

УДК 551.510.535

О ВРЕМЕНАХ РАЗВИТИЯ И РЕЛАКСАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

В. В. Беликович, Л. М. Ерухимов, В. А. Зюзин, Ю. С. Коробков, О. М. Максименко, А. М. Насыров, Е. Н. Сергеев, В. Л. Фролов, П. Б. Шавин

Рассмотрены экспериментальные результаты исследования и проведено сравнение времен развития и релаксации искусственных мелко-масштабных неоднородностей и их спектральных характеристик при воздействии на F -слой ионосферы мощным радиоизлучением КВ диапазона на частотах 4,785 и 2,95 МГц.

При интерпретации результатов исследования воздействия мощными радиоволнами КВ диапазона на плазму F -слоя ионосферы при сложных временных режимах излучения волны накачки (ВН), при анализе данных о динамике искусственного радиоизлучения возмущенной области (ВО) ионосферы и для решения целого ряда других задач необходимо знать характеристики развития и релаксации мелко-масштабной ($l_{\perp} < \lambda_0$, где l_{\perp} — размер неоднородностей в ортогональном к H_0 направлению, λ_0 — длина ВН в вакууме) части спектра искусственной ионосферной турбулентности (МИИТ). Динамические характеристики МИИТ рассматривались в целом ряде работ [1–5]. Однако основным недостатком представленных в них измерений является либо узость области исследуемых масштабов l_{\perp} , либо анализ экспериментальных данных, полученных с помощью неадекватных методик и в разных ионосферных условиях, а в некоторых случаях — для различных мощностей и частот ВН. Все это, несомненно, уменьшает достоверность выводов о характеристиках МИИТ и ограничивает область применения полученных результатов.

В первой части настоящей работы с помощью метода ракурсного рассеяния радиоволн (см., например, [1]) анализируются результаты одновременных измерений времен развития и релаксации искусственных неоднородностей (ИН) в области масштабов $l_{\perp} \approx 1,6 - 100$ м. Этот эксперимент был выполнен на нагревном стенде «Сура» (г. Горький) 29 октября 1985 г. с 14⁰⁰ до 17⁰⁰ мск. Воздействие на ионосферную плазму осуществлялось на частоте $f_{ВН} = 4,785$ МГц волнами O -поляризации с эффективной мощностью излучения $\tilde{P}_o = 30$ МВт при режиме работы передатчика 5 мин — нагрев, 5 мин — пауза*. Для диагностики МИИТ в области $l_{\perp} = 100$ м, как и в [6], использовалось излучение станции вертикального зондирования на частотах $f \approx f_{ВН}$, которая располагалась в 107 км западнее нагревного стенда. Неоднородности с $l_{\perp} \approx 1,6 - 10$ м лоцировались с помощью радиоизлучения телецентров $I-V$ каналов (49–93 МГц) и сигналов КВ радиостанций на частотах 18–23 МГц; прием рассеянных сигналов осуществлялся в приемном пункте «Темрюк» (Краснодарский край).

Во второй части работы приведены результаты первых наших измерений ракурсного рассеяния КВ и УКВ радиоволн при воздействии на F -слой ионосферы радиоизлучением на частоте $f_{ВН} = 2,8 - 3,0$ МГц с эффективной мощностью $\tilde{P}_o \approx 0,5$ МВт. Эти эксперименты были вы-

* Значения \tilde{P}_o здесь и далее даны с учетом регулярного поглощения радиоволн в нижней ионосфере.

полнены на нагревном стенде «Зименки» (г. Горький) в периоды 26—28 ноября 1984 г. и 28—29 октября 1985 г. в вечернее время суток ($T=18^{00}-23^{00}$ мск). Регистрация рассеянных сигналов осуществлялась в приемных пунктах «Светлый Яр» (Волгоградская обл.) и «Темрюк».

1. Времена развития и релаксации МИИТ ($f_{\text{ВН}}=4,785$ МГц). Время развития (τ_1) ИН различных масштабов определялось нами по характерному времени роста амплитуды рассеянного сигнала до своего стационарного значения. Для анализа зависимости $\tau_1(l_{\perp})$ с целью уменьшения в ней влияния размеров области рассеяния выбирались экспериментальные данные, отвечающие оптимальным условиям ракурсного рассеяния радиоволн, когда основной вклад в рассеяние вносила центральная часть ВО [7]. При этом, как показывают расчеты, время развития амплитуды сигнала не более чем в два раза превышает время роста собственно интенсивности неоднородностей.

В работах [1, 4] отмечался близкий к степенному характер зависимости $\tau_1(l_{\perp})$ ($\tau_1 \propto l_{\perp}^{\beta}$). Для различных циклов измерений значение β для $l_{\perp} \approx 3-20$ м изменялось в широких пределах $\beta = 0-1$; $\langle \beta \rangle \approx 0,3-0,5$. На рис. 1 (кривая τ_1) приведены результаты одновременных измерений, выполненных 29.10.1985 г. в течение $T=15^{00}-17^{00}$ мск в диапазоне масштабов МИИТ $l_{\perp}=1,6-100$ м. Видно, что во всем интервале l_{\perp} зависимость $\tau_1(l_{\perp})$ может быть хорошо аппроксимирована единым степенным законом с $\beta \approx 0,4$.

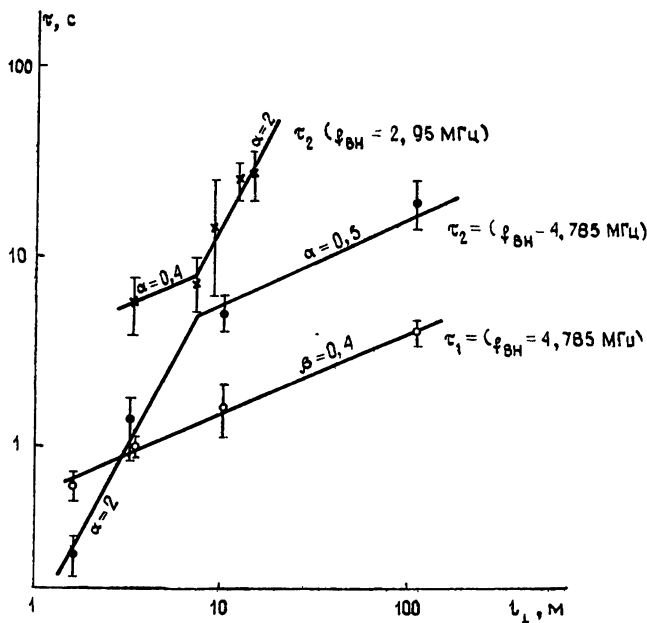


Рис. 1.

Полученный результат приводит к одному важному следствию: форма спектра интенсивности флуктуаций плотности плазмы $\Phi_N(\kappa_{\perp} = 2\pi/l_{\perp})$ изменяется в процессе развития МИИТ. Так если для стационарного состояния при длительном нагреве ионосферы $\Phi_N(\kappa_{\perp}) \propto \kappa_{\perp}^{-p_0}$ с $p_0 \approx 1-2$ в области $l_{\perp}=3-12$ м и $p_0 > 3$ для $l_{\perp}=1,6-3$ м, то в начальный момент времени развития МИИТ показатель спектра может уменьшаться более чем на 2 единицы по сравнению со значением p_0 . Из этого следует, что спектральная интенсивность для $l_{\perp} \approx 3$ м в первое время (порядка нескольких секунд) после начала воздействия будет превышать интенсивность более крупномасштабных и мелко-масштабных неоднородностей, т.е. в области масштабов $l_{\perp} \approx 3$ м образуется максимум в спектре $\Phi_N(\kappa_{\perp})$.

На рис. 1 (кривая τ_2 для $f_{ВН}=4,785$ МГц) приведены результаты измерений для $l_{\perp}=1,6-100$ м времени релаксации рассеянного сигнала, определяемого нами по времени уменьшения его амплитуды в e раз. Полученная зависимость $\tau_2(l_{\perp})$ аналитически может быть аппроксимирована как

$$\tau_2 \propto l_{\perp}^{\alpha}, \text{ где } \alpha = \begin{cases} 2 & l_{\perp} = 1,6 \div 7 \text{ м} \\ 0,5 & l_{\perp} = 7 \div 100 \text{ м} \end{cases}.$$

Если по величине τ_2 в области квадратичной ее зависимости от l_{\perp} ($l_{\perp} < 7$ м) определить коэффициент диффузии $D = l_{\perp}^2 / 40\tau = 1,7 \cdot 10^3$ см²/с, то он почти точно совпадает со значением $D = (1 + T_e/T_i) D_{e\perp}$, вычисленным для отвечающих условию проведения эксперимента параметров ионосферы. В области $l_{\perp} > 7$ м, где показатель степени $\alpha \simeq 0,5$, скорость релаксации ИН, согласно [1], определяется продольной ионной диффузией.

Приведенные для времени релаксации ИН результаты соответствуют опубликованной в [5] зависимости $\tau_2(l_{\perp})$, которая была построена объединением большого числа различных измерений. Некоторое отличие значений времен релаксации неоднородностей объясняется наблюдаемым суточным ходом изменения значений τ_2 [1,2]: в более поздние вечерние часы (к которым относятся данные работы [5]) времена релаксации по сравнению со своими дневными значениями (результаты экспериментов, приведенные на рис. 1) увеличиваются приблизительно в два раза. Следует отметить, что причина увеличения τ_2 при переходе к ночным часам в условиях уменьшения T_e и преобладания столкновений электронов с ионами ($v_{ei} > v_{en}$) на высотах ВО в настоящее время остается неясной.

Одновременно с рассмотренными выше исследованиями времени развития и релаксации искусственных неоднородностей были выполнены измерения характеристик аномального ослабления (АО) радиоволн, зондирующих ВО*. Было получено, что времена развития АО на частотах, близких к $f_{ВН}$, составляли 0,8—1,6 с и соответствовали времени развития неоднородностей с $l_{\perp} \simeq 3-10$ м. С ростом величины расстройки пробных волн относительно $f_{ВН}$ времена развития АО возрастали, составляя $\simeq 3-4$ с для $\Delta f = \pm 300$ кГц, что соответствовало времени развития неоднородностей с $l_{\perp} \simeq 50-100$ м. Времена релаксации АО для $f_{пв} \simeq f_{ВН}$ были порядка 12 с и отвечали временам релаксации неоднородностей с $l_{\perp} \simeq 50$ м. При увеличении величины отстройки до $\Delta f \simeq \pm 1$ МГц времена восстановления амплитуды пробных волн возрастали до 30 с.

Таким образом, проведенные измерения показывают, что на начальном этапе развития аномальное ослабление определяется более мелко-масштабными неоднородностями, чем при достижении искусственной турбулентности своего стационарного уровня.

Более подробный анализ связи динамики МИИТ и АО радиоволн в ВО ионосферы выходит за рамки поставленных в настоящей работе задач и будет рассмотрен в следующих публикациях.

2. Особенности генерации МИИТ при $f_{ВН} \simeq 3$ МГц. Интерес к экспериментам по воздействию на F -слой ионосферы мощным радиоизлучением с $f_{ВН} \simeq 2f_{eH}$ (f_{eH} — гирочастота электронов) связан с наблюдавшимся здесь значительным увеличением интенсивности МИИТ [8]. Ниже мы остановимся на исследовании методом фрактурного рассеяния радиоволн некоторых свойств ИН в диапазоне масштабов $l_{\perp} \simeq 3,3-14$ м, возбуждаемых радиоизлучением O -поляризации мощностью $P_0 = 0,5$ МВт на частотах $f_{ВН} = 2,8-3,0$ МГц. Эксперимент проводился в условиях, когда $f_{OF_2} \simeq 3-3,2$ МГц и ВН отражалась в F -слое ионосферы на высотах $h \simeq 300$ км**.

* Измерения проводились в непосредственной близости от нагревного стенда на нескольких частотах пробных волн, вертикально зондирующих ВО ионосферы.

** Заметим, что значение гирочастоты электронов для местоположения нагревного стенда на высоте $h \simeq 300$ км равно 1,25 МГц, $2f_{eH} \simeq 2,5$ МГц.

Полученные данные позволяют, в первую очередь, определить верхнюю границу пороговой мощности генерации МИИТ: $\bar{P}_{э, \text{пор}} \leq \leq 0,5$ МВт, что несколько меньше величины $\bar{P}_{э, \text{пор}} \simeq 1-2$ МВт для случая нагрева ионосферной плазмы на частотах $f_{\text{ВН}} \simeq \simeq 5-6$ МГц (см. также [4, 9, 10]). Большие случайные флуктуации значений τ_1 ($\tau_1 \simeq 20-80$ с) от цикла к циклу нагрева для всей области исследуемых масштабов $l_{\perp} \simeq 3,3-14$ м, по-видимому, объясняются близостью мощности ВН к пороговой мощности генерации ИИ. Изменение частоты ВН в диапазоне 2,8—3 МГц не показало заметных изменений каких-либо параметров рассеянных сигналов.

По измерениям на $f_{\text{ВН}}=2,95$ МГц при $\bar{P}_{э} \simeq 0,5$ МВт был вычислен эффективный поперечник рассеяния ВО:

$$\sigma = \begin{cases} 4 \cdot 10^5 \text{ м}^2 & \text{для } l_{\perp} \simeq 3,3 \text{ м} \\ 4 \cdot 10^6 \text{ м}^2 & \text{для } l_{\perp} \simeq 9 \text{ м} \end{cases}$$

Рассчитанная по этим значениям σ величина показателя спектра $\Phi_N(\kappa_{\perp})$ оказывается равной $p_0 \simeq 1,3$, т. е. в области масштабов $l_{\perp} \simeq \simeq 3-9$ м наблюдается более плоский стационарный спектр $\Phi_N(\kappa_{\perp})$ по сравнению с результатами наших измерений для $f_{\text{ВН}} \simeq 5-6$ МГц, где $p_0 \simeq 2$. При этом, хотя для $f_{\text{ВН}}=2,95$ МГц мы лишь незначительно превышали порог возбуждения МИИТ, по абсолютной величине σ здесь лишь приблизительно в два раза меньше соответствующих значений для $f_{\text{ВН}}=5-6$ МГц, где по мощности ВН имелось не менее чем пятикратное превышение порога.

Наиболее неожиданные результаты при работе на $f_{\text{ВН}}=3$ МГц были получены нами при исследовании характера релаксации МИИТ. В первую очередь это касается изменения зависимости $\tau_2(l_{\perp})$, приведенной на рис. 1 (кривая τ_2 для $f_{\text{ВН}}=2,95$ МГц): квадратичная зависимость $\tau_2 \propto l_{\perp}^2$ имеет место для $l_{\perp} > 7$ м, а для $l_{\perp} < 7$ м наблюдается уменьшение показателя степени до значений $\alpha \simeq 0,4$. Вычисленный для $l_{\perp} 7-14$ м коэффициент диффузии составляет $D = l_{\perp}^2 / 40\tau = 1,6 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$, что по величине наиболее близко к значению $2De_{\perp} \simeq 0,6-0,8 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$.

Если сравнить (рис. 1) зависимость $\tau_2(l_{\perp})$ для двух частот ВН 4,785 и 2,95 МГц, то с учетом увеличения времени релаксации при переходе от дневных к вечерним часам для характерного масштаба перегиба зависимости $\tau_2(l_{\perp})$ $l_{\perp} \simeq 7$ м изменения величины τ_2 практически не наблюдается. Для других значений времени релаксации в случае $f_{\text{ВН}}=2,95$ МГц превышают соответствующие значения для $f_{\text{ВН}}=4,785$ МГц и тем больше, чем сильнее масштаб неоднородностей отличается от $l_{\perp} \simeq 7$ м.

На рис. 2 приведены примеры характера релаксации амплитуды рассеянного сигнала A_s , отнесенной к амплитуде сигнала во время воздействия, для различных l_{\perp}^* . Видно, что для всех l_{\perp} имеет место двухступенчатая релаксация, характеризующаяся быстрым временем уменьшения амплитуды — $\tau_2(1)$, к результатам исследования которого относятся данные рис. 1, и медленным — $\tau_2(2)$. По имеющимся данным время, при котором происходит изменение характера релаксации, приблизительно пропорционально l_{\perp} , а зависимость $\tau_2(2)$ от l_{\perp} близка к квадратичной. При этом рассчитанный коэффициент диффузии $D = l_{\perp}^2 / 40\tau_2(2) \simeq (1,5-2) \cdot 10^2 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ оказывается в несколько раз меньше $2De_{\perp}$. Последнее указывает на существование даже после выключения ВН механизма поддержания мелкомасштабных неоднородностей ионосферной плазмы (по крайней мере внутри ВО).

Двухступенчатый характер релаксации, согласно полученным нами к настоящему времени данным, наиболее ярко проявляется на более низких частотах ВН (т. е. при меньшей плотности плазмы), а при срав-

* Для $l_{\perp} = 3,3$ м масштаб по оси времени уменьшен в пять раз.

нении результатов измерений при одной и той же $f_{ВН}$ — в вечерние и поздние вечерние часы. Причина замедления релаксации мелкомасштабных искусственных неоднородностей в настоящее время остается невыясненной. Возможно в этом проявляется влияние механизма генерации ионосферных неоднородностей в F -слое в естественных условиях на средних широтах в поздние вечерние и ночные часы.

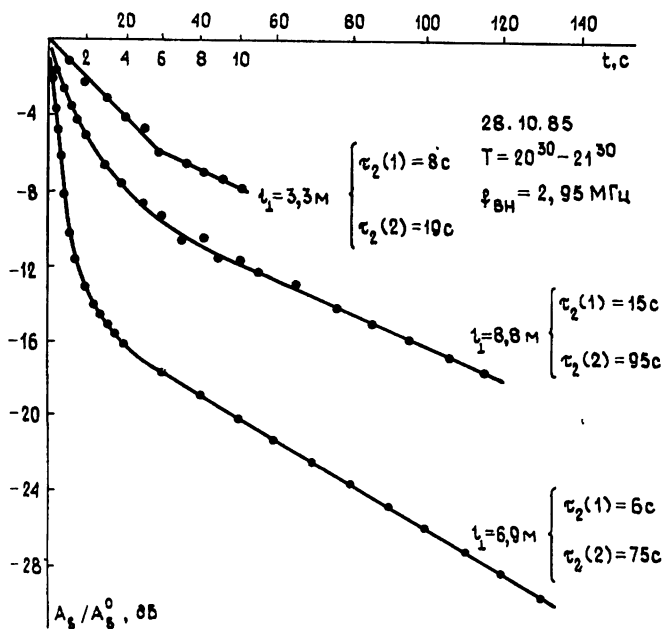


Рис. 2.

На рис. 2 для $l_{\perp} = 3,3 \text{ м}$ приведена одна из усредненных реализаций записи рассеянного сигнала, демонстрирующая двухступенчатый характер его релаксации. Однако в проведенном цикле измерений для $l_{\perp} = 3,3 \text{ м}$ чаще наблюдалась не экспоненциальная зависимость $A_s(t)$, а степенная вида $A_s \propto t^{-\nu}$ с $\nu \simeq 0,5$, которая ранее отмечалась также в [1].

Приведенные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований, как и в [10], показывают, насколько параметры и динамика МИИТ существенно образом могут определяться частотой ВН. В качестве первоочередной задачи здесь необходимо провести более детальные исследования спектральных характеристик МИИТ для различных $f_{ВН}$ и более точно определить значения пороговых мощностей генерации искусственных мелкомасштабных неоднородностей. В частности, несоответствие полученных к настоящему времени в различных экспериментах характеристик $\Phi_N(\kappa_{\perp})$ может быть связано с проведением измерений на различных частотах ВН.

Полученные для $f_{ВН} \simeq 3 \text{ МГц}$ новые сведения о зависимости $\tau_2(l_{\perp})$ еще более усложняют наши представления о механизме релаксации ИН в F -слое ионосферы. Сейчас остается неясным, чем определяется изменение характера зависимости $\tau_2(l_{\perp})$ в области $l_{\perp} < 7 \text{ м}$: близостью $f_{ВН}$ к $2f_{eH}$, просто низким значением $f_{ВН}$ или определяющим здесь является специфика свойств ночной ионосферы. Не исключена возможность влияния на характер диффузии ИН ионосферной плазмы каких-либо других, не принимаемых нами здесь во внимание, причин, которые, например, могут иметь существенное значение при генерации естественных мелкомасштабных неоднородностей. Существование таких неоднородностей в F -слое ионосферы вплоть до масштабов $l_{\perp} \simeq 3 \text{ м}$, сопровождающееся аномально длительной релаксацией рассеянного сигнала после выключения ВН, было отмечено в работах [3, 11].

Авторы выражают свою искреннюю признательность Г. П. Комракову, С. А. Дмитриеву, Ю. А. Железнякову, Д. И. Образцову за помощь в организации и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Беленов А. Ф., Бубнов В. А., Ерухимов Л. М. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 12, с. 1805.
3. Коровин А. В. Диссертация. Казань, 1984.
4. Фролов В. Л. Диссертация. Горький, 1979.
5. Ерухимов Л. М., Мясников Е. Н., Фролов В. Л. Тезисы докладов Всесоюзного совещания по неоднородной структуре ионосферы. — Ашхабад, 1979, с. 38.
6. Беликович В. В., Зюзин В. А., Толмачева А. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1985, 28, № 5, с. 579.
7. Алебастров В. А., Бенедиктов Е. А., Иванов В. Н. и др. Препринт НИРФИ № 173. — Горький, 1983.
8. Fialer P. A. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 923.
9. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 4, с. 503.
10. Ерухимов Л. М., Ковалев В. Я., Куракин Е. П. и др. — Геомагнетизм и аэрномия, 1987, 27, № 5, с. 758
11. Коровин А. В., Насыров А. М. и др. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 6, с. 675.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
23 июня 1986 г.

TIMES OF DEVELOPMENT AND RELAXATION OF ARTIFICIAL SMALL-SCALE IRREGULARITIES

*V. V. Belikovich, L. M. Erukhimov, V. A. Zyusin, Yu. S. Korobkov,
O. M. Maksimenko, A. M. Nasyrov, E. N. Sergeev, V. L. Frolov, P. B. Shavin*

Experimental results are considered and a comparison is made between the time of development and relaxation of artificial small-scale irregularities and their spectral characteristics under the action of the heating facility at 4,785 and 2,95 MHz on the ionospheric *F*-layer.