

частот колебаний амплитуды заключен в пределах 12—24 Гц. Интенсивность колебаний относительно среднего уровня флуктуаций сигнала может существенно изменяться как в отдельном цикле излучения, так и от цикла к циклу (от 0,1 до 1).

4) Наблюдаются флуктуации в виде отдельных «щугов» с длительностью 1 с (рис. 1в).

5) На записях амплитуды пробных волн быстрые флуктуации не зарегистрированы. В ряде сеансов проводились параллельные измерения интенсивности стимулированного радиоизлучения ионосферы — явления, впервые исследованного в [3]. При этом было обнаружено, что в сеансах с наиболее длительными интенсивными быстрыми флуктуациями волны накачки происходили существенные качественные изменения спектральных характеристик стимулированного радиоизлучения, а также увеличивался их статистический разброс в различных циклах излучения передатчика. Кроме того, следует отметить, что вероятность появления быстрых флуктуаций возрастала в те дни, когда наблюдались всплески радиоизлучения Солнца метрового и сантиметрового диапазонов

ЛИТЕРАТУРА

1. Ерухимов Л. М. и др. — В сб.. Термовые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979.
2. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митяков Н. А., Фролов В. Л. — Геомагнетизм и аэрономия, 1983, 23, № 3, с. 433.
3. Thide Bo, Korka H, Stubbe P. — Phys Rev. Lett., 1982, 49, № 21, p. 1561.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
29 марта 1984 г.

УДК 551.510.535

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВОЗБУЖДЕНИЮ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПОМОЩЬЮ НАГРЕВНОГО СТЕНДА «ГИССАР»

Л. М. Ерухимов, В. Я. Ковалев, Е. П. Куракин, С. Ф. Марченко, С. А. Метелев,
Л. Н. Рубцов, В. Л. Фролов

Начиная с 1981 г., с введением в строй нагревного стенда «Гиссар» (г. Душанбе, Институт астрофизики АН ТаджССР) в СССР были начаты исследования по воздействию мощным радиоизлучением на ионосферную плазму в условиях низких широт. Энергетический потенциал стенда, определяемый мощностью КВ-передатчика $P_0 = 120 \text{ кВт}$ и направленными свойствами зенитной антенной решетки с $G \approx 35 \div 80$ в зависимости от частоты излучения, составляет $P_a = P_0 G = 4 \div 9 \text{ МВт}$. Антennaя решетка (с проволочной сеткой на поверхности Земли) обеспечивает излучение радиоволн правой и левой круговой поляризации в диапазоне частот 3—6 МГц.

Диагностика возмущенной области (ВО) ионосферы осуществляется путем ее зондирования сигналами ионосферной станции СП-3, регистрации амплитуды отраженных от ионосферной плазмы волны накачки (ВН) и пробных волн (ПВ) на частотах, близких к частоте волны накачки, приемом ракурсно рассеянных на мелкомасштабных искусственных неоднородностях КВ-радиосигналов вещательных станций и др. При этом используется сеть приемных пунктов, расположенных около нагревного стенда в радиусе до 150 км.

Изложенные ниже результаты основаны на трех циклах измерений (февраль и декабрь 1982 г. и октябрь 1983 г.). Измерения проводились, как правило, в послеполуденное и вечернее время суток в основном при работе мощного радиопередатчика на частоте $f_{\text{ВН}} = 5,9 \text{ МГц}$ (редко при $f_{\text{ВН}} = 3,9 \text{ МГц}$) в условиях, когда критические частоты F_2 -слоя ионосферы составляли $f_{0F_2} = 8 \div 13 \text{ МГц}$. В этих экспериментах исследовались самовоз действие мощного радиоизлучения за счет стрикционной и тепловой параметрических неустойчивостей [1, 2], эффекты аномального ослабления и ракурсного рассеяния зондирующего возмущенную область коротковолнового радиоизлучения на мелкомасштабной ионосферной турбулентности [3].

1. **Вертикальное зондирование ВО.** На рис. 1 приведены два примера регистрации ионограмм для условий спокойной ионосферы (а) и спустя несколько минут после начала воздействия на частоте $f_{\text{ВН}} = 5,9 \text{ МГц}$ (б). Можно видеть исчезнове-

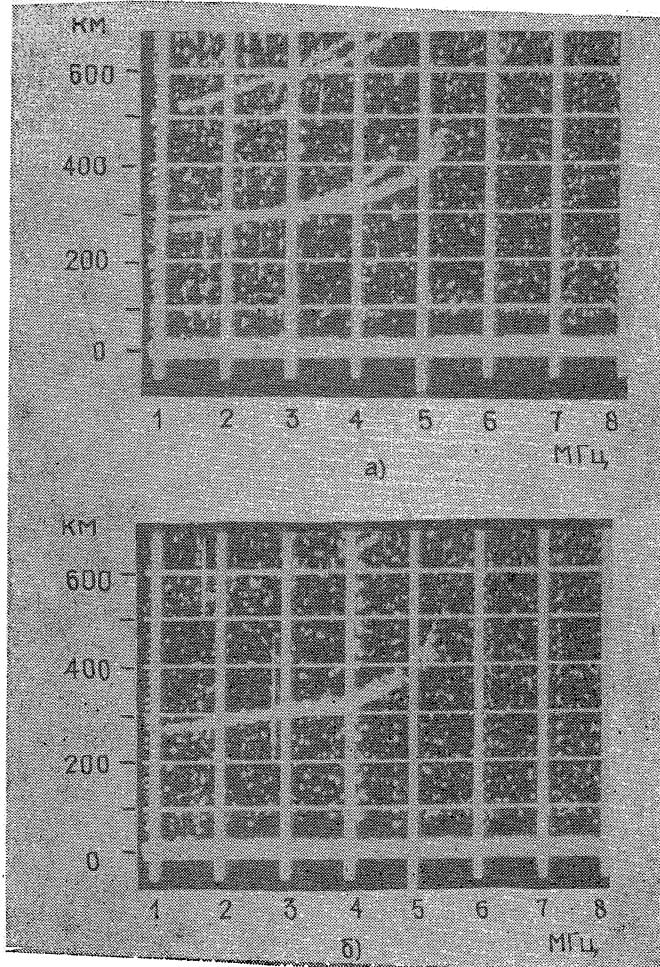


Рис. 1.

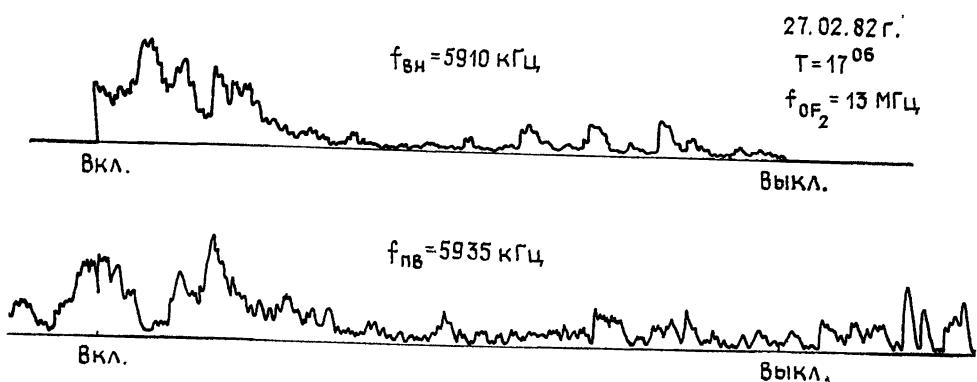


Рис. 2.

ние следа «обыкновенной» компоненты поляризации (O -моды) в отраженном от возмущенной области сигнале. Этот эффект, наблюдавшийся ранее на более высоких широтах, обусловлен трансформацией O -моды в плазменную моду на мелкомасштабных, сильно вытянутых вдоль спиральных линий геомагнитного поля H_0 неоднородностях, возбужденных мощной волной обычной поляризации при ее взаимодействии с плазменной волной вблизи уровня отражения волны накачки [2, 3].

Важно отметить, что пороговая мощность $P_{\text{эп}}$ возникновения эффекта (с учетом поглощения волн в нижней ионосфере) составляет 1–3 МВт и не превышает значений, наблюдаемых на более высоких широтах. Динамика этого эффекта, который получил название аномального ослабления (АО), хорошо видна на рис. 2, где приведены временные записи амплитуд сигналов волны накачки ($f_{\text{вн}} = 5,91 \text{ МГц}$) и пробной волны ($f_{\text{вн}} = 5,935 \text{ МГц}$). Через время $\tau_b \approx 40 \text{ с}$ после включения волны накачки происходит уменьшение $A_{\text{вн}}$ и $A_{\text{пв}}$. Амплитуда пробной волны восстанавливается после выключения волны накачки через $\tau_b \approx 30 \text{ с}$. Наряду с развитием аномального ослабления через 30–60 с после включения волны накачки наблюдалось увеличение частоты флюктуаций отраженного от ионосферы зондирующего сигнала. Эти быстрые искусственные флюктуации исчезали за время порядка 60–90 с после окончания воздействия. Появление таких флюктуаций связано с генерацией в возмущенной области ионосферы искусственных неоднородностей с масштабами $l_1 > 100 \text{ м}$ [4]. Они способны вызывать явление искусственного Spread на ионограммах, пример которого приведен на рис. 3. Следует заметить, что наблюдались случаи, когда искусственные крупномасштабные неоднородности возмущенной области релаксировали в течение гораздо более длительного времени (десяти и более минут) после окончания нагрева плазмы F -слоя ионосферы.

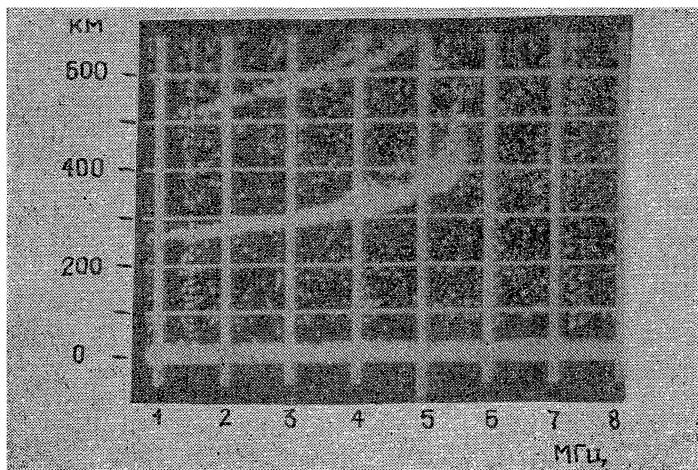


Рис. 3.

Исследование параметров аномального ослабления показало, что при полной мощности ВН времена его развития τ_b изменялись от 40–60 с днем до 6–10 с в вечерние часы и имели достаточно слабую обратную зависимость от P_o . При превышении пороговой мощности развития аномального поглощения коэффициент нелинейного поглощения $K_{\text{AO}} = A_0/A_1$ (A_0 и A_1 — соответственно амплитуды отраженной от ионосферы волны в невозмущенных условиях и при развитии аномального поглощения) приблизительно равен отношению $P_o/P_{\text{эп}}$.

При воздействии на ионосферную плазму F -слоя волнами обычной поляризации в условиях слабого регуляризованного поглощения волны накачки в нижней ионосфере наблюдалось ее стрикционное самовоздействие с пороговой мощностью ~ 5 – 7 МВт , имеющее характерные времена развития $\tau_{\text{стр}} \approx 4 \text{ мс}$. При этом величина уменьшения амплитуды сигнала не превышала, как правило, 10–20% от уровня A_0 . Наблюдались также быстрое с характерным временем $\tau_n \approx 0,6 \text{ с}$ колебание амплитуды отраженного сигнала волны накачки («пичики») и эффект переноса модуляции на пробные волны [2].

2. Ракурсное рассеяние КВ-радиоволн. Для исследования характеристик мелкомасштабной искусственной ионосферной турбулентности методом ракурсного рассеяния радиоволн сигналы вещательных станций (начиная с 1983 г.) принимались в двух приемных пунктах, которые располагались на расстояниях 25 и 150 км к югу от нагревного стенда. Специфика данного эксперимента заключалась в том, что для обеспечения ракурсных условий рассеиваемое радиоизлучение должно было падать сверху на область рассеяния, т. е. радиоволны до попадания в возмущенную область

должны были предварительно отразиться от вышележащих слоев ионосферы. Это на-кладывало определенное ограничение на возможный диапазон используемых частот. В экспериментах наблюдалась рассеянные сигналы на частотах в диапазоне 9,8—17,6 МГц, позволившие исследовать характеристики искусственных мелкомасштабных неоднородностей в интервале масштабов $l_{\perp} \approx 8,5-15$ м.

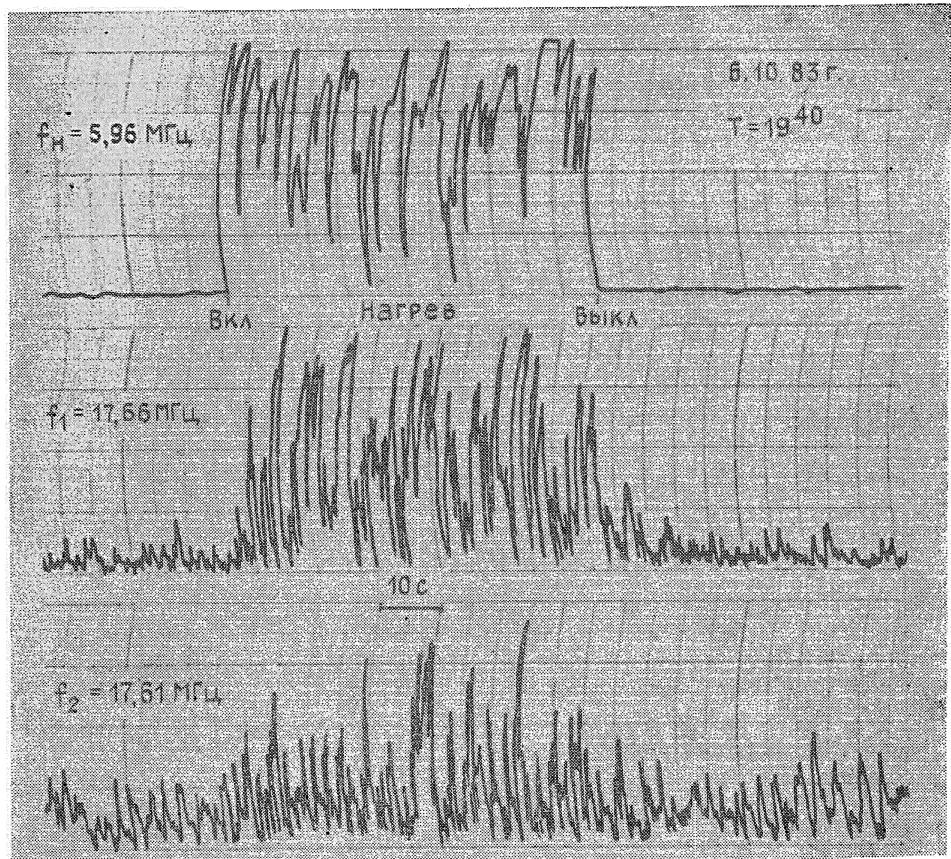


Рис. 4.

Для иллюстрации наблюдаемого эффекта ракурсного рассеяния радиоволн на рис. 4 приведен характерный пример одновременной регистрации рассеянных сигналов двух радиовещательных станций на частотах $f_1 = 17,6$ МГц. Хорошо прослеживается изменение амплитуды рассеянного сигнала во времени при включении и выключении волны накачки, а также появление характерных биений принимаемого сигнала, обусловленных доллеровским сдвигом его частоты относительно падающего на возмущенную область радиоизлучения ($f_2 = 17,61$ МГц). Последнее определяется движением рассеивающих неоднородностей, вызванным дрейфом ионосферной плазмы на высоте возмущенной области.

Исследование свойств искусственных неоднородностей ионосферной плазмы показало, что:

а) времена развития неоднородностей зависят от величины их масштабов l_{\perp} и в среднем определяются соотношением $\tau_{разв} \sim l_{\perp}$, составляя 8—10 с для $l_{\perp} \approx 10$ м и ~ 15 с для $l_{\perp} \approx 15$ м при мощности волны накачки $P_n \approx 9$ МВт. С уменьшением мощности волны накачки времена $\tau_{разв}$ возрастили как $\tau_{разв} \propto P_n^{\alpha}$, где $\alpha \approx 0,5-1$;

б) времена релаксации неоднородностей $\tau_{рел}$ в диапазоне масштабов $l_{\perp} = 8,5-15$ м удовлетворяли зависимости $\tau_{рел} \propto l_{\perp}^{\beta}$, где β близко к 2: $\tau_{рел} \approx 5-8$ с для $l_{\perp} = 8,5$ м и $\tau_{рел} \approx 25$ с для $l_{\perp} = 15$ м. Величина $\tau_{рел}$ возрастила в вечерние часы и не зависела от местоположения неоднородностей в возмущенной области, определяемого по проходу ракурсного контура через точку наблюдения. Обнаружено, что $\tau_{рел}$ может возрастать с ростом мощности волны накачки;

в) проведенные измерения амплитуды рассеянного сигнала позволяют сделать оценки сечения рассеяния в возмущенной области: при мощности волны накачки $P_n \approx 9$ МВт для масштабов искусственной турбулентности $l_{\perp} \approx 10$ м $\sigma \geq 10^6$ м².

С уменьшением мощности волны накачки величина σ уменьшалась как $\sigma \propto P_s^{\gamma}$, где $\gamma \approx 1$;

г) исследование доплеровских сдвигов частоты Ω_d рассеянного сигнала показало, что $\Omega_d \propto f$ и составляет 2,0—2,4 Гц для $f = 15$ МГц. Оценки меридиональной составляющей скорости дрейфа рассеивающих неоднородностей возмущенной области привели к значениям $v_{dr} \approx 20$ м/с.

Суммируя полученные результаты исследований пороговых мощностей неустойчивостей, характерных времен их развития, релаксации искусственной турбулентности (они более подробно будут опубликованы позднее) и зависимости наблюдаемых эффектов от мощности волны накачки, можно сделать вывод, что в целом имеет место хорошее соответствие полученных на стенде «Гискар» результатов с данными аналогичных измерений, выполненных на более высоких широтах [14]. Это позволяет предположить, что на широтах стенда «Гискар» еще возможно эффективное возбуждение в ионосфере искусственной турбулентности при небольших P_s (см. примечание при корректуре на стр. 668).

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Ерхимов Л. М., Метелев С. А., Митяков Н. А., Фролов В. Л. — Геомагнетизм и аэрономия, 1983, 23, № 3, с. 433.
- 2 Ерхимов Л. М., Метелев С. А., Митяков Н. А., Фролов В. Л. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 5, с. 490.
- 3 Ерхимов Л. М., Метелев С. А., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н., Рахлин А. В., Урядов В. П., Фролов В. Л. — В сб. Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
- 4 Грач С. М., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. — В сб. Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 46.
- 5 Ерхимов Л. М., Комраков Г. П., Фролов В. Л. — Геомагнетизм и аэрономия, 1980, № 6, с. 1112.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
8 мая 1984 г.

УДК 621.371.25

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ КВ-СИГНАЛОВ, РАССЕЯННЫХ ИСКУССТВЕННЫМИ ИОНОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

А. Ф. Беленов, Н. М. Богута, В. А. Зиничев, О. И. Максименко, Э. Е. Митякова,
Н. А. Митяков, В. П. Урядов

Явление ракурсного рассеяния радиоволни легло в основу измерений динамических спектров и доплеровского смещения частоты КВ-сигналов, рассеянных искусственной ионосферной турбулентностью. Эксперимент проводился в апреле, мае, декабре 1983 г. на трассе Киев—Горький—Харьков. Возмущение ионосферы осуществлялось с помощью вертикального излучения нагревных передатчиков, расположенных в Зименках и Васильсурске Горьковской области. Зондирование области возмущения проводилось в режиме несущей на фиксированных частотах 16,604, 18,197 и 19,850 МГц с помощью КВ-передатчика, установленного в г. Дымер Киевской области. Прием КВ-сигналов осуществлялся в районе п. Граково Харьковской области на горизонтальную ромбическую антенну, ориентированную на область возмущения. Принимаемые сигналы после преобразования их в радиоприемнике к частоте 120 Гц записывались на магнитофон. Спектральная обработка записей производилась с помощью низкочастотного анализатора спектра. Для использования высокого частотного разрешения анализатора частота сигнала понижалась до 2—10 Гц. Это позволяло получать частотное разрешение спектра исследуемого сигнала не хуже 0,2—0,1 Гц.

Во время экспериментов паряду с сигналом, рассеянным искусственными ионосферными неоднородностями (наблюдавшимися в период работы нагревного передатчика), принимался также сигнал ВНЗ. Как показали эксперименты, величина доплеровского смещения частоты и характер спектра рассеянного сигнала существенно изменялись с течением времени. Согласно результатам измерений в апреле, мае 1983 г., в послеполуденные и предвечерние часы спектры рассеянных сигналов имели, как правило, одно—двухмодовую структуру с общей шириной спектра порядка 1—2 Гц.