

УДК 551.510.535

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННОЙ ОБЛАСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ ВЕРХНЕЙ И НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Е. А. Бенедиктов, Н. П. Гончаров, Ю. А. Игнатьев,  
С. Н. Матюгин, П. Б. Шавин*

Приводятся экспериментальные результаты исследования параметров искусственной области возмущения (ОВ) ионосферы, возникающей при воздействии на ионосферу мощным КВ радиоизлучением ( $P_0 \approx 20 \text{ МВт}$ ) с частотой  $5,75 \text{ МГц}$ . Показано, что при этом в  $F$ -слое ионосферы образуется ОВ с  $\Delta N_e/N_e \geq 5 \cdot 10^{-2}$  и генерируются или усиливаются неоднородности  $N_e$ . Такая ОВ действует на проходящие через нее пробные радиоволны подобно фокусирующей линзе. В  $E$ -слое ионосферы происходит увеличение  $N_e$  на  $5 \cdot 10^{-2}$  за время около  $30 \text{ с}$ .

При взаимодействии мощных декаметровых радиоволн с ионосферной плазмой происходят регулярные изменения электронной концентрации  $N_e$  вследствие нагрева электронов полем этих радиоволн. На высотах  $E$ -слоя ионосферы это приводит к увеличению  $N_e$  из-за изменения баланса ионизации [1, 2], а на высотах  $F$ -слоя — к уменьшению  $N_e$  из-за диффузионного выталкивания плазмы из нагретой области [1, 3]. Кроме этого, в верхней ионосфере плазма легко становится неустойчивой и возмущения концентрации там приобретают нерегулярный характер, т. е. происходит генерация неоднородностей электронной концентрации различных масштабов [4].

К настоящему времени в ряде экспериментов обнаружены фокусирующие свойства крупномасштабного искусственного возмущения в  $F$ -слое при наклонном зондировании ионосферы радиоволнами КВ диапазона [5, 6], а также изучены явления рассеяния на магнитоориентированных неоднородностях  $N_e$  различных масштабов (см., например, [7]).

В данной работе изложены результаты исследования параметров искусственной области возмущения (ОВ) в  $F$ - и  $E$ -слоях ионосферы методом вертикального зондирования при ее возмущении обыкновенной и необыкновенной волнами мощного электромагнитного излучения декаметрового диапазона.

**1. Исследование параметров ОВ верхней ионосферы.** Эксперименты по исследованию параметров ОВ  $F$ -слоя ионосферы проводились в мае 1982 г. в период с 14 до 21 ч. Возмущение ионосферной плазмы осуществлялось полем радиоволн, излучаемых передатчиком (ВП) с эквивалентной мощностью  $P_0 = P \times G = 20 \text{ МВт}$  в режиме несущей на частоте  $f_b = 5,75 \text{ МГц}$ . Длительность работы ВП составляла 7, а паузы — 8 минут. В отдельные дни излучалась как обыкновенная, так и необыкновенная компоненты. Передатчик пробных волн (ППВ) находился рядом с ВП и работал в импульсном режиме с  $\tau_{\text{и}} = 100 \text{ мкс}$  и  $f_{\text{повт}} = 100 \text{ Гц}$  в диапазоне 6—7 МГц. Пробные радиоволны регистри-

ровались одновременно в двух пунктах, один из них (П1) находился вблизи передатчиков, второй (П2) отнесен на 25 км в северо-западном направлении от первого. При обработке экспериментальных данных проводилось усреднение амплитуд отраженных от  $F$ -слоя ионосферы сигналов за каждую минуту, а затем сглаживание по трем точкам. Все реализации пауза — нагрев — пауза нормировались на амплитуду  $\bar{A}_0$  в последнюю минуту паузы перед включением ВП. Кроме того, для уменьшения амплитудных вариаций, не коррелированных с периодом работы ВП, применялся метод усреднения по нескольким реализациям [5].

Анализ полученных данных выявил в значительном числе сеансов в обоих пунктах характерное изменение амплитуд пробных радиоволн, коррелирующих с работой ВП. На рис. 1 приведен пример усредненного по трем ( $n=3$ ) последовательным сеансам нагрева хода нормированных амплитуд  $\bar{A}/\bar{A}_0$  сигналов на частоте  $f_{\Pi} = 6,05$  МГц в пункте П1 за 12.05.1982 г. Возмущение  $F$ -слоя ионосферы осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной поляризации в период с 19 ч 00 мин по 19 ч 45 мин. Циклы нагрева отмечены на рис. 1 штриховкой. Видно, что в первые минуты после включения ВП амплитуда пробных сигналов уменьшилась. Затем наблюдалось ее увеличение; далее, достигнув максимального значения через 3 минуты после выключения ВП, амплитуда в течение 4 минут плавно восстанавливалась до первоначального уровня.

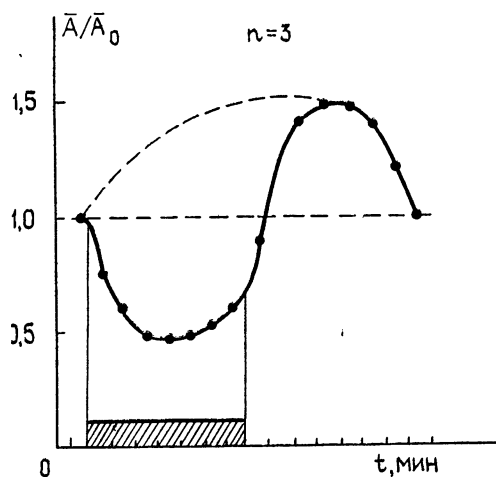


Рис. 1.

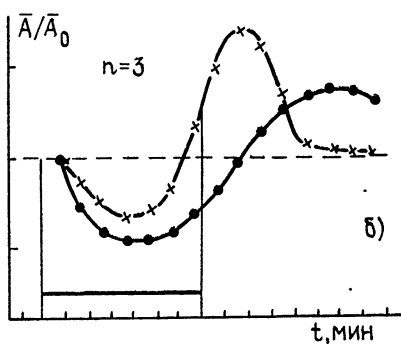
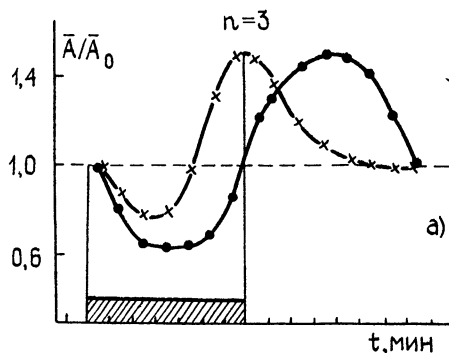


Рис. 2

Характерное изменение  $\bar{A}/\bar{A}_0$  во времени на рис. 1 обусловлено, по-видимому, влиянием на распространение радиоволн неоднородностей различных масштабов, образующихся в ОВ. Пунктирными линиями приведено качественно ожидаемое увеличение амплитуд пробных волн вследствие влияния фокусирующих свойств крупномасштабной ОВ. Эксперименты [8] по исследованию фокусирующих свойств ОВ на односкачковой трассе при  $f_{\Pi} = 17$  МГц ( $f_{\Pi} \gg f_{\text{в}}$ ) показали именно монотонное увеличение амплитуды пробных сигналов с характерным временем около 5 мин.

Факторами, приводящими к ослаблению амплитуд пробных волн в первые минуты после включения ВП, могут быть рассеяние радиоволн на искусственных мелкомасштабных [9] и среднемасштабных [4] неоднородностях  $N_e$  в ОВ, поглощение и дефокусировка радиоволн в искусственно возмущенном  $E$ -слое ионосферы. Так, довольно резкое ослабление амплитуды в первую минуту на рис. 1, вероятно, связано с известным эффектом рассеяния пробных радиоволн на искусственных мелкомасштабных неоднородностях (поперечные по отношению к геомагнитному полю размеры  $l_{\perp} \leq 20 \div 50$  м) [9]. Кроме того, нельзя исключить возможного влияния дополнительного поглощения и дефокусировки пробных радиоволн возмущенной  $E$ -областью ионосферы. В этом случае характерное время ослабления амплитуд определяется увеличением  $\nu$  (за время  $\approx 20$  мс) и ростом  $N_e$  в  $E$ -слое за 20—50 с из-за изменения при нагреве плазмы коэффициента диссоциативной рекомбинации  $\alpha$  атмосферных ионов  $\text{NO}^+$  и  $\text{O}_2^+$  [2]. Необходимо отметить, однако, что если бы этот эффект был определяющим, то аналогичное изменение  $\bar{A}/\bar{A}_0$  должно было бы проявляться и при работе ВП на необыкновенной волне (см. ниже).

Следовательно, можно полагать, что основным фактором, маскирующим на первых минутах работы ВП проявление фокусирующих свойств ОВ, может быть рассеяние на среднемасштабных неоднородностях  $N_e$  в  $F$ -слое ионосферы. На это указывает и увеличение частоты флуктуаций амплитуды пробного сигнала в первые минуты нагрева ионосферы полем мощных радиоволн. Далее, по мере развития ОВ увеличение амплитуды пробных волн можно объяснить проявлением фокусирующих свойств искусственной крупномасштабной ОВ. Причем максимальной величины этот эффект достигает через 2—3 минуты после выключения ВП, когда релаксируют среднемасштабные неоднородности.

Несомненный интерес представляет сопоставление эффектов, возникающих при воздействии на ионосферу мощными радиоволнами обыкновенной и необыкновенной поляризации. На рис. 2 приведены первые экспериментальные данные, полученные 12.05.1982 г. при одновременных наблюдениях в П1 (рис. 2а) и П2 (рис. 2б). Каждая кривая получена усреднением по трем ( $n = 3$ ) последовательным сеансам нагрева  $F$ -слоя обыкновенной (кружки) волной в период с 19 ч 00 мин по 19 ч 45 мин и необыкновенной (крестики) с 18 ч 16 мин по 19 ч 00 мин. Длительность сеансов работы ВП составляла 7 мин, паузы — 8 мин. Эффект резкого уменьшения амплитуды сигнала в первые 20—40 с, наблюдавшийся только при работе ВП на обыкновенной волне, исключался. Из рис. 2 видно, что в обоих пунктах максимумы амплитуд пробных сигналов наблюдались по времени раньше при работе ВП на необыкновенной волне. В П2 наблюдалось некоторое запаздывание обоих максимумом относительно П1. Это запаздывание было примерно одинаково при работе ВП как на обыкновенной, так и на необыкновенной волнах и составляло около 2 мин.

Подобие кривых подтверждает имеющиеся представления о крупномасштабной области возмущения (линзе). Согласно оценкам, фокусное расстояние линзы в эксперименте превышало расстояние от линзы до поверхности Земли ( $\sim 250$  км). В этом случае увеличение амплитуд пробных сигналов должно наблюдаться в некоторой области на поверхности Земли, диаметр которой, по оценкам, составлял около 70 км. Именно такой эффект и наблюдался в пунктах П1 и П2, разнесенных на 25 км. Разные запаздывания максимумов в П1 и П2 могут быть связаны с неоднородностью области нагрева по горизонтали и, возможно, с ветровым сносом более интенсивных неоднородностей из центра области возмущения.

Максимальная величина амплитуды пробного сигнала после выключения ВП примерно в 1,5 раза превышала ее невозмущенное значение. Следует отметить, что при работе ВП на необыкновенной волне не наблюдалось резкого уменьшения амплитуды пробного сигнала в течение первой минуты, а плавное уменьшение амплитуды в первые три минуты работы ВП на необыкновенной волне было несколько меньше, чем при его работе на обыкновенной. Это подтверждает теоретические выводы о том, что при возмущении ионосферы мощным радионизлучением на необыкновенной волне не происходит генерации мелкомасштабных неоднородностей  $N_e$  [4] и самофокусировочная неустойчивость (ответственная за генерацию среднемасштабных неоднородностей  $N_e$ ) интенсивнее развивается при обыкновенной поляризации мощной радиоволны [10]. Времена образования и релаксации порядка 2—3 мин соответствуют масштабам  $l_{\perp} \sim 500 \div 1000$  м неоднородностей  $N_e$  [11]. Ослабление амплитуд пробных сигналов будет наблюдаться тогда, когда углы рассеяния  $\theta_s$  пробных радиоволн на неоднородностях будут сравнимы или больше полуширины диаграммы направленности  $\theta_A$  приемно-передающей антенны и угловых размеров ОБ  $\theta_L \sim \theta_A$ . Для  $\theta_A \sim 9^\circ$ ,  $l_{\perp} = 600$  м и дополнительного, помимо рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях, ослабления сигнала на 20—40% можно показать [12], что искусственные неоднородности с  $l_{\perp} \sim 500 \div 1000$  м имеют относительное изменение концентрации  $\Delta N_e / N_e \sim 5 \cdot 10^{-3}$ .

Оценим параметры крупномасштабной ОБ, воспользовавшись выражением для коэффициента усиления амплитуды пробного сигнала [13]:

$$k = \left[ 1 - \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{L_1 L_2}{(L_1 + L_2) l_r} \left( \frac{f_0}{f_p} \right)^2 \frac{1}{\epsilon} \frac{\Delta N_e}{N_e} \right]^{-1}, \quad (1)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — расстояние от ППВ до ОБ и от ОБ до приемного пункта соответственно,  $l_r$  — характерный размер по горизонтали ОБ (определяется диаграммой направленности ВП),  $f_0/f_p$  — отношение плазменной частоты в центре ОБ к частоте пробной волны,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость.

Исходя из (1), увеличение амплитуды пробного сигнала в 1,5 раза можно объяснить при максимальном относительном изменении в центре ОБ  $\Delta N_e / N_e \sim 5 \cdot 10^{-2}$ . Эта оценка хорошо согласуется с экспериментальными данными [7] и с теоретическими оценками [4].

Исходя из характерных времен развития и релаксации крупномасштабной ОБ  $t \approx 7 \div 8$  мин, можно оценить ее вертикальные размеры  $L_B$ :

$$L_B^2 \approx D_{a\parallel} t, \quad (2)$$

где  $D_{a\parallel} = 6 \cdot 10^9$  см<sup>2</sup>/с [1] — коэффициент продольной амбиполярной диффузии. Из (2) можно получить, что  $L_B \approx 15 \div 20$  км.

По времени развития и релаксации ( $\sim 2$  мин) ослабления амплитуд в результате рассеяния пробных радиоволн на среднемасштабных неоднородностях ( $l_{\perp} \sim 500 \div 1000$  м) из (2) можно оценить их продольные размеры,  $l_{\parallel} \sim 8$  км.

Таким образом, на основе изложенных выше экспериментальных результатов можно сделать вывод, что при нагреве  $F$ -слоя ионосферы мощными КВ сигналами в ОБ усиливаются или генерируются неоднородности  $N_e$  различных масштабов: от  $l_{\perp} < 20 \div 50$  м (за время 10—40 с) до  $l_{\perp} \geq 600$  м (за время 2—3 мин) с  $\Delta N_e / N_e \sim 5 \cdot 10^{-3}$  и за время 7—8 мин формируется крупномасштабная ОБ с  $\Delta N_e / N_e \geq 5 \cdot 10^{-2}$  при эквивалентной мощности ВП  $\sim 20$  МВт. Такая ОБ обладает фоку-

сирующими свойствами и вызывает увеличение амплитуды пробных сигналов с частотой  $f_{\text{п}}=6-7$  МГц, проходящих вблизи ее центра, примерно в 1,5 раза.

**2. Исследование параметров ОВ нижней ионосферы.** Эксперименты по исследованию параметров ОВ нижней ионосферы с помощью регистрации доплеровского смещения частоты пробной волны проводились одновременно с описанными в первой части работы. При включении ВП (на обыкновенной и необыкновенной волнах) наблюдалось увеличение доплеровского смещения частоты пробных волн в среднем на 0,1 Гц. При его выключении наблюдалось уменьшение доплеровского смещения частоты примерно на такую же величину. Эти изменения наиболее отчетливо проявлялись в первые 30 с после включения и выключения ВП. В табл. 1 приведены усредненные по  $n$  последовательным сеансам наблюдений величины изменений доплеровской частоты  $\Delta f$  пробной волны при включении и выключении ВП. Полученные результаты, по-видимому, указывают на увеличение  $N_e$  в  $E$ -слое, возникающее при работе ВП на частоте  $f_{\text{в}} > f_0 E$  и связанное с нагревом ионосферной плазмы из-за омических потерь мощной волны. Об увеличении  $N_e$  свидетельствует также тот факт, что величины  $\Delta f$  не зависят от компоненты возмущающей волны. Оценка времени изменения  $N_e$  в  $E$ -слое ионосферы [2] — 20—50 с — хорошо совпадает с полученным экспериментальным значением.

Таблица 1

Дата	Частота, МГц	$\Delta f$ , Гц		Волна КВ передатчика
		Включение	Выключение	
11.05.82	6,17	$n = 15$ $\Delta f = 0,15$	$n = 17$ $\Delta f = -0,1$	Необыкновенная
12.05.82	6,05	$n = 11$ $\Delta f = 0,12$	$n = 11$ $\Delta f = -0,14$	Необыкновенная
		$n = 11$ $\Delta f = 0,13$	$n = 11$ $\Delta f = -0,1$	Обыкновенная
13.05.82	6,97	$n = 11$ $\Delta f = 0,06$	$n = 11$ $\Delta f = -0,1$	Необыкновенная
		$n = 11$ $\Delta f = 0,06$	$n = 11$ $\Delta f = -0,08$	Обыкновенная

Из известного выражения величины доплеровского смещения частоты [14]  $f_{\text{д}} = -2f_{\text{п}}/c \int_0^{z(z=0)} (\partial n/\partial t) dz$  для показателя преломления в виде  $n = (1 - f_p^2(z, t)/f_n^2)^{1/2}$  с использованием параболической модели  $E$ -слоя  $f_p^2(z, t) = f_0^2 (1 - z^2/y_m^2) + \Delta f_0^2 (1 - z^2/y_m^2) F(t)$ , где  $f_0$  — плазменная частота в максимуме слоя,  $z$  — высота от максимума слоя,  $y_m$  — полутолщина слоя,  $F(t)$  — временная зависимость  $N_e$ ,  $\Delta f_0$  — изменение  $f_0$  из-за нагрева, получим

$$f_{\text{д}} = \frac{f_{\text{п}}}{c} \frac{\Delta N_e}{N_e} y_m \frac{\partial F(t)}{\partial t} \left( \frac{a^2 + 1}{2a} \ln \left| \frac{1+a}{1-a} \right| - 1 \right), \quad (3)$$

где  $a^2 = f_0^2/f_n^2$ . Из (3) можно выразить изменение  $\Delta N_e/N_e$  как

$$\Delta N_e/N_e = \left[ \frac{\partial F(t)}{\partial t} \frac{y_m}{c} \frac{f_{\text{п}}}{f_{\text{д}}} \left( \frac{a^2 + 1}{2a} \ln \left| \frac{1+a}{1-a} \right| - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Задавая  $F(t) = 1 - \exp(-t/\tau)$  и подставляя в (4)  $f_{\text{п}} = 6 \div 7$  МГц,  $f_0 = 3$  МГц,  $f_{\text{д}} = 0,1$  Гц,  $y_m = 30$  км при  $t = \tau = 30$  с, получаем  $\Delta N_e/N_e \approx 5 \cdot 10^{-2}$ .

Найденное значение  $\Delta N_e/N_e$  при нагреве  $E$ -слоя ионосферы мощными радиоволнами ВП с  $P_0 = P \times G \approx 20$  МВт хорошо согласуется с результатами работы [15]. Следовательно, доплеровское смещение частоты  $f_{\text{д}} \approx 0,1 \div 0,17$  Гц, наблюдаемое при воздействии на ионосферную плазму мощным КВ излучением с  $P \times G \approx 20$  МВт, достаточно хорошо объясняется увеличением  $N_e$  в  $E$ -слое.

В заключение следует отметить, что примерное равенство доплеровских смещений частоты пробных волн при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением (обыкновенной и необыкновенной компонентами) позволяет сделать вывод, что в нашем эксперименте при  $P_0 = 20$  МВт не наблюдался эффект стимулированной ионизации верхней ионосферы [16].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич А В, Шварцбург А Б Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере — М: Наука, 1973, с 60
2. Игнатъев Ю А. — Изв вузов — Радиофизика, 1978, 21, № 3, с 352.
3. Бахматьева Н В, Жислин Г М, Игнатъев Ю А, Матюгин С П, Петрухина В И Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн — М: Наука, 1981. Т 1, с 146
4. Васильков В В, Гуревич А В. — Сб Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с 81.
5. Бенедиктов Е А, Горохов Н А, Игнатъев Ю А, Матюгин С Н, Митихин Ю В — Изв вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 4, с 502.
6. Бочкарев Г С, Пахотин В А, Рудыка Л В — Сб. Дифракционные эффекты коротких радиоволн. — М. ИЗМИРАН СССР, 1981, с 38
7. Ерухимов Л М, Метелев С А, Митякова Э Е, Мясников Е Н, Рахлин А В, Урядов В П, Фролов В Л. — Сб Тепловые нелинейные явления в плазме — Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с 7
8. Бенедиктов Е А, Горохов Н А, Игнатъев Ю А, Матюгин С П, Митихин Ю В. Тезисы докладов XIII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн — М: Наука, 1981 Т 1, с. 182
9. 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. Л. — Изв вузов — Радиофизика, 1975, 18, № 4, с 516
10. Васильков В В, Гуревич А В — Геомагнетизм и аэрономия, 1976, 16, № 6, с. 1112.
11. Ерухимов Л М, Мясников Е Н, Фролов В. Л. Тезисы докладов II Всесоюзного совещания по проблеме «Неоднородная структура ионосферы» — Ашхабад 1979, с 38
12. Бенедиктов Е А, Митяков Н А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1959, 2, № 3, с 344.
13. Бенедиктов Е А, Гетманцев Г. Г., Игнатъев Ю. А., Матюгин С. Н — Сб Влияние мощного радиоизлучения на ионосферу. — Апатиты 1979, с. 29.
14. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме — М: Наука, 1967, с. 506
15. Бенедиктов Е А, Гетманцев Г. Г., Зюзин В А, Игнатъев Ю А. — Геомагнетизм и аэрономия, 1980, № 5, с 955
16. Васильков В В, Голян С Ф и др — Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, вып 11, с. 582.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
31 января 1983 г.

#### EXPERIMENTAL RESULTS OF INVESTIGATION OF ARTIFICIAL REGION PARAMETERS FOR UPPER AND LOWER IONOSPHERE DISTURBANCE BY THE METHOD OF VERTICAL SENSING

*E. A. Benediktov, N. P. Goncharov, Yu. A. Ignat'ev, S. N. Matyugin, P. B. Shavin*

Experimental results are given for the investigation of parameters of artificial disturbance region (DR) of the ionosphere which occurs under the action of a powerful HF wave radiation ( $P_e \approx 20$  MW) at 5.75 MHz. It is shown that DR with  $\Delta N_e/N_e \approx 5 \cdot 10^{-2}$  are formed in the  $F$ -layer of the ionosphere and irregularities  $N_e$  are generated or amplified. Such a DR acts on probe radio waves passing through it like a focusing lens. The amplification of  $N_e$  by  $5 \cdot 10^{-2}$  for the time of about 30 s occurs in the  $E$ -layer.