

УДК 551.510.535

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ДИФФУЗНЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

А. Ф. Беленов, В. А. Зиничев

Проведены измерения действующих высот отражения от ионосферы сигнала диагностической станции при одновременной ее работе с нагревным передатчиком на близких частотах. Для диагностики использовались сигналы с линейной частотной модуляцией, что позволило реализовать разрешающую способность по высоте 1,5 км. Обнаружено, что через несколько минут после включения нагревного стендса регулярно наблюдается уширение области действующих высот отражения диагностического сигнала на 3—15 км. Через 4—6 мин после выключения нагрева ширина области действующих высот отражения уменьшается до невозмущенного уровня. Наблюдаемое увеличение интервала действующих высот отражения связывается с генерацией крупномасштабных неоднородностей в области нагрева.

1. Одним из важных эффектов, возникающих при нагреве ионосферы мощным радиоизлучением, является генерация крупномасштабных ($l \geq 1$ км) неоднородностей. Об этом, в частности, свидетельствует уширение следа на ионограммах, снятых при работе мощного нагревного передатчика [1, 2]. Результаты экспериментов по просвечиванию искусственно возмущенной области ионосферы сигналами ИСЗ и радиоизлучением дискретных источников Лебедь-А и Кассиопея-А могут также служить подтверждением эффекта генерации крупномасштабных неоднородностей в области, лежащей в пределах диаграммы направленности излучающей антенны нагревного передатчика [3, 4]. Данные этих экспериментов позволили сделать выводы о характере спектра масштабов генерируемых неоднородностей, динамике развития и релаксации искусственно возбуждаемой неоднородной структуры [5]. Использование узконаправленных антенн с возможностью сканирования диаграммы направленности позволило изучить распределение радиояркости возмущенной области, а использование методики спектрального анализа отраженного пробного сигнала дало возможность детально исследовать этапы развития и релаксации искусственных крупномасштабных возмущений ионосферной плазмы [6, 7]. Однако, несмотря на обширный экспериментальный материал по генерации крупномасштабных возмущений, вопрос о тонкой структуре возмущенной области до настоящего времени подробно не исследован, что связано, в частности, с недостаточной разрешающей способностью используемых экспериментальных средств. В последнее время появился ряд экспериментальных установок по зондированию ионосферы с использованием квазинепрерывных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [8]. Преимущество данной методики по сравнению с ранее используемой методикой импульсного зондирования состоит в том, что ЛЧМ-зондирование позволяет повысить разрешающую способность зондирующей станции

без ухудшения чувствительности. В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования структуры возмущенной области, полученные на установке ЛЧМ-зондирования ионосфера.

2. Эксперимент проводился в Зименках (Горьковская область) с использованием нагревного передатчика с эффективной излучающей мощностью 15 МВт. Прием отраженного ЛЧМ-сигнала велся на узко-направленную антенну с вертикальной диаграммой направленности и коэффициентом направленного действия порядка 200. Блок-схема эксперимента представлена на рис. 1. Мощный передатчик 1 при нагреве вертикально излучает попаременно сигналы на фиксированной частоте f_0 и сигналы с линейно меняющейся во времени частотой $f_1(t)$,

$$f_1(t) = f_0 - (\Delta f/2) + (\Delta f/\tau)t. \quad (1)$$

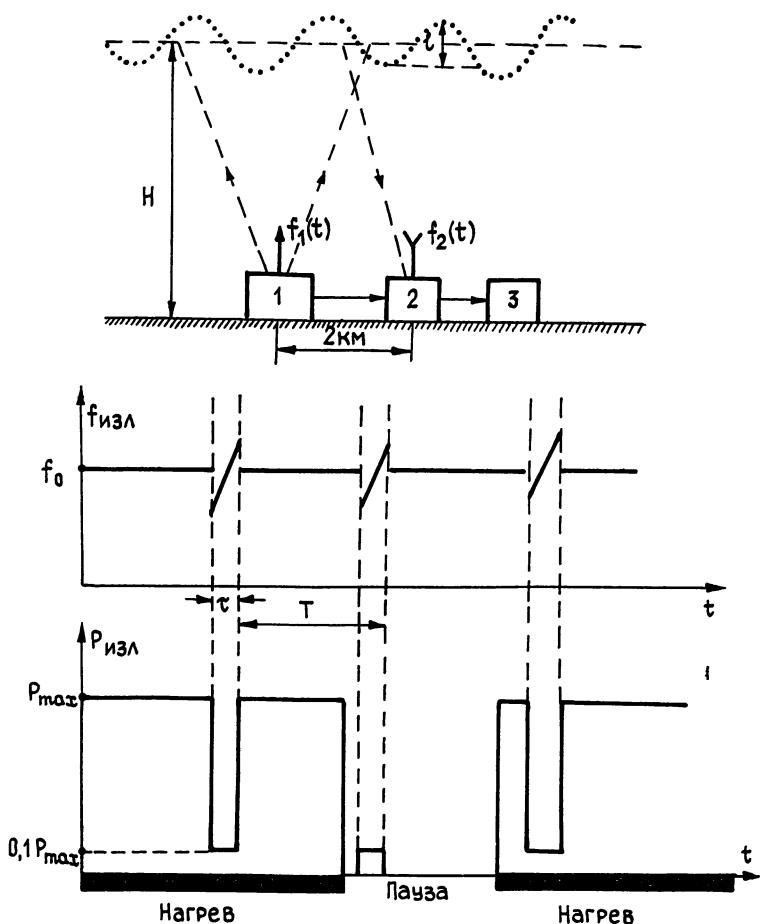


Рис. 1.

Во время излучения передатчиком 1 ЛЧМ-сигналов приемник 2 осуществляет когерентный прием отраженных от ионосферы сигналов. На рис. 1 приведена также зависимость излучаемой мощности передатчика 1 от времени. В режиме паузы передатчик 1 излучает только ЛЧМ-сигнал. Длительность ЛЧМ-сигнала τ составляла 0,4 с, период следования ЛЧМ-сигналов составлял 4 с. При отражении ЛЧМ-сигнала от действующей высоты H ионосферы на вход приемника 2, расположенного в блоке 2, распо-

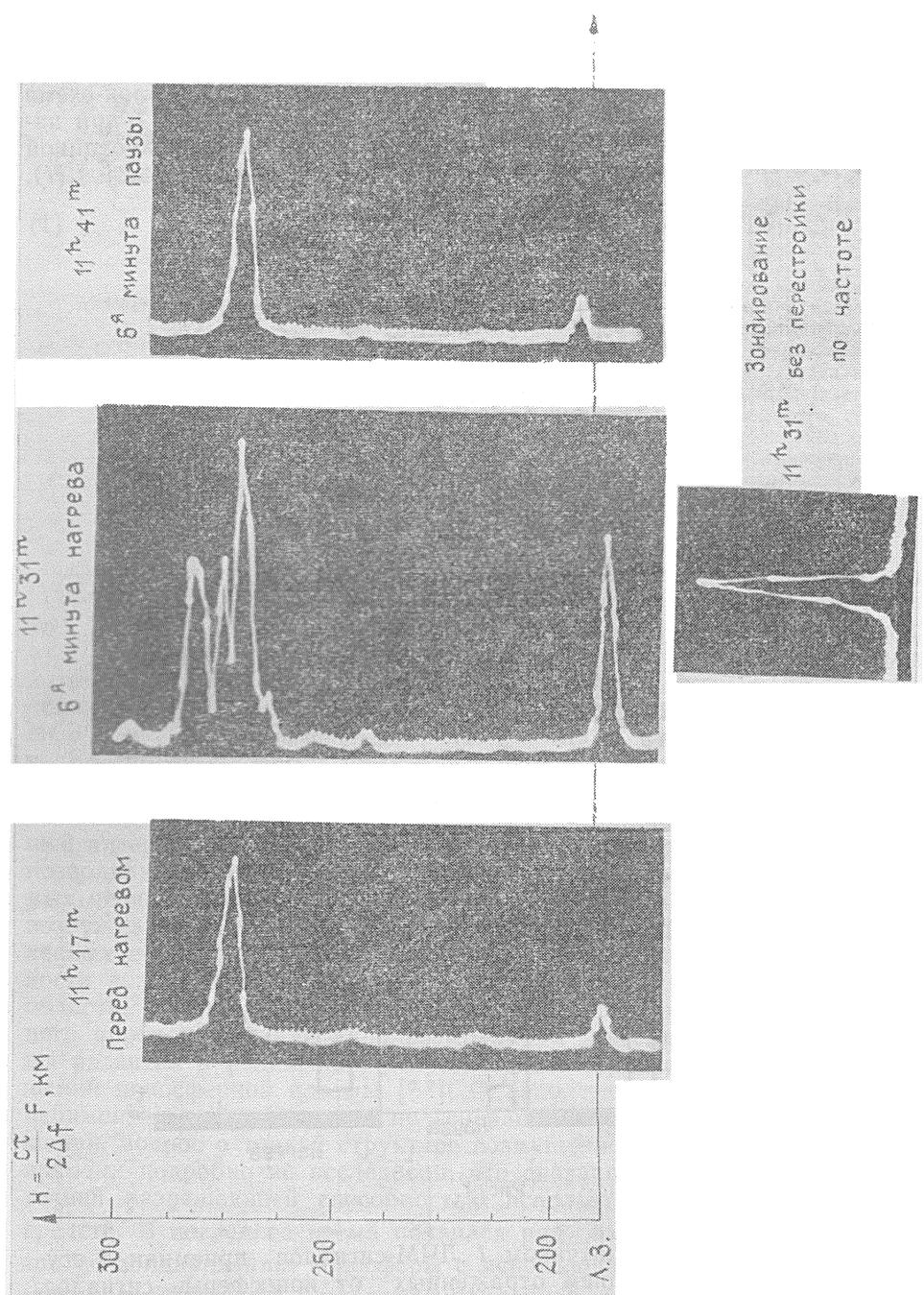


Рис. 2.

ложенного в двух километрах от передатчика, поступает сигнал частоты $f_2(t)$, которая связана с излучаемой частотой $f_1(t)$ соотношением

$$f_2(t) = f_1(t) - (\Delta f/\tau) (2H/c). \quad (2)$$

С выхода приемника 2 сигнал разностной частоты $F = f_1 - f_2$ поступает на анализатор спектра 3. Как видно из соотношения (2), спектр сигнала разностной частоты F представляет собой структуру отраженного от ионосферы сигнала* в масштабе действующих высот.

3. На рис. 2 представлены спектры отраженных сигналов разностной частоты F (расчет разностной частоты F по действующей высоте H производился согласно соотношению (2)), полученные 26.01.1983 г. при излучении передатчиком обычновенной компоненты. Длительность паузы и нагрева составляли по 10 мин. Узкая спектральная линия с отметкой Л. З. соответствует ЛЧМ-сигналу, прошедшему через линию задержки, дающую эквивалент действующей высоты 190 км. Высотное разрешение в данном эксперименте, определяемое как $c/2\Delta f$, составляет 1,5 км ($\Delta f = 100$ кГц)**.

Анализ приведенных на рис. 2 спектров показывает, что в отсутствие нагрева отражение происходит от узкой (в пределах разрешающей способности) области высот. При нагреве область высот отражения заметно расширяется. Сравнение спектров отраженного сигнала разностной частоты при ЛЧМ-зондировании со спектрами отраженного сигнала разностной частоты при кратковременном (на несколько секунд) переключении на зондирование без перестройки частоты (рис. 2, внизу) показывает, что расширение спектра отраженного сигнала разностной частоты при ЛЧМ-зондировании связано с расширением области действующих высот отражения, а не с доплеровским уширением спектра. В приведенном на рис. 2 примере уширение области действующих высот отражения составляет 10 км. На рис. 3 спектр сигнала представлен в виде яркостной записи на интервале местного времени 11 час 15 мин — 11 час 45 мин 26.01.83 г. Характерное время, за которое происходит уширение области действующих высот отражения, определяемой как ширина спектра сигнала разностной частоты по уровню 0,7, зондирующего ЛЧМ-сигнала после включения нагрева составляет в данном сеансе примерно 1,5 мин, а время релаксации такого уширения после выключения нагрева — около 5 мин. Сравнительный анализ яркостных записей спектров отраженного сигнала разностной частоты при ЛЧМ-зондировании возмущенной области, сделанный по 12 дням наблюдений, проводившихся с 10 до 15 часов местного времени в январе—феврале 1983 г., показывает, что времена уширения спектра при включении нагрева лежат в пределах от десятков секунд до трех минут, времена релаксации после выключения нагрева лежат в пределах от 4 до 6 минут. В ряде сеансов нагрева (например в сеансе, приведенном на рис. 3) имеет место немонотонное развитие уширения области действующих высот отражения. Масштабы уширения области действующих высот отражения лежат в пределах от 3 до 15 км.

4. Результаты проведенных наблюдений показывают, что при нагреве ионосферы мощным радиоизлучением вблизи точки отражения мощной радиоволны возникает крупномасштабная турбулентность, приводящая к уширению области действующих высот отражения этой

* Об учете доплеровского расширения спектра отраженного сигнала будет сказано ниже.

** Так как сигнал разностной частоты, полученный от ЛЧМ-сигнала, прошедшего через линию задержки, не испытывает уширения по спектру, влиянием нелинейности ЛЧМ-сигнала на точность определения действующей высоты можно пренебречь.

радиоволны на 10—15 км. Связь между интервалом Δz уширения области действующих высот и параметрами отражающей области — масштабом слоя L , средним размером неоднородностей l и средним квадратом относительных флюктуаций электронной плотности $(\Delta N/N)^2$ для случая $4\delta L/l \ll 1$, $\delta_{\max} = \Delta l/2f_0$ определяется соотношением [9]

$$\Delta z = 8 \sqrt[4]{\pi} \sqrt{2L^{3/2}l^{-1/2}} \sqrt{(\Delta N/N)^2}. \quad (3)$$

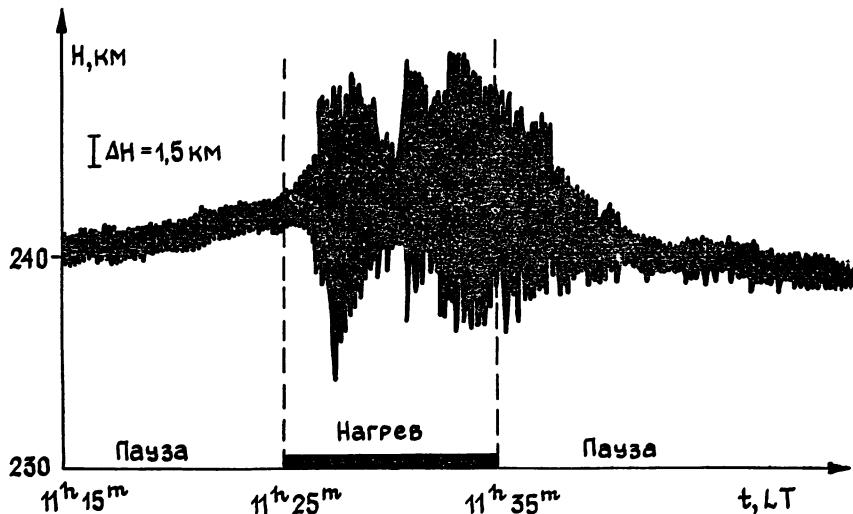


Рис. 3.

Соотношение (3) позволяет оценить один из параметров неоднородной структуры — l или $(\Delta N/N)^2$ по измеряемым значениям диффузности действующих высот отражения Δz , масштаба слоя L и одного из вышеуказанных параметров неоднородной структуры. Используя данные о зависимости времени релаксации от масштаба неоднородностей [10], получим, что для измеренных времен релаксации диффузности действующих высот отражения в эксперименте по ЛЧМ-зондированию возмущенной области (4—6 мин) соответствующие масштабы неоднородностей $l \sim 10$ км. Для оценки величины L использовались ионограммы, снятые во время эксперимента по ЛЧМ-зондированию ионосферы в сеансе нагрева 11 час 15 мин — 11 час 45 мин 26.01.83 г., ионограммы снимались на ионосферной станции, расположенной в пределах приемопередающего комплекса ЛЧМ-зондирования. Оценки, сделанные по этим ионограммам с использованием методики итеративного анализа ионограмм [11], дают для высот, отвечающих исследуемой области отражения, значение $L \sim 80$ км. По результатам ЛЧМ-зондирования (рис. 3) в данном сеансе нагрева вертикальный размер Δz области действующих высот отражения при нагреве был порядка 10 км. Используя соотношение (3), находим $\sqrt{(\Delta N/N)^2} \sim 3 \cdot 10^{-3}$.

Сопоставление результатов проведенных наблюдений с данными о критических частотах показало, что наиболее сильное уширение области действующих высот отражения при включении нагрева наблюдалось в сеансах, когда критические частоты превышали на 1,5—2 МГц частоту нагрева. Эти результаты согласуются с результатами, полученными в Боулдер [1, 2]. При дальнейшем приближении критических частот к частоте нагрева (и, соответственно, к частотам ЛЧМ-зондирования) уширение спектра сигнала разностной частоты при ЛЧМ-зондировании перестает коррелировать с временем работы нагревного

передатчика. В этом случае на характер спектра существенное влияние оказывает дисперсия среды [12].

В заключение авторы выражают благодарность Л. М. Ерухимову, С. А. Метелеву и Е. Н. Мясникову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Utlaut W. F., Violette E. J., Paul A. K.—J. Geophys. Res., 1970, 75, p. 6429.
2. Utlaut W. F., Violette E. J.—J. Geophys. Res., 1972, 77, p. 6804.
3. Pope J. H., Fritz R. B.—J. Geophys. Res., 1974, 79, p. 1065.
4. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 4, с. 516.
5. Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1814.
6. Allen E. M., Thome G. D., Rao P. B.—Radio Sci., 1974, 9, p. 905.
7. Stubbe P., Korke H. et al.—J. Atm. Terr. Phys., 1982, 44, № 12, p. 1025.
8. Rinnert K., Schlegel K. and Kramm R.—Radio Sci., 1976, 11, № 12, p. 1009.
9. Алимов В. А., Ерухимов Л. М., Пыркова Т. С. — Геомагнетизм и аэрономия, 1971, 11, № 5, с. 790.
10. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митякова Э. Е. и др. — В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
11. Гуляева Т. Л. Фортран программа ИТЕРАН для быстрого итеративного $N(h)$ анализа ионограмм. — М.: ИЗМИРАН, 1978.
12. Намазов С. А., Орлов Ю. И., Федоров Н. Н. Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — Горький, 1981, с. 14.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
30 марта 1984 г.

EXPERIMENTAL DATA ON SPREAD-F ECHOES BY THE HIGH POWER TRANSMITTER FACILITY

A. F. Belenov, V. A. Zinichev

The experimental data are presented on the variation of the diagnostic signal reflection region under the action of a powerful ground-based radio transmitter. The frequency of the diagnostic transmitter is approximately equal to that of the powerful transmitter. An increase of the diagnostic signal reflection region is observed up to 3–15 km some minutes after switching on the powerful transmitter. 4–6 minutes after switching off the powerful transmitter, the diagnostic signal reflection region decreases up to the unheating level. An increase of the diagnostic signal reflection region occurs due to generation of large-scale irregularities within the reflection region.