

УДК 551.510.535

К ВОПРОСУ ОБ АНОМАЛЬНОМ ОСЛАБЛЕНИИ РАДИОВОЛН В ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

В. Л. Фролов

Рассмотрены экспериментальные результаты измерений временных характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей, возбуждаемых в F -слое ионосферы мощным КВ радиоизлучением. Показано, что в первое время после начала воздействия наименьшей спектральной интенсивностью обладают неоднородности с размерами $l_{\perp} \approx 3$ м. Такой характер развития турбулентности объясняет ряд наблюдаемых особенностей в динамике аномального ослабления радиоволн, а также явление переноса модуляции амплитуды волны накачки на пробные волны, зондирующие возмущенную область ионосферы.

Эффект аномального ослабления (АО) радиоволн O -поляризации был обнаружен и исследован уже в первых экспериментах по воздействию на ионосферу мощным КВ радиоизлучением [1,2]. В последующих теоретических работах [3-5] он получил свое объяснение на основе механизма трансформации электромагнитных волн вблизи уровня отражения волны накачки (ВН) в плазменные волны на флуктуациях концентрации плазмы. В настоящей работе, используя результаты последних исследований характеристик генерации и релаксации мелкомасштабных ($l_{\perp} < 100$ м) искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), рассмотрена динамика их спектра и проанализированы особенности взаимодействия ВН с плазмой, объясняющие ряд наблюдаемых явлений на стадии развития эффекта АО. Все обсуждаемые ниже эксперименты относятся, главным образом, к измерениям на частотах $f_{\text{вн}} \approx 4,8-6,0$ МГц при мощностях излучения $\tilde{P}_0 \leq 20$ МВт, где накоплен наиболее обширный экспериментальный материал*.

1. Динамика мелкомасштабной части спектра ИИН. В работах по исследованию свойств ракурсного рассеяния радиоволн [6-8] было установлено, что в стационарном состоянии спектральная интенсивность флуктуаций плотности плазмы может быть аппроксимирована кусочно-степенным законом $\Phi_N(\kappa_{\perp} \approx 2\pi/l_{\perp}) \propto \kappa_{\perp}^{-p_0}$, где $p_0 \approx 1-2$ для $l_{\perp} \approx 7-20$ м, $p_0 \approx 2-3$ для $l_{\perp} \approx 3-7$ м и $p_0 \approx 3-5$ для $l_{\perp} \approx 1,6-3$ м. Однако в первый момент после включения ВН вследствие зависимости времени развития неоднородностей от l_{\perp} их спектр значительно отличается от своего стационарного вида.

Согласно [2, 6, 8-11, 23] можно выделить несколько этапов в развитии мелкомасштабных неоднородностей в возмущенной области (ВО) ионосферы: наблюдается некоторое время «ожидания» ($t_0 \approx 0,05-0,2$ с), когда используемыми методами диагностики развитие ИИН не обнаруживается (амплитуда рассеянного сигнала более чем на 30 дБ ниже своего стационарного уровня); довольно медленный рост интенсивности неоднородностей в течение $\tau'_1 \approx 1-7$ с до уровня ~ -20 дБ по отношению к стационарному, более ярко проявляющийся с увеличением l_{\perp} , после которого наступает быстрое («взрывное») развитие неоднородностей.

* $\tilde{P}_0 = P_0 G \Gamma$, где P_0 — мощность, подводимая к антенне нагревного стенда, G — ее коэффициент усиления, Γ — фактор, учитывающий поглощение радиоволн в нижней ионосфере.

родностей и их насыщение, характеризуемое временем τ_1 . Зависимость этих времен от l_{\perp} для неоднородностей с $l_{\perp} \approx 1,6-20$ м имеет следующий вид: $\tau_1 \propto l_{\perp}^{\alpha}$, $\alpha \approx 0,2-1$ с, $\langle \alpha \rangle \approx 0,4-0,5$ и $\tau_1' \propto l_{\perp}^{\beta}$, где $\beta \approx 1$, $\sqrt{l_0} \propto l_{\perp}$. При этом, как показывают вычисления с учетом экспериментальных данных, более высокий темп роста неоднородностей меньших масштабов соответствует тому, что показатель степени p спектра $\Phi_N(x_{\perp})$ в начальный период развития ИИН уменьшается по сравнению со стационарным значением более чем на две единицы. Последнее указывает на существование на этих временах максимума в спектре $\Phi_N(x_{\perp})$ в области масштабов $l_{\perp} \approx 3-5$ м*.

В период релаксации искусственных неоднородностей после выключения ВН, так как характерное время их расплывания τ_2 уменьшается с уменьшением размера l_{\perp} и особенно быстро в области $l_{\perp} \lesssim 7-10$ м ($\tau_2 \propto l_{\perp}^{\gamma}$, $\gamma \approx 0,5$ для $l_{\perp} \geq l_{\perp}^* \approx 7-10$ м и $\gamma \approx 2$ для $l_{\perp} < l_{\perp}^*$ [6, 9, 10]), спектр $\Phi_N(x_{\perp})$ быстро теряет свои самые мелкомасштабные компоненты, что приводит к его укрупнению и тем меньше, чем меньше l_{\perp} .

Рассмотренная динамика $\Phi_N(x_{\perp})$ при развитии и релаксации ИИН позволяет объяснить некоторые наблюдающиеся на эксперименте особенности взаимодействия ВН с плазмой F -слоя ионосферы.

2. Динамика аномального ослабления радиоволн в ВО ионосферы. Как было установлено в [10], время развития АО для ВН совпадает с временем роста неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3-5$ м, в то время как его релаксация определяется временем жизни неоднородностей с $l_{\perp} \approx 30$ м. Такое «несоответствие» характерных масштабов неоднородностей, отвечающих за АО радиоволн при включении и выключении мощного радиоизлучения, может быть объяснено следующим образом.

Поглощение радиоволн O -поляризации вблизи точки их отражения за счет трансформации в z -моду, согласно [13], записывается в виде $P_{\text{отр}} = P_{\text{пад}} e^{-2k_0}$, $k_0 = \int d^2x_{\perp} S_2'(x_{\perp}) \Phi_N(x_{\perp})$, где функция $S_2'(x_{\perp})$ определяется дисперсионными свойствами среды и при $x_{\perp} > \omega_{\text{вн}}/c$ довольно слабо зависит от x_{\perp} . Поэтому величина поглощения k_0 определяется в основном видом спектра $\Phi_N(x_{\perp})$ и при его степенной аппроксимации $\Phi_N(x_{\perp}) \propto x_{\perp}^{-p}$ может быть представлена как

$$k_0 \propto \begin{cases} \ln \frac{x_{\perp \text{max}}}{k_0}, & p=2 \\ \frac{1}{2-p} (x_{\perp \text{max}}^{2-p} - x_{\perp \text{min}}^{2-p}), & p \neq 2 \end{cases}$$

Легко видеть, что при $p < 2$ основной вклад в рассеяние дают наиболее мелкомасштабные неоднородности, а при $p > 2$ — наиболее крупномасштабные, для которых еще выполнены условия трансформаций радиоволн [3, 4]. Поэтому на начальном этапе развития ИИН, когда для $l_{\perp} \geq 3$ м показатель степени p заведомо меньше двух, время АО определяется скоростью роста неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3$ м. При достижении спектра искусственной турбулентности своего стационарного состояния, для которого в области $l_{\perp} < 10$ м $p_0 \geq 2$, релаксация АО после выключения ВН в условиях все большего укрупнения спектра ИИН

* Здесь уместно обратить внимание на тот факт, что при больших мощностях ВН $\tilde{P}_0 > 50$ МВт в первые несколько секунд после ее включения для $l_{\perp} \approx 1,7$ и 3 м в некоторых случаях наблюдается характерный максимум амплитуды рассеянного сигнала, превышающий на 3-10 дБ свой стационарный уровень, причем для более мелких неоднородностей ($l_{\perp} \approx 1,7$ м) максимум был выражен более резко, и ни когда не регистрировался для $l_{\perp} \approx 1,7$ м [12]. Это еще раз указывает на наличие особенности генерации неоднородностей в области масштабов $l_{\perp} < 3$ м. Преимущественное развитие неоднородностей с $l_{\perp} \approx 1$ м на начальном этапе взаимодействия мощного радиоизлучения с плазмой F -слоя ионосферы отмечалось в работах по теории резонансной неустойчивости (см., например, [5]).

должна определяться временем распада уже декаметровых неоднородностей*.

Неодновременное развитие искусственных неоднородностей различных масштабов проявляется и в характере изменения амплитуды отраженного сигнала ВН, когда резкое уменьшение ее уровня в начале воздействия сменяется заметно более плавным при переходе к стационарному. Здесь естественно связывать первую фазу развития АО с ростом ИИН с $l_{\perp} \simeq 3$ м, а вторую — с дополнительным поглощением радиоизлучения на более крупных неоднородностях. Так как, согласно [7-9], с уменьшением l_{\perp} уменьшается интервал высот Δh , занимаемый этими неоднородностями, то время развития АО должно увеличиваться с ростом величины отстройки пробной волны. Это надежно было зарегистрировано в экспериментах [1, 2, 10], из результатов которых можно найти, что $\Delta h (l_{\perp} \simeq 3-5 \text{ м}) \simeq 5-7$ км и хорошо соответствует данным [7, 9].

Изменением вида спектра $\Phi_N(\kappa_{\perp})$ в начале воздействия определяется также наблюдающаяся зависимость времени релаксации τ_p АО от длительности нагрева: при $\tilde{P}_0 = 10$ МВт $\tau_p \simeq 1$ с при длительности импульса ВН $T_{\text{и}} = 5$ с, $\tau_p \simeq 3$ с при $T_{\text{и}} = 10$ с и $\tau_p \simeq 10$ с при $T_{\text{и}} = 30$ с. Кроме того, при коротких импульсах ВН $T_{\text{и}} = 1-2$ с наблюдается увеличение времени τ_p от 1 с до 4 с с ростом мощности \tilde{P}_0 от 15 МВт до 60 МВт. Здесь с увеличением длительности или мощности нагрева спектр ИИН все более приближается к своему стационарному виду, а релаксация АО определяется все более крупными неоднородностями. Интересно отметить, что эксперименты с излучением коротких импульсов ВН показали задержку на 0,3—0,5 с начала развития АО по отношению к началу воздействия, которая обсуждалась нами ранее при анализе развития ИИН.

3. Интерпретация эффекта переноса модуляции. Существование максимума спектральной плотности $\Phi_N(\kappa_{\perp})$ в области масштабов $l_{\perp} \simeq 3$ м позволяет объяснить также некоторые особенности эффекта переноса амплитудной модуляции ВН на пробные волны (ПВ), которые были подробно исследованы в [2, 15, 16]. Приведем кратко его основные характеристики.

Перенос модуляции (ПМ) наблюдается только для ВН О-поляризации, мощность излучения которой в импульсе превышает 8 МВт, происходит вблизи уровня ее отражения, имеет характерное время развития 3—20 с и значительно уменьшается при появлении эффекта АО. Эффект ПМ максимален при $F_M^* \simeq 0,1-0,3$ Гц для частот ПВ О-поляризации, близких к частоте ВН, где глубина модуляции $M \simeq 60-80\%$, и резко уменьшается с ростом $\Delta f = |f_{\text{пв}} - f_{\text{вн}}|$ или F_M^{**} . Важно, что в случае зондирования ВО волнами Х-поляризации эффект ПМ также имеет место с $M \simeq 5-10\%$ для $f_{\text{пв}} \gtrsim f_{\text{вн}}$. Характерные времена падения и восстановления амплитуды ПВ составляют $\sim 0,2-1$ с. Отмечается запаздывание $\sim 0,2-0,5$ с момента начала уменьшения амплитуды ПВ и ее восстановления по отношению к времени включения и выключения ВН.

Эффект ПМ при мощности ВН $\tilde{P}_0 \simeq 10$ МВт в хорошо развитом виде наблюдается далеко не всегда и появляется, по-видимому, вначале в отдельных локальных ядрах ВО, характеристики возмущений в которых могут значительно отличаться друг от друга.

При интерпретации эффекта ПМ принципиальным моментом является его появление на ПВ Х-поляризации, что может свидетельство-

* Зависимость характера АО от вида стационарного спектра $\Phi_N(\kappa_{\perp})$ исследовалась в [14], где были получены аналогичные результаты.

** Заметим, что для F_M^* наблюдается подавление развития эффекта АО и генерации неоднородностей с $l_{\perp} \simeq 10-20$ м [2, 9].

вать в пользу механизма рассеяния радиоволн на искусственных ионосферных неоднородностях. При этом для волн O -поляризации при $f_{\text{пв}} \approx f_{\text{вн}}$ должно наблюдаться значительное усиление рассеяния ПВ за счет их преимущественной трансформации в z -моду [3, 17]. Масштаб рассеивающих неоднородностей можно оценить исходя из времен восстановления амплитуды ПВ: для $\tau_{\text{в}} \approx 0,2-1$ с с $l_{\perp} \approx 2-3$ м. Заметим, что время «ожидания» начала развития этих неоднородностей, отмеченное нами при рассмотрении динамики ИИН, совпадает с наблюдаемым временем задержки ($\Delta t \approx 0,2-0,5$ с) начала уменьшения амплитуды ПВ, а определенная по полосе эффекта ПМ высота слоя с рассеивающими неоднородностями соответствует толщине ВО для $l_{\perp} \approx 3$ м.

Оценку интенсивности неоднородностей лучше сделать, основываясь на результатах измерения глубины модуляции ПВ X -поляризации для $f_{\text{пв}} - f_{\text{вн}} \geq 1$ МГц, для которых точка отражения находится выше ВО и можно не учитывать особенности рассеяния при $\epsilon \rightarrow 0$. Следуя [18], вычислим удельное сечение рассеяния σ_0 из соотношения $P_1 = P_0 e^{-2\sigma_0 \Delta h}$, где P_0 — мощность волны в отсутствие рассеяния, P_1 — мощность нерассеянной компоненты, дважды прошедшей через слой с неоднородностью толщиной Δh . Для значений $M \approx 5\%$ и $\Delta h \approx 7$ км получаем $\sigma_0 \approx 7 \cdot 10^{-6}$ 1/м, откуда нетрудно найти значение флуктуаций плотности плазмы для неоднородностей с $l_{\perp} \approx 3$ м и $l_{\parallel} \approx 3 \cdot 10^3$ м: $\delta N = \sqrt{\langle (\Delta N/N)^2 \rangle} \approx 10^{-3}$. Полученная величина δN в два—три раза превышает результаты измерений, выполненных методом ракурсного рассеяния радиоволн [6]. Однако эти данные могут быть в значительной степени сближены, если учесть, что при измерении эффекта ПМ мы лоцируем центральную часть ВО, где уровень турбулентности выше по сравнению со своим средним значением. Кроме того, в силу локальности эффекта ПМ мы должны считаться с возможным влиянием фокусировок ВН и образованием областей с повышенными значениями δN .

Таким образом, временные и энергетические характеристики наблюдаемого эффекта переноса модуляции могут быть объяснены рассеянием ПВ на искусственных ионосферных неоднородностях с $l_{\perp} \approx 3$ м и $\delta N \approx 10^{-3}$. Существенно, что именно в этой части спектра ИИН наблюдается наиболее интенсивное их развитие в первое время после включения ВН, особенно проявляющееся при больших уровнях ее мощности. С развитием всего спектра ИИН декаметровые неоднородности все в большей степени становятся определяющими для эффекта АО и глубина модуляции значительно уменьшается. Однако при $F_M^+ \approx 0,1-0,3$ Гц, когда их генерация оказывается подавленной, эффект ПМ может наблюдаться в течение всего сеанса нагрева.

Рассмотренная в настоящей работе динамика спектра ИИН позволила объяснить наблюдаемые особенности развития эффекта АО радиоволн O -поляризации, а также дать интерпретацию эффекта переноса модуляции ВН на пробные волны. Здесь важно продолжить исследования зависимости характеристик генерации ИИН от частоты мощного радиоизлучения. В частности, первые измерения в этом направлении показали, что с понижением частоты ВН быстрый характер развития АО становится доминирующим даже при $\tilde{P}_0 \approx 3-5$ МВт [19] и, возможно, наблюдается увеличение доли более мелкомасштабных неоднородностей в спектре $\Phi_N(\kappa_{\perp})$ [10]. Необходимо также более детально изучить динамику спектра искусственных неоднородностей при экстремально высоких ($\tilde{P}_0 \geq 50$ МВт) мощностях ВН и в зависимости от уровня остаточной турбулентности после предыдущего цикла нагрева. Представляют также интерес последние теоретические исследования модификации регулярного профиля электронной концентрации вблизи области отражения мощного радиоизлучения, которая может привести к изменению в значительной степени характеристик взаимодействия волн в плазме [22].

Изменение спектра $\Phi_N(\omega_1)$, естественно, должно оказывать своё влияние на динамику искусственного радиоизлучения ионосферной плазмы [6, 19–21]. Однако анализ полученных здесь к настоящему времени экспериментальных данных выходит за рамки настоящей работы и будет проведен в следующих публикациях.

Автор выражает свою глубокую признательность Л. М. Ерухимову и А. Н. Караштину за полезные дискуссии по затронутым в работе вопросам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белкинович В. В. и др. // Радиофизика, 1975. Т. 18. № 4. С. 516 (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Фролов В. Л. Диссертация. Горький, 1979.
3. Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Радиофизика. 1975. Т. 18. № 9. С. 1273 (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Грач С. М. и др. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 46.
5. Васьков В. В., Гуревич А. В. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 81.
6. Ерухимов Л. М. и др. // Радиофизика. 1987. Т. 30. № 2. С. 208 (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9. № 11. P. 923; Minkoff J. // Radio Sci. 1974. V. 9. № 11. P. 997.
8. Коровин А. В. Диссертация. Казань, 1984.
9. Ерухимов Л. М. и др. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 7.
10. Белкинович В. В. и др. // Радиофизика. 1988. Т. 31. № 3. С. 251 (Изв. высш. учеб. заведений).
11. Зюзин В. А. и др. // Тезисы докл. Международного симпозиума «Модификация ионосферы мощным радиоизлучением». — М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 75.
12. Ерухимов Л. М. и др. // Радиофизика. 1982. Т. 25. № 7. С. 843. (Изв. высш. учеб. заведений).
13. Васьков В. В., Караштин А. Н. // Геомagnetизм и астрономия. 1980. Т. 20 № 4. С. 642.
14. Метелев С. А. // Радиофизика. 1980. Т. 23. № 6. С. 671 (Изв. высш. учеб. заведений).
15. Фролов В. Л. // Радиофизика. 1981. Т. 24. № 5. С. 529 (Изв. высш. учеб. заведений).
16. Зюзин В. А. // Радиофизика. 1987. Т. 30. № 6. С. 795 (Изв. высш. учеб. заведений).
17. Рыжов Ю. А. // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. С. 14; 1972. Т. 62. С. 924.
18. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. Н. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. — М.: Наука, 1978.
19. Ерухимов Л. М. и др. // Тезисы докл. Международного симпозиума «Модификация ионосферы мощным радиоизлучением». — М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 45.
20. Ерухимов Л. М., Фролов В. Л. Препринт НИРФИ № 185. Горький, 1984.
21. Ерухимов Л. М. и др. // Тезисы докл. Международного симпозиума «Модификация ионосферы мощным радиоизлучением». — М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 47.
22. Грач С. М., Митяков Н. А., Васьков В. В., Димант Я. С. // Тезисы докл. Международного симпозиума «Модификация ионосферы мощным радиоизлучением». — М.: ИЗМИРАН, 1986. С. 49; 87.
23. Беленков А. Ф. и др. Препринт НИРФИ № 233. Горький, 1987.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
19 января 1987 г.

TO THE PROBLEM OF ANOMALOUS ATTENUATION OF RADIO WAVES IN THE DISTURBED REGION OF THE IONOSPHERE

V. L. Frolov

Experimental results are considered of measurements of time characteristics small-scale artificial ionosphere irregularities excited by a powerful SW radiation in F-layer of the ionosphere. It is shown that irregularities with dimensions $l_{\perp} \approx 3\text{m}$ possess the largest spectral intensity at the time after the beginning of action. Such a character of the turbulence development explains a number of observed peculiarities in the dynamics of the anomalous attenuation of radio waves as well as the phenomenon of the modulation transfer of the pump wave amplitude to the probe waves which are sensing the disturbed region of the ionosphere.