

УДК 551 510.535

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЫСОТЫ НЕЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА НИЗКОЧАСТОТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИОНОСФЕРЕ

*Л. В. Будилин, Г. Г. Гетманцев, П. А. Капустин, Д. С. Котик,
Н. А. Митяков, А. А. Петровский, В. О. Рапопорт, Ю. А. Сазонов,
С. Ю. Смирнов, В. Ю. Трахтенгерц*

Приведены результаты прямых измерений высоты области генерации низкочастотного (1—7 кГц) излучения, возникающего при воздействии на ионосферу модулированными сигналами мощного наземного коротковолнового передатчика. Среднее значение высоты области генерации оказалось равным 75 км.

При воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением на двух близких частотах за счет нелинейных эффектов может возникать электромагнитное излучение на разностной частоте [1]. Подобное искусственное низкочастотное излучение в диапазоне 1—7 кГц действительно было обнаружено в 1974 г. во время экспериментов в Горьком [2]. Ответственные за низкочастотное излучение нелинейные токи на разностной частоте могут быть обусловлены стрикционными и нагревными эффектами, а также модуляцией регулярных ионосферных токов [2]. Более детально рассмотрение механизмов возбуждения нелинейных токов, а также особенностей распространения низкочастотных волн, генерируемых этими токами, приведено в [3, 4]. Анализ показывает, что нелинейные токи, обусловленные вариациями силы давления электронов, для дневной среднеширотной ионосферы возбуждаются, начиная с высот 80—90 км, и слабо зависят от высоты [3]. Токи, связанные с модуляцией силы трения между электронами и нейтралами (модуляция токовой струи), существуют в диапазоне высот 70—100 км с максимумом на высоте $Z \sim 90$ км. Эффекты распространения низкочастотного излучения ограничивают высоту эффективного источника тока, возбуждающего волновод Земля—ионосфера. Поскольку целый ряд факторов (высотное распределение электронной плотности и, особенно, квазирегулярных токовых систем в нижней ионосфере) недостаточно известен, важны прямые измерения эффективной высоты нелинейных токов, ответственных за низкочастотное излучение.

С этой целью был проведен эксперимент по измерению фазового пути низкочастотного излучения на различных частотах. Схема эксперимента показана на рис. 1 (B —область генерации НЧ излучения). Нагрев ионосферы проводился с помощью КВ передатчика (A), модулированного синусоидальным низкочастотным сигналом. На расстоянии 5 км к северу от передатчика располагались приемники низкочастотного излучения (C) и земной волны КВ передатчика D . Измерялась разность фаз низкочастотного сигнала с выхода приемника (C) и протектированного сигнала с выхода приемника (D). Передатчик работал на частотах 4,61 и 5,75 МГц со средней мощностью 100 кВт. Передающая антенна имела коэффициент усиления $G \sim 100$ в вертикальном

направлении и излучала волну с обыкновенной поляризацией. Передатчик модулировался синусоидальным сигналом (глубина модуляции $\sim 90\%$) последовательно на 24 фиксированных частотах в диапазоне $f = 1,25 \div 7$ кГц. На каждой частоте модуляции нагрев продолжался 4,5 минуты с полным временем пробега диапазона частот—2 часа. Еже-

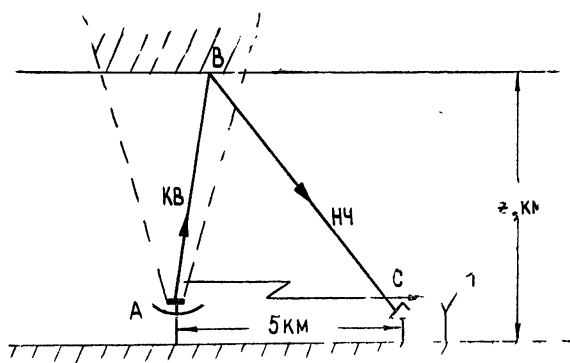


Рис. 1.

дневно проводилось по два сеанса с 7 час 30 мин до 9 час 30 мин (мск) на частоте нагревного передатчика 4,61 МГц и с 10 до 12 час (мск) на частоте 5,75 МГц. Прием низкочастотных сигналов проводился в 5 км севернее коротковолнового передатчика на рамочную антенну, плоскость которой ориентирована в восточно-западном направлении. В приемной аппаратуре низкочастотный сигнал гетеродинировался на частоту $\sim 0,03$ Гц и регистрировался самописцем с постоянной времени 4 с. На каждой частоте запись сигнала продолжалась 4 минуты. Для измерения фазы φ низкочастотного сигнала в течение одной минуты проводилась калибровочная запись протектированного КВ сигнала, распространяющегося земной волной. Были приняты специальные меры для контроля уровня небесной волны КВ сигнала.

Для устранения фазовых ошибок полезный и калибровочный сигналы пропускались через один и тот же узкополосный усилитель. Прием КВ сигнала проводился с полосой пропускания около 150 кГц, т. е. практически без фазового запаздывания. Фазовая характеристика широкополосной части низкочастотного приемника (антенна и предварительный усилитель) учитывалась при обработке записей. Таким образом, для каждого сеанса можно было построить зависимость фазового запаздывания от частоты. На рис. 2 представлены результаты обработки для трех периодов наблюдений: 6—11 июня (крестики), 10—14 июля (точки) (рис. 2 а) и 16—18 июля 1975 г. (рис. 2 б) (прямые линии характеризуют усредненные зависимости). Для третьего периода наблюдений точность измерения фазы за счет усовершенствования методики была повышена в 2—3 раза.

Для каждого периода наблюдений экспериментальные значения группируются около прямой, проходящей через начало координат. По наклону прямой $\varphi(f)$ с учетом расстояния между КВ передатчиком и приемным пунктом ($d = 5$ км), а также в предположении, что волны распространяются со скоростью света, можно определить высоту Z области генерации низкочастотного излучения $\left(\varphi = \frac{\omega}{c} (2Z - d)\right)$. В табл. 1

приведены значения $\frac{d\varphi}{df}$ и высоты области для всех периодов наблюдений.

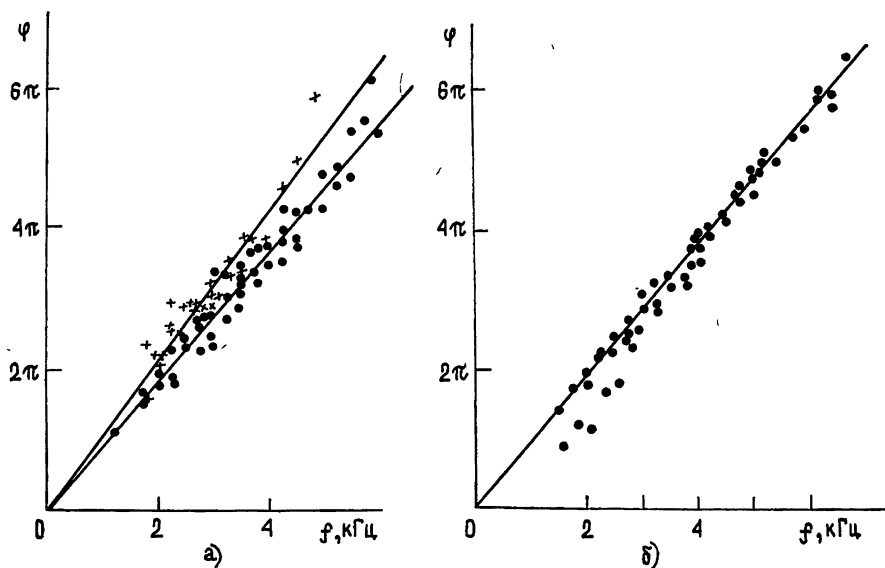


Рис. 2.

Какой-либо разницы в поведении фазовых характеристик для утренних и дневных сеансов не обнаружено. Обращает на себя внимание тот факт, что фазовые характеристики являются прямыми, проходящими через начало координат (с неопределенностью, равной $n\pi$). Дело в том, что на высотах $Z \sim 70$ км в используемом диапазоне частот выполняется условие $\delta\nu \ll 2\pi f$ (ν — частота столкновений электронов с моле-

Таблица 1

Период наблюдений	$\frac{d\varphi}{df}$, кГц^{-1}	Z , км
6 — 11 июня	1,070	$82,5 \pm 3,0$
10 — 14 июля	0,925	$72,0 \pm 3,0$
16 — 18 июля	0,935	$72,5 \pm 1,5$

кулами, δ — относительная доля энергии, теряемая электроном при одном соударении) и осцилляции электронной температуры сдвинуты по фазе на $\pi/2$ относительно огибающей высокочастотного поля [3]. Дополнительный сдвиг фаз на $\pi/2$ может быть обусловлен особенностями геометрии области ионосферы, ответственной за генерацию низкочастотных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Гинзбург, А. В. Гуревич, УФН, **70**, 201, 393 (1960).
2. Г. Г. Гетманцев, Н. А. Зуйков, Д. С. Котик, Л. Ф. Мироненко, Н. А. Митяков, В. О. Рапопорт, Ю. А. Сазонов, В. Ю. Трахтенгерц, В. Я. Эйрман, Письма в ЖЭТФ, **20**, № 4, 229 (1974).
3. Д. С. Котик, В. Ю. Трахтенгерц, Письма в ЖЭТФ, **20**, № 2, 114 (1975)
4. Н. С. Белюстин, В. П. Докучаев, С. В. Поляков, В. В. Тамойкин, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, **18**, № 9, 1323 (1975).

LOCALIZATION OF THE HEIGHT OF NONLINEAR CURRENTS RESPONSIBLE
FOR LOW-FREQUENCY RADIATION IN THE IONOSPHERE

*L. V. Budiln, G. G. Getmantsev, P. A. Kapustin, D. S. Kotik, N. A. Mityakov,
A. A. Petrovskii, V. O. Rapoport, Yu. A. Sazonov, S. Yu. Smirnov,
V. Yu. Trakhtengerts*

The results are given of direct measurements of the height of the generation region of low-frequency (1—7 Kc/s) radiation produced when the ionosphere is affected by modulated signals of a powerful base-ground shortwave transmitter. The mean value of the height of generation region appeared to be equal to 75 km.
