

И. М. ВИЛЕНСКИЙ

ОБ ОДНОМ НЕЛИНЕЙНОМ ЭФФЕКТЕ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

(Представлено академиком В. Л. Гинзбургом 25 VIII 1969)

В настоящей работе обсуждается, насколько нам известно, ранее не рассматривавшийся нелинейный эффект в ионосфере — возникновение искусственных градиентов показателя преломления под действием распространяющихся в ней мощных радиоволн. Появление таких градиентов может оказать заметное влияние на рассеяние (отражение) радиоволн, возмущающих ионосферу или проходящих через возмущенную область.

Простейший механизм рассматриваемого явления следующий: под действием мощной волны происходит заметное изменение электронной температуры и, как следствие, изменение эффективного числа соударений электронов с тяжелыми частицами ионосферы (молекулами, ионами). Это вызывает соответствующие изменения показателя преломления (речь идет о нижней части ионосферы и о невысоких частотах распространяющихся радиоволн, когда выполнено условие $\omega \approx \nu_{эф}$; ω — частота распространяющихся волн, $\nu_{эф}$ — эффективное число соударений).

Поскольку рассматриваемые изменения температуры происходят в относительно тонком слое нижней ионосферы, образующиеся в этой области градиенты показателя преломления могут быть вполне заметными. Отметим, что на возможность влияния нелинейных явлений на интерпретацию данных о частичных отражениях было указано в (1).

Для оценки коэффициента отражения от возникающих таким образом неоднородностей ионосферы можно воспользоваться формулами Френеля. Тогда в простейшем случае квазипродольного распространения будем иметь (см., например, (2)):

$$R_{0,x} \cong - \frac{\omega_0^2}{4\omega(\omega \pm \omega_L - i\nu_{эф})} \left\{ \frac{\delta N}{N} + i \frac{\delta \nu_{эф}}{\omega \pm \omega_L - i\nu_{эф}} \right\}. \quad (4)$$

Здесь $R_{0,x}$ — коэффициент отражения обыкновенной (0) или необыкновенных (x) составляющих радиоволны; $\omega_0 = (4\pi e^2 N / m)^{1/2}$ — плазменная частота в области отражения (N — электронная концентрация в этой области); $\omega_L = \omega_H \cos \alpha$; ω_H — гиромангнитная частота; α — угол между магнитным полем Земли и направлением распространения волны (рассматривается случай вертикального распространения); δN , $\delta \nu_{эф}$ — изменения соответствующих величин (N , $\nu_{эф}$) на длине волны.

При написании формулы (1) мы для простоты пренебрегли поглощением волны на пути до области отражения (рассеяния) и обратно и, кроме того, не учли возможные локальные градиенты гиромангнитной частоты. Эти пренебрежения не сказываются на последующих оценках.

Для учета степени влияния распространяющейся мощной волны воспользуемся данными эксперимента (3), когда при изменении в 2 раза мощности передатчика, работающего на волне $\lambda \approx 1300$ м, во столько же раз изменялось эффективное число столкновений. При этом расчеты показывают, что изменение $\nu_{эф}$ происходит главным образом в ионосферном слое с толщиной в несколько километров. Примем для оценки завышенное зна-

чение этой толщины $L = 10$ км. Тогда имеем $\delta v_{\phi} \approx \frac{\Delta v_{\text{эф}}}{L} \lambda \approx \frac{v_{\text{эф}}}{L} \lambda$, и при $v_{\text{эф}} \approx 3 \cdot 10^6$ (это соответствует высоте ~ 70 км) получим $\delta v_{\text{эф}} \approx \approx 3,9 \cdot 10^5$. При $\omega_L \sim 8 \cdot 10^6$ получаем $|\delta v_{\text{эф}} / \omega_L| \approx 0,05$. В то же время член $\delta N / N$, по-видимому, не превышает долей процента или нескольких процентов. Поэтому можно считать, что в таком эксперименте вклад в коэффициент отражения искусственно созданных неоднородностей будет по крайней мере не меньше вклада естественных неоднородностей электронной концентрации.

Расчеты показывают, что в ряде случаев мощные волны могут вызвать в ионосфере и более резкие градиенты показателя преломления, которые будут еще более существенно влиять на отражение радиоволн. Так, например, при мощности импульсного передатчика $P \approx 10^6$ квт, работающего на частоте 1,7 Мгц, расчет дает изменение $v_{\text{эф}}$ от высоты ~ 70 км до высоты ~ 80 км примерно в 10 раз (вычисления проведены для ночной модели ионосферы). В таких условиях коэффициент отражения от неоднородностей, обусловленных нагреванием ионосферы, увеличится еще на порядок по сравнению с рассмотренным выше примером.

Вместе с тем необходимо заметить, что при существенно меньших мощностях средневолновых передатчиков [$P \ll 100 \div 500$ квт) отражения от искусственно созданных неоднородностей не будут играть существенной роли, так как возникающие при этом градиенты $v_{\text{эф}}$ меньше тех градиентов, которые имеют место всегда из-за регулярного изменения $v_{\text{эф}}$ с высотой.

Интересное явление может наблюдаться при распространении необыкновенной компоненты волны, частота которой близка к местной гироманнитной частоте. Как известно, такая волна будет очень сильно поглощаться в самой нижней части ионосферы и, вообще говоря, отраженная волна практически должна отсутствовать (в области отражения амплитуда поля такой волны ничтожно мала). Однако, если мощность передатчика достаточно велика, то в нижней части ионосферы будет возникать более резкие искусственные градиенты показателя преломления, чем это имеет место при $\omega \neq \omega_H$, и распространяющиеся волны будут заметно от них отражаться. Таким образом, в рассматриваемом случае практически все отражение волны будет происходить не от области $n \approx 0$, а от более низкой области с искусственно созданным градиентом коэффициента преломления*.

Представляется интересным рассмотреть еще одно явление, связанное с возникновением искусственных неоднородностей в ионосфере под действием мощных радиоволн.

Как известно, ниже области отражения радиоволн в ионосфере создаются стоячие электромагнитные волны. Если мощность этих волн достаточно велика, то в ионосфере будут образовываться «узлы» и «пучности» электронной температуры и, следовательно, «узлы» и «пучности» коэффициента преломления. Такая система будет являться своеобразной дифракционной решеткой, дифракцию от которой можно наблюдать как при приеме «возмущающих» волн, так и при приеме других радиоволн, распространяющихся в «возмущенной» области ионосферы. Конечно, решетка не будет строго периодической из-за зависимости коэффициента преломления от высоты. Кроме того, дифракционная картина будет искажаться рассеянными от мелкомасштабных неоднородностей радиоволнами. Однако нам представляется, что наблюдение указанной дифракции возможно и, несомненно, интересно.

* Как нам сообщил С. С. Шлюгер, коэффициент отражения необыкновенной компоненты достаточно мощных радиоволн, частота которых близка к местной гироманнитной частоте, на опыте действительно оказался существенно отличным от нуля.

В заключение заметим, что на коэффициенте отражения будут, вообще говоря, сказываться и изменения электронной концентрации в ионосфере при распространении в ней радиоволн (⁴, ⁵).

Более подробный количественный анализ затронутых здесь вопросов в настоящее время осуществляется.

Институт геологии и геофизики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
20 VIII 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. S. Belrose, I. A. Bourne, L. W. Hewitt, Ground-based Radio Wave Propagation Studies of the Lower Ionosphere, Conf. Proc., Ottawa, Canada, 1, 1967, p. 125.
² И. М. Виленский, В. В. Плоткин, Геомагнетизм и аэрномия, 9, 564 (1969).
³ И. М. Виленский, Радиофизика, 9, 649 (1966). ⁴ В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ, 35, 1573 (1958). ⁵ А. В. Гуревич, Геомагнетизм и аэрномия, 5, 71 (1965).