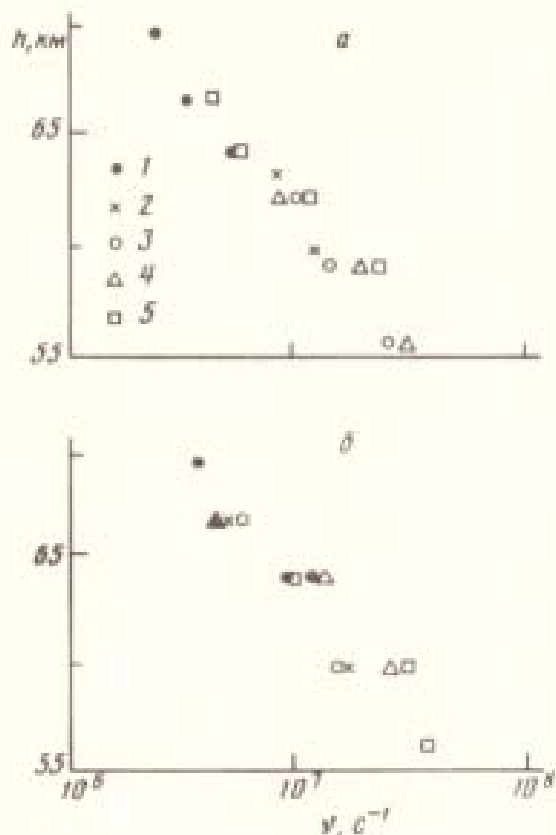


Рис. 2

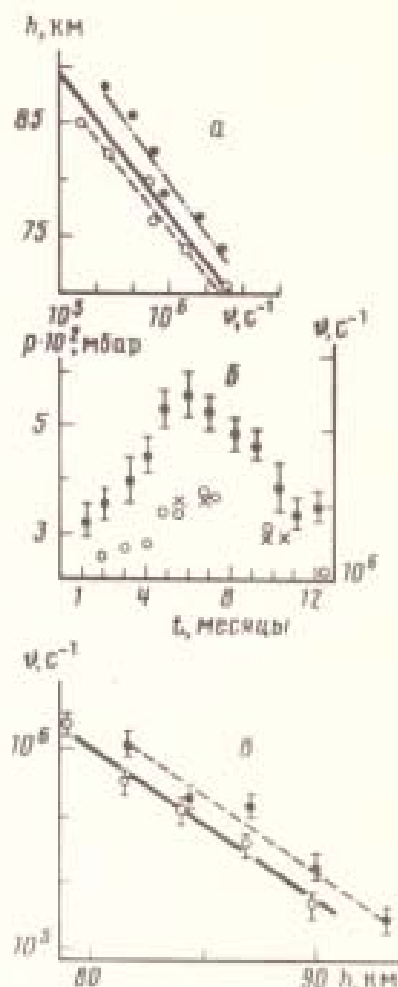


Рис. 3

Рис. 2. Вариации  $\nu(h)$  в течение дня в нижней части области  $D$  (время местное): а - Харьков 14.12.84 г. 1 - 10.00, 2 - 11.01, 3 - 13.07, 4 - 14.00, 5 - 15.30. б - Харьков 19.03.83 г.: 1 - 09.03, 2 - 10.00, 3 - 11.42, 4 - 16.30, 18.03.83 г. 5 - 16.00

Рис. 3. Сезонные и широтные изменения  $\nu(h)$  в  $D$ -области (время местное): а - Волгоград: точки - 19.06.76 г. 11.51, кружки - 01.12.72 г. 12.00 (ЧО и ракеты), сплошная линия - КМ [13]. б - вариации давления на  $h = 70$  км (Волгоград) и  $\nu$  на  $h = 75$  км: Харьков (кружки) 23.01.85 г. 12.00, 25.02.85 г. 16.00, 27.03.85 г. 16.30, 23.04.85 г. 14.30, 29.05.85 г. 16.50, 25.06.85 г. 13.30, 13.07.85 г. 09.50, 20.09.85 г. 12.11, 13.11.85 г. 14.00, 13.12.85 г. 13.00. Волгоград (крестики) 29.05.85 г. 16.30, 28.06.85 г. 12.00, 25.09.85 г. 15.00, 17.10.85 г. 17.50. в - усредненные  $\nu(h)$ -профили для средней широты (кружки и сплошная линия, 31.07.81 г.) и высокой широты (точки и штриховая линия, 02.07.77 г.)

$\nu(h)$  в  $D$ -области на средних широтах в течение светлого времени суток незначительны, в пределах погрешности метода ЧО ( $\leq 30\%$ ). В то же время иногда в течение нескольких дней (за 5-7 дней)  $\nu(h)$  в  $D$ -области изменялась на  $\sim 50-80\%$ , как было отмечено зимой 1983 г. в период стратосферного потепления [12].

Возможные сезонные изменения  $\nu(h)$  в  $D$ -области изучались по измерениям методом ЧО вблизи Харькова и Волгограда (совместно с ракетными экспериментами). На рис. 3а приведены  $\nu(h)$ -профили, полученные методом ЧО (с использованием  $N(h)$ -профилей, полученных в зондовых измерениях на ракетах [6] в периоды работы установки ЧО) летом (19.06.76 г. в 11.51 - точки, здесь и далее время местное) и зимой (01.12.72 г. - кружки) в полуденное время вблизи Волгограда (сплошной линией обозначен  $\nu(h)$ -профиль, полученный методом импульсной кросс-модуляции (КМ) 01.12.72 г. в 12.00 вблизи Москвы [13]). Видно, что летние значения  $\nu$  превышают зимние в  $\sim 1,6 - 2$  раза во всей  $D$ -области (отличие  $\nu(h)$ , полученных методами ЧО и КМ,  $\sim 30\%$  и объясняется, по-видимому, погрешностями методов).

На рис. 3б приведена зависимость давления  $\bar{p}$  на высоте  $h = 70$  км от времени года  $t$ . Среднемесячные значения  $\bar{p}$  получены усреднением индивидуальных профилей  $p(h)$ , полученных по результатам ракетного зондирования вблизи Волгограда [14], вертикальными отрезками обозначен среднеквадратический разброс. Зависимость  $p$  от  $t$ , хорошо коррелирует со значениями  $\nu$ , полученными методом ЧО вблизи Харькова (кружки) и Волгограда (крестики) в различные сезоны года ( $\nu(h)$ -профили получены по методике [10], на рис. 3б приведены значения  $\nu(t)$  для  $h = 75$  км). Значения  $\nu(h)$ , измеренные в двух пунктах, совпадают в пределах ошибок измерений. Этот пример также иллюстрирует возможные сезонные изменения  $\nu(h)$  в  $D$ -области на средних широтах.

Для выявления возможных широтных отличий  $\nu(h)$  в  $D$ -области проведено сравнение усредненных  $\nu(h)$ -профилей, полученных по измерениям методом ЧО в течение дня (расчеты проведены по методике [10]) на средней широте 31.07.81 г. вблизи Харькова (географическая широта  $\varphi \approx 50^\circ$ ) и 02.07.77 г. на высокой широте вблизи Мурманска ( $\varphi \approx 69^\circ$ ). Результаты приведены на рис. 3в: сплошная линия – усредненный по четырем реализациям  $\nu(h)$ -профиль для средней широты, штриховая линия – для высокой широты (усреднение по пяти регистрациям). Вертикальными отрезками обозначен разброс данных. Видно, что в данном случае широтные отличия  $\nu(h)$ -профилей невелики, хотя значения  $\nu(h)$  для высокой широты несколько превышают  $\nu(h)$  для средней широты (как усредненные, так и индивидуальные).

**Обсуждение результатов.** Анализ экспериментальных результатов, приведенных на рис. 1, 2, показывает, что дневные изменения  $\nu(h)$  в  $D$ -области на средней широте невелики – в пределах погрешности метода ЧО ( $\ll 30\%$ ), только утренние значения  $\nu(h)$ , полученные в период восхода Солнца, оказались несколько меньшими по сравнению с дневными (точки на рис. 1а). Это отличие, возможно, вызвано несколько большими ошибками измерений  $\alpha(h)$  и  $\rho_{A_{10}A_{10}}(h)$  в утреннее время, так как в этот период ЧО сигналы отличались сильной нестационарностью (длительность этой регистрации 12 мин, остальные по 10 мин). С другой стороны, анализ результатов, приведенных на рис. 3, показывает, что на средней широте имеют место заметные изменения  $\nu(h)$  в  $D$ -области в течение года (даже с учетом разброса данных, приведенных на рисунках, летние значения  $\nu(h)$  превышают зимние в  $\sim 1,5$ –2 раза). Важно, что другие результаты измерений  $\nu(h)$ , проведенные вблизи Харькова методом ЧО и вблизи Волгограда методом ЧО и совместно с ракетными измерениями, подтверждают сказанное выше.

Приведенные здесь результаты дают лишь качественную картину вариаций  $\nu(h)$  в  $D$ -области в силу ограниченности числа экспериментальных данных. В то же время данные, приведенные на рис. 3б, могут быть использованы в качестве предварительной модели сезонных изменений  $\nu(h)$  на средних широтах и уточняться другими целенаправленными измерениями  $\nu(h)$ -профилей.

**Выводы.** Экспериментально установлено, что вариации  $\nu(h)$  в  $D$ -области на средней широте в течение светлого времени суток невелики, они не превышают  $\sim 30\%$ , т.е. находятся в пределах погрешности метода ЧО и при необходимости ими можно пренебрегать. В то же время показано, что в  $D$ -области имеют место сезонные изменения  $\nu(h)$  (примерно в 1,5–2,5 раза) и поэтому их необходимо учитывать при расчетах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.А. Исследование  $D$ -области ионосферы методом частичных отражений. Йошкар-Ола: Дип. в ВИНТИ. 1985. № 8349-В85. 196 с.
2. Aggarwal K.M., Narinder M., Setty C.S. // Planet. Space Sci. 1979. V. 27. P. 753.
3. Belrose J.S., Bode L.R., Hewitt L.W. // Radio Sci. 1966. V. 68. P. 1219.
4. Mechly E.A., Smith L.G. // J. Atmos. Terr. Phys. 1968. V. 30. P. 1555.
5. Belrose J.S., Hewitt L.W. // Nature. 1964. V. 202. P. 267.
6. Рылов Ю.А., Субботин А.Ф., Шиблева П.В. и др. // Проблема солнечно-атмосферных связей. М.: Гидрометеонадат, 1981. С. 43.
7. Мисюра В.А., Пивень Л.А., Черногор Л.Ф. и др. // Вестн. Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника. 1974. Вып. 3. № 110. С. 3.
8. Глотов А.Л., Пахомов С.В., Синельников В.М. // Тр. ЦАО. 1984. С. 107.

9. *Veiside J.S.* // *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1970, V. 32, P. 567.
10. *Бенедиктов Е.А., Гришакевич Л.В., Иванов В.А.* // *Изв. вузов. Радиофизика*, 1972, Т. 15, С. 695.
11. *Гришкин А.И., Дорохов В.Л., Концевая Л.Г. и др.* // *Вести. Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника*, 1988, № 318, С. 21.
12. *Гогов А.М., Гришкин А.И., Дорохов В.Л. и др.* // *Тр. II симпози. по результатам исследований средней атмосферы. Тез. докл. М., 1986, С. 73.*
13. *Мисюра В.А., Влюгер С.С., Часовитин Ю.К. и др.* // *Космич. исслед. на Украине. Киев: Наук. думка, 1974, Вып. 5, С. 63.*
14. *Бюллетень результатов ракетного зондирования атмосферы за январь–декабрь 1985 г. М.: Гидрометеопиздат, 1985–1986.*

Харьковский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
31.07.90  
После доработки  
05.11.90