

УДК 551.510.535

ДИАГНОСТИКА ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ МЕТОДОМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Н. В. Бахметьева, В. А. Иванов, Ю. А. Игнатьев, В. А. Фролов,
П. Б. Шавин, В. В. Шумаев*

Приведены результаты экспериментальных исследований методом многочастотного наклонного зондирования искусственных среднемасштабных неоднородностей ($l_{\perp} \approx 180 \div 2000$ м), возникающих в F -слое ионосферы при воздействии мощных радиоволн на двух трассах длиной около 300 км. Определены размеры неоднородностей, вносящих максимальный вклад в рассеяние радиоволн на этих трассах. Исследована форма спектра амплитудных флуктуаций.

В 1980 году в НИРФИ для диагностики неоднородной структуры области возмущения (ОВ), возникающей при воздействии на ионосферу полем мощных радиоволн, было предложено использовать метод многочастотного наклонного зондирования ОВ на короткой трассе ($D \sim 300$ км) [1], ранее для подобных целей не применявшийся.

Уже первые эксперименты, проведенные в 1981 году, показали его большую информативность: были получены новые сведения о параметрах среднемасштабных искусственных неоднородностей (СИН) с поперечными относительно магнитного поля размерами $l_{\perp} \approx 60 \div 600$ м, о размерах области в ионосфере, занятой ими, о влиянии неоднородной структуры ОВ на статистические характеристики сигналов наклонного зондирования (НЗ) [1, 2]. Преимуществом метода является его относительная простота и возможность проведения регулярных исследований в разных геофизических условиях, в то время как другие методы, применявшиеся для этих целей, — прием сигналов ИСЗ и радиоизлучения космических источников — по разным причинам позволяют вести лишь эпизодические наблюдения.

В работе дается интерпретация экспериментальных данных по исследованию неоднородной структуры ОВ и ее влияния на амплитудные характеристики сигналов НЗ на коротких трассах, полученных в 1981 — 1982 гг. НИРФИ.

1. Методика проведения экспериментов. Эксперименты проводились в июне 1981 г. на двух коротких трассах (П1 — П3, П1 — П2), проходивших через область возмущения, а в октябре 1982 г. — на одной трассе (П1 — П3). Расположение трасс в принципе позволяло при одновременных наблюдениях получить сведения о параметрах ОВ и неоднородной структуре по ее различным сечениям. В обоих случаях передатчик пробных волн (ППВ) излучал из П1 импульсы длительностью 100 мкс с частотой повторения 10 Гц одновременно на двух частотах: $f_1 = 5,65$ МГц и $f_2 = 6,5$ (7,5) МГц. Воздействие на ионосферу осуществлялось с помощью комплекса «Сура» в режиме 5 (10)-минутного нагрева с паузами такой же длительности при эффективной мощности излучения $P_{эфф} \approx 20 \div 50$ МВт. Частота излучения менялась в зависимости от критической частоты слоя $F 2$ и, как правило, была меньше ее.

Прием сигналов НЗ в П3 в 1981 г. проводился без разделения по задержкам, а в П2 аппаратура позволяла разделять сигналы с разны-

ми задержками. С 1982 г. в ПЗ используется приемо-регистрирующая аппаратура, в которую входят: антенна типа «наклонный луч», ориентированная на ОВ, и система выделения импульсных сигналов с разными задержками с последующей обработкой на микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28».

В качестве исходных данных для обработки использовались массивы амплитуд сигналов НЗ, снятые через 1 с. В процессе обработки определялись времена развития τ_1 и релаксации τ_2 искусственных мерцаний, появившихся при нагреве ионосферы полем мощных радиоволн, значение временного интервала корреляции τ_k флуктуаций сигнала в период паузы и нагрева по уменьшенно нормированного коэффициента корреляции $\rho(\tau)$ в e раз, среднее значение амплитуды сигнала \bar{A} , индекс флуктуаций $F = (J^2 - \bar{J}^2) / \bar{J}^2$, ($J = A^2$), плотность вероятности амплитуд $W(A)$, спектральная плотность мощности $F_A(\nu)$ и другие характеристики. Интервал усреднения составлял 2—10 мин и выбирался с учетом времени установления характеристик сигналов, стационарности процесса и малости статистической погрешности.

2. Результаты одновременных наблюдений на двух трассах НЗ.

Как отмечалось, одновременные измерения на двух трассах НЗ проводились в июне 1981 г. Влияние искусственных неоднородностей на параметры сигналов НЗ было обнаружено как в ПЗ, так и в П2. Оно проявлялось в изменении во время нагрева всех определяемых статистических характеристик. Наиболее характерными и ярко выраженными являются изменения временного интервала корреляции τ_k , который значительно уменьшался во время нагрева с последующим восстановлением в паузе [2].

На рис. 1а, б в качестве примера приведены характерные графики временного хода τ_k , полученные для ПЗ (точки) и П2 (крестики) за 15.06.81 г. и 18.06.81 г. Периоды работы возмущающего передатчика (ВП) отмечены на оси времени штриховкой. Из рисунков видно, что корреляция изменений τ_k с нагревом в П2 более четкая, чем в ПЗ. Кроме того, величина τ_k в П2 при нагреве была в среднем в 2—5 раз меньше, чем в ПЗ, и составила $\tau_{k,2} \approx 3 \div 5$ с и $\tau_{k,3} \approx 15$ с.

Остановимся далее на такой важной характеристике процесса, как время его развития τ_1 . В [2] отмечалось, что на трассе П1—П2 время появления дополнительных мерцаний после включения нагревного стенда составляло в среднем $\tau_{1,2} \approx 20$ с. Для этого же периода по наблюдениям в ПЗ времена развития составляли в среднем $\tau_{1,3} \approx 40$ с. Времена релаксации мерцаний τ_2 оказались равными соответственно $\tau_{2,2} \approx 50 \div 70$ с и $\tau_{2,3} \approx 60$ с.

Амплитудные распределения, полученные по данным П2, как правило, хорошо описывались логарифмически нормальным законом. Во время нескольких сеансов нагрева они трансформировались в распределение Райса с последующим восстановлением в паузе.

3. Экспериментальные результаты, полученные на трассе, проходящей через край ОВ. В октябре 1982 г. были продолжены экспериментальные исследования неоднородной структуры ОВ на трассе П1—ПЗ.

Эксперименты проводились, как правило, с 16 до 24 часов МДВ, в основном методика измерений осталась прежней. В периоды нагрева ионосферы наблюдалось общее ослабление амплитуды пробных радиоволн примерно в 1,3 раза. Временной интервал корреляции τ_k при этом существенно уменьшался. Значение τ_k для различных частот пробных волн, полученное усреднением по 10-минутным сеансам, приведено в табл. 1.

Таблица 1

Частота ПВ	τ_k , с	
	Нагрев	Пауза
$f_1 = 5,65$ МГц	3,1	16,3
$f_2 = 6,5$ МГц	2,2	4,7
$f_2 = 7,5$ МГц	3,2	12,1

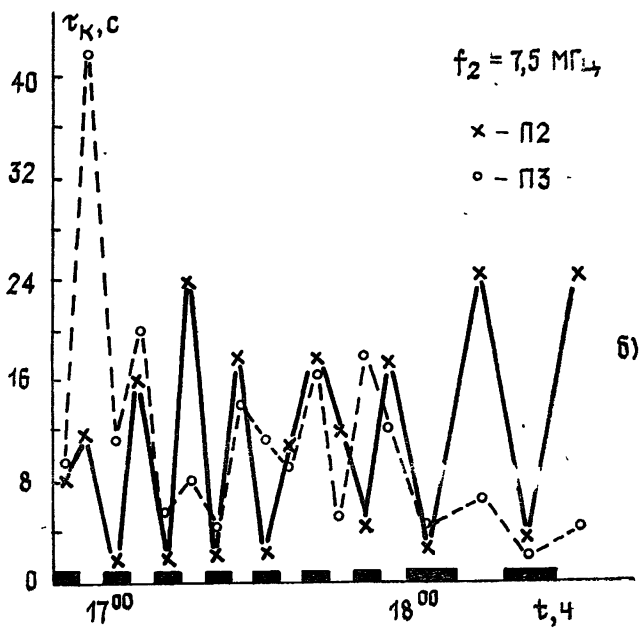
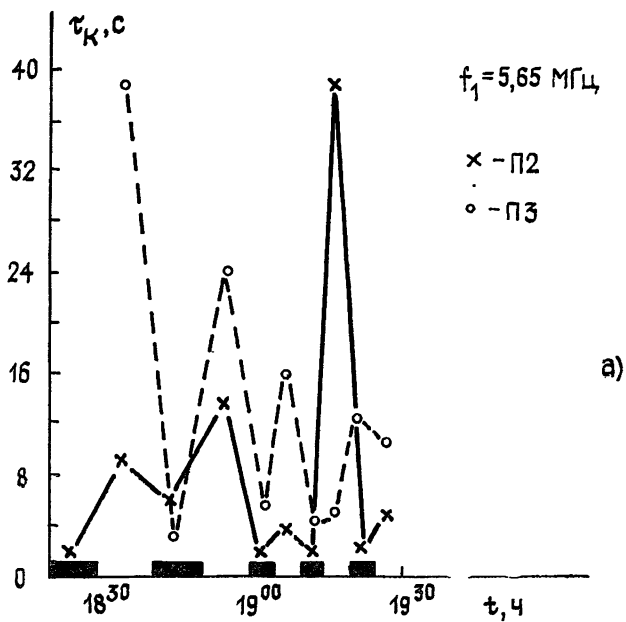


Рис. 1.

Для описания амплитудных распределений в 70% случаев нагрева ионосферы подходила модель Райса. Анализ найденных в этом случае значений коэффициента мутности $\alpha = (J_s/J_0) + J_s$ (J_0 — интенсивность «зеркальной», J_s — рассеянной компоненты) показал, что он увеличился на 20—60% во время нагрева ионосферы. Это эквивалентно возрастанию интенсивности рассеянной компоненты в 1,2—1,6 раза.

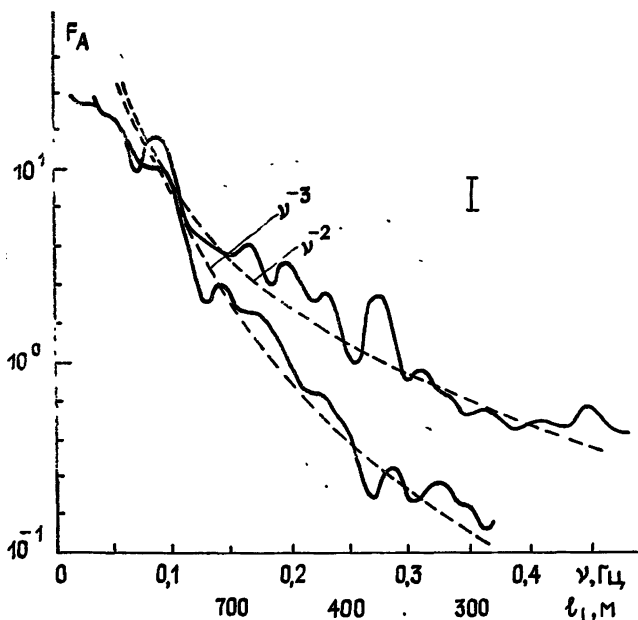


Рис. 2.

По известной методике (см., например, [5]) вычислялись ненормированные спектры флуктуаций амплитуд пробных волн $F_A(\nu)$, примеры которых за 25.09.82 г. в сеансы 21.40—21.45 и 21.50—21.55 на частоте $f_1 = 5,65$ МГц приведены на рис. 2. Здесь же пунктиром нанесены степенные спектры вида $F_A(\nu) \sim \nu^{-p}$ для $p=3$ (пауза) и $p=2$ (нагрев) соответственно*. Для удобства спектры совмещены. Как и в спутниковых измерениях [6], в нашем случае спектр флуктуаций $F_A(\nu)$ имеет «хвост», близкий к степенному.

Характерным является наличие максимумов в форме спектра при нагреве ионосферы в области частот 0,05—0,1 Гц и 0,15—0,3 Гц (см. рис. 2).

Аппроксимация спектра функцией вида $F_A(\nu) \sim \nu^{-p}$ и усреднение результатов по сеансам нагрева и паузы, проведенным в одинаковой ионосферной обстановке, показывает, что в диапазоне частот 0,1—0,3 Гц $p_{\text{нагр}} = 1,8$ и $p_{\text{пауза}} = 2,7$. Это несколько отличается от результатов определения показателя спектра p по спутниковым измерениям [7] в средних широтах в условиях спокойной ионосферы и в периоды искусственных возмущений.

Определение времени развития и релаксации дополнительных мерцаний дает значения $\tau_{1,3} \approx 20 \div 60$ с и $\tau_{2,3} \approx 40 \div 80$ с.

4. Обсуждение результатов. Переходя к обсуждению экспериментальных результатов, вначале остановимся на определении размеров искусственных неоднородностей электронной концентрации.

В приближении однократного рассеяния радиоволн на «замороженных» неоднородностях ионосферной плазмы временной интервал корреляции τ_k связан с размером неоднородностей соотношением вида

* Вертикальным отрезком на рис. 2 отмечен доверительный интервал при определении $F_A(\nu)$ с доверительной вероятностью 0,99.

$\tau_k \approx l_{\perp} / V$ [9], где l_{\perp} — поперечный размер, а V — скорость дрейфа неоднородностей. В этом случае, зная τ_k , можно оценить поперечный (по отношению к геомагнитному полю) размер искусственных неоднородностей электронной концентрации, ответственных за появление дополнительных флуктуаций амплитуд сигналов НЗ. Основываясь на [10], выберем среднее значение скорости $V \approx 100$ м/с. Тогда при одновременных измерениях имеем для П2 $l_{\perp} \approx 180 \div 500$ м, а для П3 — $l_{\perp} \approx 500 \div 2000$ м. Отсюда можно сделать вывод о том, что в условиях эксперимента 1981 г. одновременно на двух трассах, проходящих через разные участки ОВ, основной вклад в рассеяние сигнала вносили неоднородности разных масштабов, а именно с $l_{\perp} \approx 180 \div 500$ м — трасса проходила через центр ОВ и с $l_{\perp} \approx 500 \div 2000$ м — трасса проходила через край ОВ. Возможно, это связано с уменьшением излучаемой мощности нагревного стенда «Сура» на краю диаграммы направленности и, следовательно, с увеличением размеров генерируемых неоднородностей*.

В предположении амбиполярной диффузии вдоль магнитного поля для неоднородностей с $l_{\perp} > 100$ м (см., например, [11]) можно определить продольные (вдоль геомагнитного поля) размеры неоднородностей $l_{\parallel} \approx \sqrt{\tau_2 D_a}$, которые составили (при $D_a = (5 \div 6) \cdot 10^9$ см²/с) $l_{\parallel} \approx 6 \div 10$ км для П2 и П3.

В тех случаях, когда индекс флуктуаций был меньше единицы (т.е. набег фазы в слое с неоднородностями невелик), можно было оценить величину относительного отклонения электронной концентрации δN в неоднородностях [12], которая составила $\delta N \approx (5 \div 7) \cdot 10^{-3}$. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в [14].

Обращаясь к результатам наблюдения в П3 за 1982 г., следует отметить, что значения интервала корреляции τ_k при нагреве составляли 2 — 3 с и, соответственно, размеры неоднородностей $l_{\perp} \approx 200 \div 300$ м**. Регулярное уменьшение τ_k в периоды нагрева свидетельствует об уменьшении масштабов неоднородностей, вносящих определяющий вклад в рассеяние пробных волн, по сравнению с невозмущенными условиями. Сведения о рассеивающих неоднородностях можно получить также из анализа спектра $F_A(\nu)$ флуктуаций амплитуд ПВ (см. рис. 2). Полагая, что средняя скорость дрейфа неоднородностей составляла $V \approx 100$ м/с, на оси частот нанесены соответствующие ν масштабы рассеивающих неоднородностей l_{\perp} [7]. Согласно рис. 2 в период нагрева значительно увеличивается интенсивность неоднородностей с $l_{\perp} \approx 300 \div 700$ м, что и приводит к их определяющей роли в процессе рассеяния пробных волн.

Таким образом, на основе полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие основные выводы:

— применение метода наклонного зондирования на коротких трассах позволяет проводить регулярные исследования искусственной области возмущения и ее неоднородной структуры;

— корреляция изменений статистических характеристик сигналов НЗ с периодами нагрева выше в случае прохождения сигналов через центр ОВ, чем через ее край;

— за появление дополнительных мерцаний во время нагрева ответственны искусственные неоднородности с $l_{\perp} \approx 180 \div 500$ м на трассе, проходившей через центр ОВ, и с $l_{\perp} \approx 500 \div 2000$ м на трассе, проходившей через ее край при относительном отклонении электронной концентрации в них $\delta N \approx (5 \div 7) \cdot 10^{-3}$;

— форма спектра амплитудных флуктуаций сигналов НЗ близка

* Следуя теории самофокусировочной неустойчивости, которая привлекается для объяснения образования неоднородностей подобных масштабов [13], считаем, что $l_{\perp} \sim P_{эфф}^{-1}$.

** Эти размеры меньше, чем в 1981 г., что, вероятнее всего, связано с различием в геофизических условиях.

к степенной со средним показателем степени во время нагрева $\rho_{\text{нагр}} \simeq 1,8$ и во время паузы $\rho_{\text{пауза}} \simeq 2,7$.

В заключение заметим, что полученные методом многочастотного наклонного зондирования сведения о неоднородной структуре области возмущения удачно дополняют результаты предыдущих исследований искусственных ионосферных неоднородностей [7, 8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахметьева Н. В., Бенедиктов Е. А., Иванов В. А., Игнатьев Ю. А., Матюгин С. Н., Фролов В. А., Шавин П. Б., Шумаев В. В. В кн.: Эффекты искусственного воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу Земли. — М.: ИЗМИРАН, 1983, с. 77.
2. Бахметьева Н. В., Игнатьев Ю. А., Матюгин С. Н., Шавин П. Б. — Геомагнетизм и аэрономия, 1985, № 5, с. 777.
3. Белов И. Ф., Бенедиктов Е. А., Бычков В. В., Гетманцев Г. Г., Ерухимов Л. М., Зюзин В. А., Комраков Г. П., Митяков Н. А., Морозов В. И., Рапопорт В. О., Смирнов А. А. Тезисы XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — М.: Наука, 1981, с. 103.
4. Всехсвятская И. С. Статистические свойства сигналов, отраженных от ионосферы. — М.: Наука, 1973.
5. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. — М.: Мир, 1983.
6. Ерухимов Л. М., Косолапенко В. И., Лернер А. М., Мясников Е. Н. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 5, с. 524.
7. Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н., Поляков С. В., Рахлин А. В., Синельников В. М. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1814.
8. Ерухимов Л. М., Ковалев В. И., Лернер А. М., Мясников Е. Н., Поддельский И. И., Рахлин А. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1979, 22, № 10, с. 1278.
9. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. — М.: Наука, 1978.
10. Поляков В. М., Щепкин Л. А., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д. Ионосферные процессы. — Новосибирск: Наука, 1968.
11. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М.: Наука, 1974.
12. Гетманцев Г. Г., Ерухимов Л. М., Митякова Э. Е. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1976, 19, № 4, с. 505.
13. Васильков В. В., Гуревич А. В. — В сб.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 81.
14. Ерухимов Л. М., Митяков Н. А., Мясников Е. Н., Фролов В. Л. — Тезисы XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — М.: Наука, 1981, ч. 1, с. 132.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
25 июня 1985 г.

THE DIAGNOSTICS OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC TURBULENCE BY OBLIQUE SOUNDING

*N. V. Bakhtmet'eva, V. A. Ivanov, Yu. A. Ignat'ev, V. A. Frolov,
P. B. Shavin, V. V. Shumaev*

The results of experimental investigation are presented of artificial middle-scale irregularities ($h \simeq 180 \div 2000$ m) arising in the ionospheric F region under the action of intense radio waves. The results have been obtained by multifrequency oblique sounding at two tracks of about 300 km. Dimensions of irregularities have been found which give the maximal contribution into the scattering of radio waves on these tracks. The type of the amplitude fluctuation spectrum is investigated.