

УДК 551.510.535

## ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ И НАСЫЩЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ПЕРЕДАТЧИКА

*И. В. Березин, Г. Н. Бойко, В. М. Волков, В. А. Зюзин,  
Г. П. Комраков, А. М. Леонов, А. Н. Маресов, В. А. Рыжков,  
В. А. Солынин*

Экспериментально исследованы особенности широкополосного аномального ослабления радиоволн, отражающихся в возмущенной области ионосферы, при высокой мощности волны накачки. Показано, что с ростом мощности излучения наступает насыщение аномального ослабления — его интенсивность и время развития стабилизируются. Это свидетельствует о насыщении величины и спектра искусственных неоднородностей мелкого масштаба, ответственных за эффект аномального ослабления. Описано ослабление этого эффекта в процессе развития искусственных неоднородностей крупного масштаба. Приведены результаты исследования начальной стадии самовоздействия мощной радиоволны в условиях циклической работы мощного передатчика.

Искусственная турбулентность верхней ионосферы активно изучается различными радиофизическими методами [1, 2]. В настоящей работе приводятся результаты ее исследования методом измерения аномального ослабления волны накачки и слабых пробных волн, отражающихся в возмущенной области ионосферной плазмы. Широкополосный эффект аномального ослабления (АО) связан, в основном, с резонансным поглощением обычных радиоволн на вытянутых вдоль магнитного поля мелкомасштабных неоднородностях теплового происхождения, которые эффективно генерируются в области отражения мощной радиоволны [3, 4] \*. Его величина в зависимости от интенсивности накачки и частоты пробных волн подробно изучалась ранее при относительно небольшой эффективной мощности возмущающего передатчика  $P_{\text{эфф}} \leq 20 \text{ МВт}$  [6, 7]. При этом согласно [7] коэффициент аномального ослабления по амплитуде увеличивается пропорционально  $P_{\text{эфф}}$ , а время развития АО  $\tau$  убывает как  $P_{\text{эфф}}^{-1}$ . Известно также, что при более высокой мощности нагрева характер зависимости эффекта от  $P_{\text{эфф}}$  изменяется [8]. Изучение особенностей поведения аномального ослабления при воздействии радиоволны высокой интенсивности  $P_{\text{эфф}} \geq 20 \text{ МВт}$  на среднеширотную ионосферу является одной из основных задач настоящей работы. Показано, что с ростом мощности возмущающего передатчика эффект аномального ослабления радиоволн стабилизируется.

В разд. 1 кратко излагаются условия проведения эксперимента и приводятся основные параметры аппаратуры. В разд. 2 дано последовательное описание структуры отраженного от ионосферы сигнала высокой мощности. Значительное внимание уделяется здесь начальной стадии самовоздействия радиоволны, представляющей большой самостоятельный интерес. Приводятся результаты исследования эффекта

\* Под резонансным поглощением понимается процесс трансформации энергии обычных радиоволн в необычную  $Z$ -моду в результате рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях плазмы, локализованных вблизи уровня отражения радиоволны в области плазменных резонансов [5].

насыщения аномального ослабления мощной радиоволны в квазистационарных и стационарных условиях до и после развития искусственных неоднородностей крупного масштаба. Показано, что влияние последних приводит к ослаблению АО. В разд. 3 описаны особенности поведения пробных волн при высокой мощности волны накачки. Показано, что время релаксации их амплитуды не зависит от мощности накачки. На основании полученных данных делается вывод о насыщении ионосферной турбулентности, создаваемой радиоизлучением высокой интенсивности. Определяется величина и спектр искусственных неоднородностей на стадии насыщения мелкомасштабной турбулентности.

**1. Описание эксперимента.** Эксперимент по воздействию КВ излучением обыкновенной поляризации на ионосферную плазму был выполнен на экспериментальном стенде «Сура» [9]. Эффективная мощность излучения передающего комплекса «Сура» составляет 150 — 280 МВт в диапазоне частот 4,5 — 9 МГц. Длительность фронта нарастания излучения в каждом цикле включения передатчика не превышала 15 — 20 мкс. Антenna система комплекса обеспечивает излучение волн как обыкновенной, так и необыкновенной поляризации. Приемная антenna позволяла осуществить раздельный прием обеих поляризаций. Общее ослабление волны одной поляризации относительно другой в системе «передача — прием» составляло 40 дБ. Приемные пункты были расположены южнее и юго-западнее нагревного стенда на расстояниях соответственно 9 и 5 км от него. Как показали измерения, амплитуда отраженного от ионосферы сигнала в обоих приемных пунктах превышала на 50 дБ амплитуду «земной волны». Это связано с особенностями рельефа местности, где были расположены приемные пункты. Для приема отраженной волны использовались стандартные приемники Р-250 М и приемники прямого усиления с полосой пропускания  $\Delta f_{\text{пр}} = 100 - 200$  кГц на частотах 4785, 5828 кГц. Динамический диапазон приемников прямого усиления составлял 30 дБ. Применение аттенюаторов на входе приемников позволило расширить их динамический диапазон до 50 дБ. Регистрация амплитуды отраженной волны осуществлялась двумя способами. Для записи сравнительно медленных изменений амплитуды применялся многоканальный самописец типа Н338-6П с постоянной времени около 5 мс, а быстрые изменения амплитуды ( $\sim 0,03$  мс) регистрировались на фотопленку с экрана осциллографа. Сравнение амплитуд в каналах регистрации выполнялось путем калибровки сигналов на участках записи, перекрывающихся во времени. Кроме измерений амплитуды волны накачки (ВН) производилось вертикальное зондирование возмущенной и невозмущенной ионосферы пробными волнами (ПВ). Передатчик пробных волн работал в импульсном режиме с длительностью импульсов от 0,15 до 1 мс и частотой повторения 25 или 50 Гц. Поляризация ВН и ПВ — обыкновенная. Разность частот  $\Delta f$  пробных волн и волны накачки не превышала по абсолютной величине 300 кГц ( $\Delta f = f - f_n$ , где  $f_n$  — частота ВН,  $f$  — частота ПВ).

Очевидно, наибольший интерес представляют характеристики отраженных радиоволн в зависимости от мощности излучения, которая транспортируется непосредственно в область отражения ВН. В связи с этим поведение ВН и ПВ исследовалось нами в зависимости от приведенной мощности излучения  $P_{\text{п}} = P_{\text{эфф}} \mu$ , где  $P_{\text{эфф}}$  — эффективная мощность излучения ВН,  $\mu$  — коэффициент ослабления потока энергии ВН на пути распространения ее от излучателя до точки отражения. Этот коэффициент определялся экспериментально:  $\mu = 2A_2/A_1$ , где  $A_1$  и  $A_2$  — амплитуды первого и второго отражений пробной радиоволны при  $\Delta f \approx 200 - 300$  кГц в условиях невозмущенной ионосферы. Все измерения проводились в вечернее время, когда линейное поглощение высокочастотных волн мало. Нелинейные эффекты, связанные с ростом частоты соударений и средней плотности электронов, в темное время

суток также незначительны. Поэтому отличием величины коэффициента  $\mu$  для мощной волны накачки и слабых пробных радиоволн при расстройках частот  $|\Delta f| \leq 300$  кГц можно пренебречь. Приведенные ниже экспериментальные данные получены за периоды март — апрель и октябрь 1982 — 1984 гг. Как показали измерения, коэффициент ослабления  $\mu$  изменялся в эти периоды в пределах  $\mu = 0,14 — 0,35$  и  $\mu = 0,4 — 0,5$  соответственно. Вследствие низких критических частот ионосферы частота мощной радиоволны выбиралась равной  $f_n = 4,785$  МГц и 5,828 МГц. При этом волна отражалась в F-слое ионосферы на высотах 220—230 км. Наблюдения проводились от 16 до 20 часов московского декретного времени. Использовались следующие режимы излучения ВН: [+10, —40], [+20, —100], [+60, —180], где цифры со знаком «+» и «—» обозначают длительность периода излучения ВН и «паузы» в секундах. Состояние ионосферы во время экспериментов было спокойным. Ее параметры (критические частоты, возмущенность) контролировались по ионограммам автоматической ионосферной станции «Базис».

**2. Структура отраженного сигнала мощной радиоволны.** Характерный вид записи амплитуды  $a(t)$  отраженной волны накачки, иллюстрирующей особенности изменения мощного сигнала во времени за один цикл работы возмущающего передатчика, приведен на рис. 1. В соответствии с [10—12] можно выделить три основных фазы этого изменения.

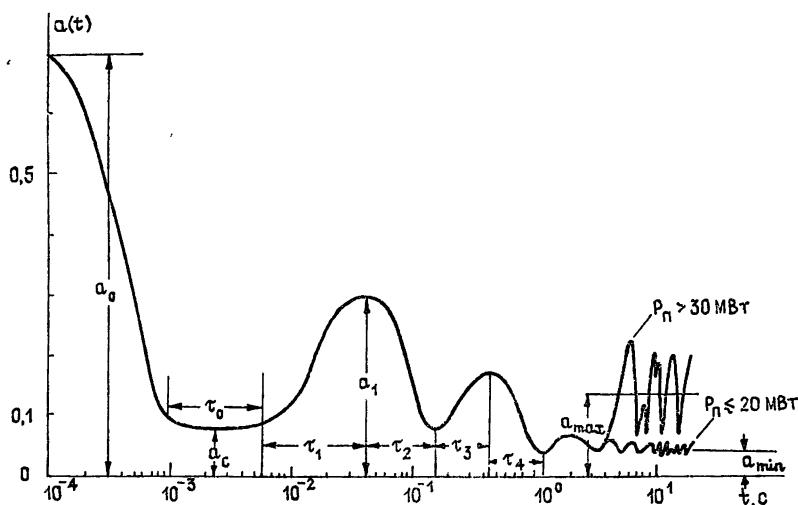


Рис. 1.

1) Первая, стрикционная фаза начинается сразу же после включения мощного передатчика [10, 11]. Она характеризуется резким уменьшением амплитуды отраженного сигнала, возникающим в результате стрикционного возбуждения плазменных волн в области отражения мощной радиоволны. Эта фаза развивается очень быстро: за время  $\sim 0,5 — 1$  мс амплитуда отраженной волны уменьшается от начального (невозмущенного) значения  $a_0$  до минимальной величины  $a_c \ll a_0$  (см. рис. 1). Зависимость времени развития этого процесса  $\tau_c$  и коэффициента поглощения  $K_c = \langle a_0/a_c \rangle$  от приведенной мощности  $P_n = \mu P_{\text{эфф}}$  представлена на рис. 2 (угловыми скобками  $\langle \rangle$  здесь и далее обозначена операция усреднения по различным циклам излучения волны

накачки)\*. Видно, что время  $\tau_c$  убывает при высоких мощностях  $P_n$  до очень малых значений  $\tau_c \leq 0,5$  мс. При мощности  $P_n \geq 20 - 30$  МВт время развития  $\tau_c$  и коэффициент ослабления  $K_c$  стабилизируются.

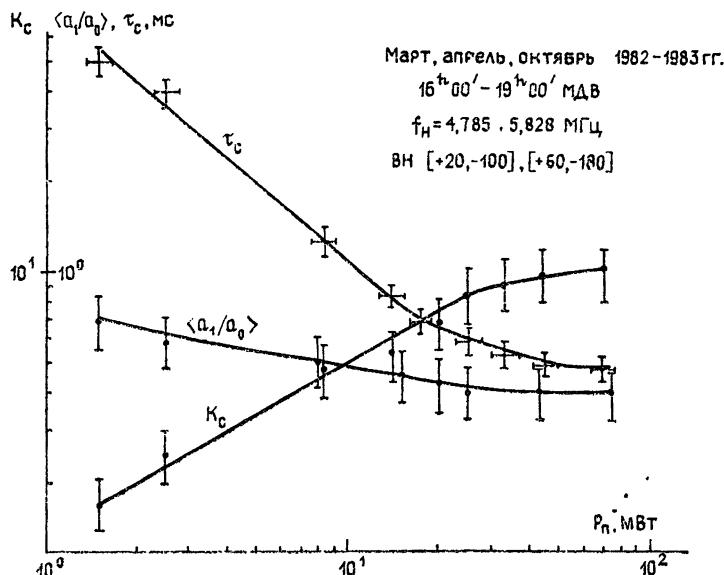


Рис. 2.

Однако величина и скорость развития стрикционного эффекта в наших экспериментах в отличие от результатов [10] была значительно больше даже при невысоких значениях  $P_n$ . В частности, согласно [10] процесс развития этого эффекта имеет две стадии, которые условно можно назвать линейной и нелинейной. На осциллограмме амплитуда отраженного от ионосферы радиоимпульса почти не изменяется в течение времени  $\tau'_c$  (линейная стадия), и затем начинается заметное уменьшение амплитуды за характерное время  $\tau''_c$  (нелинейная стадия). Время развития  $\tau'_c$  уменьшается от 4,5 до 1,2 мс с ростом эффективной мощности излучения  $P_{\text{эфф}}$  от 3 до 50 МВт, а величина  $\tau''_c$  изменяется при этом от 1,3 до 0,7 мс. При мощности излучения  $P_{\text{эфф}} \approx 50$  МВт коэффициент поглощения ВН  $K_c \approx 2 - 2,5$ . В наших экспериментах величина  $\tau'_c$  очень мала, а время развития  $\tau_c$  следует идентифицировать с  $\tau''_c$ . Статистическая обработка данных показывает, что в наших измерениях время  $\tau'_c$  не превышает 0,2 — 0,4 мс при мощности  $P_n \leq 5$  МВт и равно 0,1 — 0,2 мс при мощности  $P_n \geq 10$  МВт. Кроме того, в отличие от [10] приведенная пороговая мощность излучения ВН в нашем случае не превышала 1 — 1,5 МВт. Причина расхождения связана, по-видимому, с явлением перегрева, возникающим при циклическом воздействии мощной радиоволны на ионосферу — за время паузы, использовавшейся в наших экспериментах (40, 100, 180 с), искусственные неоднородности крупного масштаба не успевали релаксировать к своему невозмущенному состоянию. Это и должно приводить к усилению эффектов самовоздействия за счет фокусировки мощной радиоволны\*\*.

2) Вторая фаза всегда следует за стрикционной и начинается через 10 — 20 мс после включения мощного передатчика. Она характеризу-

\* Характерные времена развития и релаксации исследуемого процесса соответствуют изменению амплитуды в  $e$  раз.

\*\* Для согласования с [10] был проведен контрольный эксперимент, в котором возмущающий передатчик работал в аналогичном [10] режиме [+20 мс, — 180 мс]. Полученные при этом результаты в области  $P_{\text{эфф}} < 50$  МВт достаточно близки к результатам [10].

ется быстрыми колебаниями амплитуды отраженного сигнала с уменьшающейся во времени амплитудой и частотой (такие колебания называются в [2] «пичками»)\*. Их частота  $F(t)$  как функция времени  $t$  в одном цикле излучения мощной радиоволны показана на рис. 3. Текущие частоты  $F_i = \langle 1/2t_i \rangle$  на этом рисунке отнесены к серединам промежутков времени, для которых находился соответствующий полупериод колебаний  $t_i$  (см. рис. 1). Зависимость максимальной частоты  $F_1 = \langle 1/2t_1 \rangle$  в первом «пичке» от мощности  $P_{\Pi}$  приведена на рис. 4, а его относительная амплитуда  $\langle a_1/a_0 \rangle$  — на рис. 2. Точки на рис. 4 обозначены усредненные значения текущих частот, полученных по различным сеансам измерений и в различные дни. Видно, что максимальная частота колебаний увеличивается от 5 Гц при  $P_{\Pi} \approx 2,5$  МВт до 10 Гц при  $P_{\Pi} \approx 70$  МВт. При этом амплитуда первого «пичка» уменьшается от  $0,7a_0$  до  $0,4a_0$ . Промежуток времени  $t_0$ , разделяющий первую и вторую фазы (см. рис. 1), флуктуирует от цикла к циклу с дисперсией  $(0,4t_0)^2$  и уменьшается с ростом приведенной мощности от (20—25) мс при  $P_{\Pi} \approx 2$  МВт до (4—6) мс при  $P_{\Pi} \approx 70$  МВт. Полная длительность второй фазы убывает от 1—1,5 с при  $P_{\Pi} \approx 2$ —3 МВт до 0,5—0,7 с в случае высокой мощности  $P_{\Pi} \approx 70$  МВт. (При этом существенное уменьшение амплитуды осцилляций происходит уже за время  $\sim 0,3$  с.)

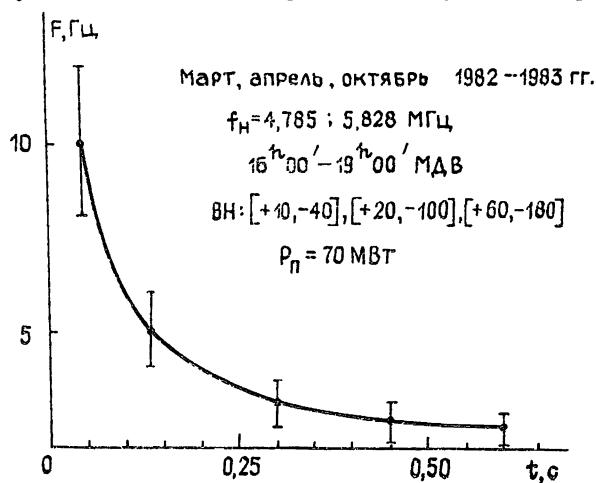


Рис. 3.

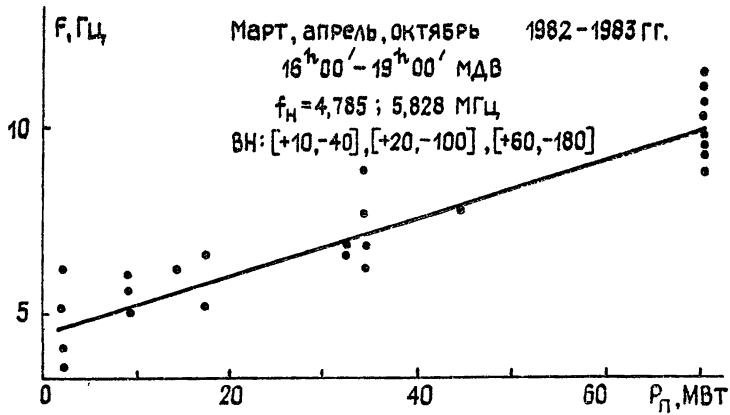


Рис. 4.

В некоторых сеансах наблюдалось очень сильное затухание быстрых осцилляций за время 0,1—0,3 с. Механизм образования быстрых

\* При мощности  $P_{\Pi} \geq 2,5$  МВт «пички» и стрикционные эффекты четко идентифицируются и регистрируются в каждом цикле излучения волны накачки.

осцилляций мощной радиоволны на начальной стадии самовоздействия в настоящее время не установлен. Можно, однако, предположить, что это — релаксационные колебания, возникающие в переходный период подавления стрикционной неустойчивости плазменных волн в процессе развития тепловых неоднородностей плазмы.

3) Третья фаза начинается после очищения отраженного сигнала от быстрых осцилляций (через 0,3—1 с после включения мощного передатчика). Средняя амплитуда отраженной волны на этой стадии продолжает плавно уменьшаться, флюктуируя с периодом 0,5—1 с, и через несколько секунд достигает своего минимального квазистационарного значения  $a_{\min} \sim P_n^{-1/2}$ . Зависимости коэффициента аномального ослабления  $K_0 = \langle a_0/a_{\min} \rangle$  и характерного времени развития этого эффекта  $\tau$  от приведенной мощности  $P_n$  представлены на рис. 5. Для сравнения на рис. 5 приведен также коэффициент  $K_1 = \langle a_1/a_{\min} \rangle = K_0 \langle a_1/a_0 \rangle$ , определенный относительно уровня первого «пичка»\*.

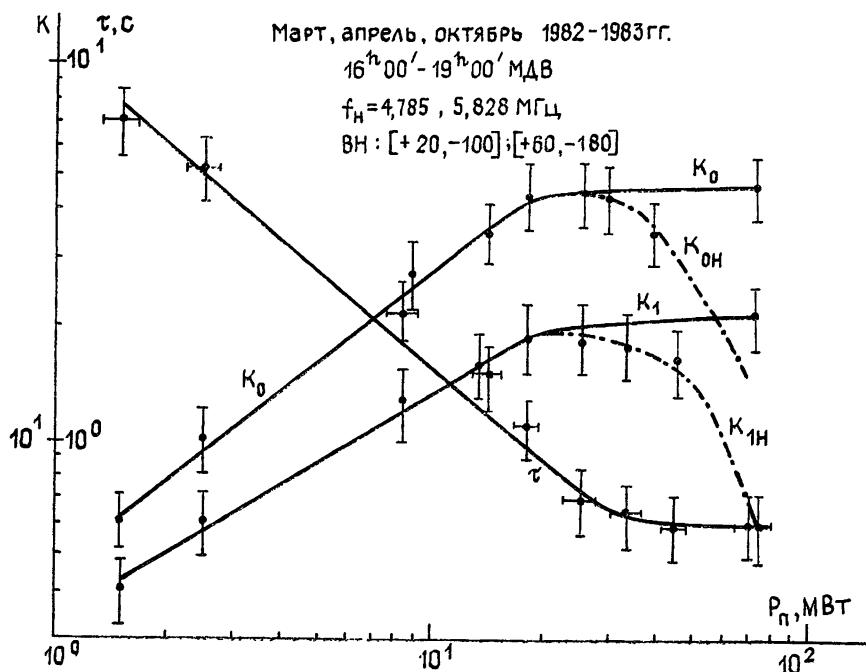


Рис. 5.

Согласно рис. 5 при небольших значениях мощности  $P_n$  коэффициент ослабления  $K_0(P_n)$  возрастает пропорционально  $P_n$  в соответствии с результатами [7]. При этом, как видно из рис. 5, степенной рост коэффициента ослабления продолжается вплоть до очень большой величины  $K_0^2 \simeq 10^3$ , достигаемой при  $P_n = P_k \simeq 20 - 25 \text{ МВт}$ . Однако дальнейшее увеличение мощности практически не меняет величины  $K_0$ . Аналогичным образом ведет себя и время развития эффекта  $\tau(P_n)$ : оно энергично (как  $P_n^{-1}$ ) убывает от 6—8 с до 0,6—0,7 с при  $P_n \ll P_k$  и медленно уменьшается до 0,5—0,6 с с увеличением мощности до  $P_n = 70 \text{ МВт}$ \*. Это означает, что в области  $P > P_k = 20 - 25 \text{ МВт}$  происходит насыщение, стабилизация аномального поглощения. Этот эффект тесно связан с насыщением возмущений плотности в мелко-масштабных неоднородностях, вызывающих резонансное поглощение

\* Такое определение коэффициента аномального ослабления целесообразно использовать в тех случаях, когда регистрация начального значения амплитуды  $a_0$  не производится. Допускаемая ошибка при этом не превосходит отношения  $a_1/a_0 \simeq 0,4 - 0,7$  (см. рис. 2).

радиоволн: согласно [3] логарифм отношения  $a_0/a_{\min}$  возрастает пропорционально среднеквадратичному возмущению плотности  $(\Delta N)^2$  в мелкомасштабных неоднородностях:  $\lg(a_0/a_{\min}) \approx 4 \cdot 10^3 (\Delta N)^2/N^2$ . Приводя оценку максимального возмущения электронной концентрации на стадии насыщения, получаем величину  $\Delta N/N \approx 10^{-2}$ , которая находится в полном соответствии с результатами [1, 2] и с теоретическими представлениями [3].

Важная особенность в поведении аномального ослабления возникает в области больших мощностей  $P_{\Pi} > 20 - 30$  МВт. Через 5—10 с после включения мощного передатчика средняя амплитуда отраженной волны вновь начинает увеличиваться и через 5—10 с достигает стационарного значения  $a_{\max} \sim P_{\Pi}^{1/3}$  (см. рис. 1). Усредненные значения соответствующих коэффициентов  $K_{\text{он}}(P_{\Pi}) = \langle a_0/a_{\max} \rangle$ ,  $K_{\text{ин}}(P_{\Pi}) = \langle a_1/a_{\max} \rangle$  показаны на рис. 5 штрихпунктиром. Видно, что они убывают с ростом  $P_{\Pi}$ , т. е. относительное значение амплитуды  $a_{\max}/a_0$  ( $a_{\max}/a_1$ ) увеличивается. Одновременно с амплитудой в спектре отраженного сигнала нарастают флуктуации с периодом  $T = (2 - 5)$  с. В  $F$ -слое ионосферы при скорости дрейфа  $V_{\text{др}} = (50 - 200)$  м/с такие периоды соответствуют крупномасштабным неоднородностям с поперечными размерами 200—2000 м. Поэтому можно ожидать, что наблюдаемое ослабление АО связано с развитием искусственных неоднородностей крупного масштаба, которые всегда образуются в области отражения мощной радиоволны [1, 2] (они порождаются тепловой самофокусирующей неустойчивостью волны накачки [3]). Действительно, такие неоднородности приводят к увеличению плавного градиента плазмы в области резонансов, что, в свою очередь, может привести к ослаблению резонансного поглощения радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях плазмы (см. [13]). Подчеркнем, что регистрация отраженной волны в процессе развития крупномасштабных неоднородностей позволяет нам определять абсолютную величину аномального ослабления в условиях крупномасштабного расслоения плазмы. В случае значительных естественных неоднородностей регистрируется лишь относительное увеличение АО за счет нагрева плазмы мощным радиопримесением [8].

**3. Аномальное ослабление пробных волн.** Поведение амплитуды пробных волн при не слишком малых расстройках  $|\Delta f| > 30$  кГц полностью соответствует третьей фазе самовоздействия мощной радиоволны накачки\*\*. Коэффициенты аномального ослабления ПВ до и после развития крупномасштабных неоднородностей определяются прежними выражениями  $K(\Delta f) = \langle a_0/a_{\min} \rangle$ ,  $K_{\text{н}}(\Delta f) = \langle a_0/a_{\max} \rangle$ , где  $a_0$  — средняя амплитуда ПВ во время паузы. Как и в экспериментах [1, 6], зависимость этих коэффициентов от расстройки  $\Delta f$  имеет вид резонансной кривой с полушириной порядка 300 кГц. Характерные особенности аномального ослабления пробных волн иллюстрируются на рис. 6, на котором представлены результаты обработки отдельных циклов наблюдений: за ноябрь 1983 г. — сплошными линиями, за март — апрель 1983 г. — пунктиром, апрель 1984 г. — штрихпунктиром (рис. 6а). Кроме параметров пробных волн на рис. 6 приведены также параметры  $K_1(P_{\Pi})$  и  $\tau(P_{\Pi})$  для мощной радиоволны накачки. Штрихпунктиром на рис. 6б, как и на рис. 5, показан ход коэффициентов  $K_{\text{ин}}$ ,  $K_{\text{н}}(\Delta f)$ , характеризующих ослабление в условиях крупномасштабного расслоения ионосферной плазмы. Видно, что аномальное ослабление пробных волн также испытывает насыщение, хотя при больших расстройках  $\Delta f = 200 - 300$  кГц необходимая для этого мощность оказывается несколько больше, чем для волны накачки.

\* Время развития поглощения уменьшается с увеличением высоты отражения волны и с приближением к максимуму  $F$ -слоя. При малых мощностях излучения почью оно приблизительно в 1,5—2 раза меньше, чем вечером.

\*\* Быстрые колебания второй фазы наблюдались на записях амплитуды пробных волн при расстройках частоты  $|\Delta f| < 20 - 25$  кГц [12]. Изменения амплитуды, соответствующие первой стрикционной фазе, у пробных волн не зарегистрированы.

Ослабление поглощения ПВ при высоких мощностях излучения  $P_{\Pi}$  (см. кривые  $K_h$ ) по-прежнему сопровождается значительным усилением крупномасштабных неоднородностей и, по-видимому, связано с их влиянием. Время развития эффекта АО  $\tau(\Delta f)$  возрастает с увеличением расстройки  $|\Delta f|$ . Время релаксации амплитуды пробных волн  $\tau_p$  в пределах точности эксперимента не зависит от излучаемой мощности  $P_{\Pi}$  и от расстройки  $\Delta f$  и равняется 20—30 с.

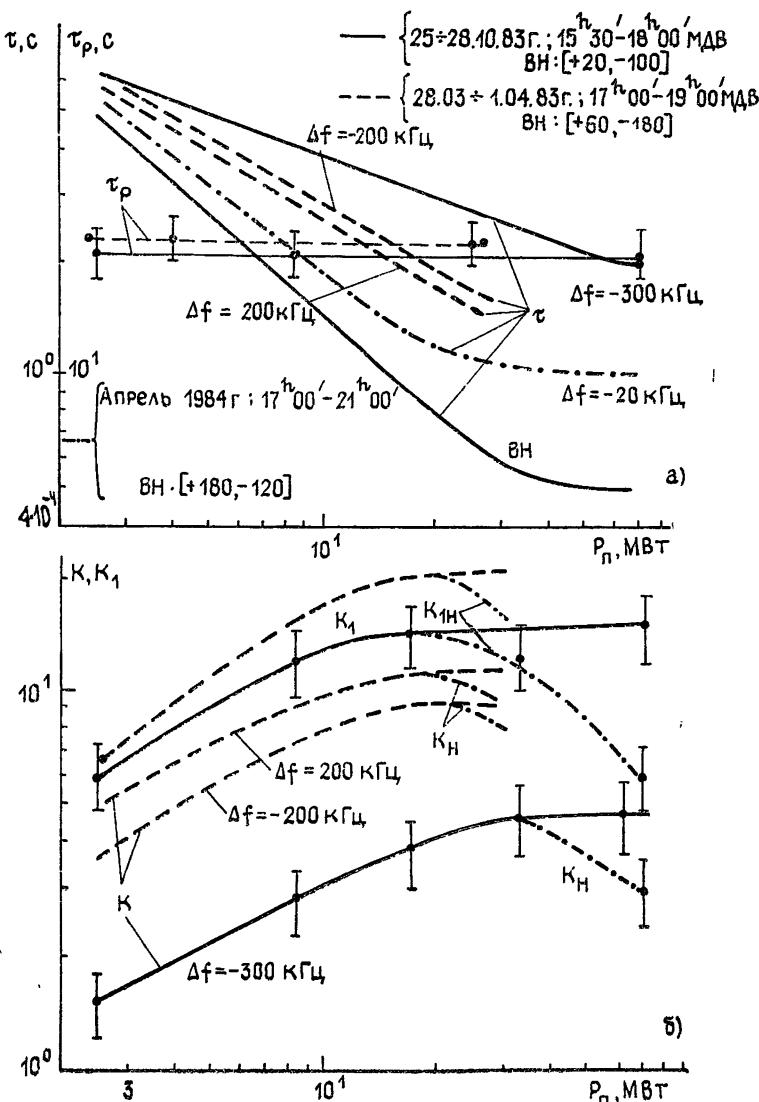


Рис. 6.

Наблюдаемые закономерности полностью соответствуют результатам разд. 2 о насыщении поглощения мощной радиоволны. Они хорошо укладываются в общую схему развития аномального ослабления пробных волн в процессе формирования возмущенной области плазмы. Более того, прямые измерения времени релаксации позволяют получить дополнительную информацию о спектре искусственной мелкомасштабной турбулентности. Действительно, поперечный размер  $l_{\perp}$  вытянутых мелкомасштабных неоднородностей, ответственных за резонансное поглощение радиоволн, должен удовлетворять условию  $l_{\perp} \leq c/\tau_h \approx 50 \div 60 \text{ м}$  [14]. С другой стороны, определяя время релаксации неоднородностей по скорости наиболее медленного процесса попереч-

ной диффузии, нетрудно получить ограничение «снизу» на их эффективный поперечный размер  $l_{\perp} \geq 2\pi/\bar{T}_e v_e \tau_p/m\omega_e^2 \approx 10 - 15$  м. Здесь  $T_e$ ,  $v_e$ ,  $\omega_e$  — температура, частота соударений и гирочастота электронов. Слабая зависимость времени релаксации  $\tau_p$  от мощности свидетельствует об универсальном характере этой оценки. Таким образом, проведенные эксперименты позволяют сделать вывод о существовании эффекта стабилизации искусственной ионосферной турбулентности по уровню  $\Delta N/N \approx 10^{-2}$  в случае достаточно высокой мощности излучения волны накачки  $P_{\text{п}} = \mu P_{\text{эфф}} > 20 - 30$  МВт.

Авторы призывают благодарность В. В. Васькову за большую помощь в работе и выражают благодарность А. В. Гуревичу за обсуждение результатов и полезные советы, а также С. А. Метелеву и В. А. Фролову за участие в проведении контрольного эксперимента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атлот В. Ф. — ТИИЭР, 1975, 63, с. 35.
2. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митякова Э. Е., Мясников Е. Н., Раухлинов А. В., Урядов В. П., Фролов В. А. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 7.
3. Васьков В. В., Гуревич А. В. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с. 81.
4. Грач С. М., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. В кн.: Тепловые нелинейные явления в плазме — Горький ИПФ АН СССР, 1979, с. 46.
5. Рыжов Ю. А. — ЖЭТФ, 1972, 62, с. 924.
6. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Ерухимов Л. М., Зуйков Н. А., Коробков Ю. С., Митяков Н. А., Комраков Г. П., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю., Фролов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 4, с. 516.
7. Беликович В. В., Бенедиктов Е. А., Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митяков Н. А., Фролов В. А., Шавин П. Б. Тезисы докладов XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — Томск, 1978, 1, с. 102.
8. Stubbe P., Корка Н., Jones T. B., Robinson T. J. — J. Geophys. Res., 1982, A87, № 3, р. 155.
9. Белый 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 докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — М.: Наука, 1981, ч. 1, с. 103.
10. Ерухимов Л. М., Метелев С. А., Митяков Н. А., Фролов В. А. — Геомагнетизм и аэрономия, 1983, 23, № 3, с. 433.
11. Fejér J. A., Корка Н. — J. Geophys. Res., 1981, A86, № 7, р. 5746.
12. Бойко Г. Н., Зюзин В. А., Комраков Г. П., Леонов А. М., Рыжов В. А., Солынин В. А., Токарев Ю. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1985, 28, № 5, с. 656.
13. Васьков В. В. Взаимодействие декаметровых волн с ионосферой. — М.: ИЗМИРАН, 1985, с. 5.
14. Васьков В. В., Карапшин Н. А. — Геомагнетизм и аэрономия, 1980, 20, № 4, с. 642.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
4 сентября 1985 г.

## PECULIARITIES OF DEVELOPMENT AND SATURATION OF ARTIFICIAL IONOSPHERIC TURBULENCE AT HIGH POWER OF A DISTURBING TRANSMITTER

I. V. Berezin, G. N. Bojko, V. M. Volkov, V. A. Zyuzin, G. P. Komrakov,  
A. M. Leonov, A. N. Maresov, V. A. Ryzhov, V. A. Solyntin

Peculiarities of wide-band anomalous attenuation of radio waves being reflected in the disturbed region of the ionosphere with a high power of the pump wave are experimentally investigated. It is shown that with the increase of the radiation power the saturation of the anomalous attenuation occurs — its intensity and the time of development are stabilized. It testifies to the saturation of the value and the spectrum of artificial irregularities of small-scale responsible for the effect of anomalous attenuation. Attenuation of this effect is described in the process of large-scale artificial irregularities development. The investigation results are presented of the initial stage of self-action of a powerful radio wave under the condition of cycle operation of the powerful transmitter.