

УДК 621 371 25

ВЛИЯНИЕ НА СПОРАДИЧЕСКИЙ СЛОЙ E НАГРЕВА ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Ю. А. Игнатьев

Исследуется влияние нагрева электронного газа ионосферы мощным радиоизлучением на спорадический слой E в рамках теории ветрового сдвига с учетом перераспределения металлических ионов. Приводятся оценки изменения электронной концентрации в регулярной области E и слое E_s для различных степеней нагрева электронного газа мощным радиоизлучением. Показано, что вследствие нагрева полем радиоволны электронная концентрация в слое E_s падает, а его толщина увеличивается.

Изучению влияния мощных радиоволн на ионосферу посвящено несколько работ (см., например, [1-4]). При воздействии радиоволн на ионосферу происходит ряд явлений, в том числе и нагрев электронного газа. Это вызывает изменение эффективного коэффициента рекомбинации α_r . В частности, в области E ионосферы коэффициент α_r уменьшается [5]. Вследствие этого электронная концентрация под воздействием сильного переменного поля возрастает. Другая ситуация складывается при нагреве мощным радиоизлучением среднеширотного спорадического слоя E . Это связано с тем, что среднеширотный слой E_s образуется в основном из долгоживущих металлических ионов, для которых доминирующими являются не фотохимические процессы, а процесс амбиполярной диффузии [6, 7]. При увеличении же коэффициента диффузии вследствие нагрева электронов в поле мощной радиоволны должно происходить уменьшение электронной концентрации в спорадическом слое E . В данной работе в рамках теории ветрового сдвига с учетом перераспределения металлических ионов исследуется влияние на формирование слоя E_s нагрева мощным радиоизлучением.

При воздействии переменного электрического поля радиоволны в области E возрастает температура электронов T_e по сравнению с температурой ионов и нейтральных молекул T (на рассматриваемых высотах не интересуемся стрикционными и магнитными типами нелинейности). Оценим величину изменения электронной концентрации N_e в результате нагрева электронного газа регулярной области E (без учета динамических процессов, а следовательно, и без неоднородных образований типа слоя E_s^*) для модели, состоящей из молекулярных ионов с концентрацией N_{i1}^{00} и металлических с концентрацией N_{i2}^{00**} . В этом случае уравнения непрерывности для электронов и металлических ионов при учете квазинейтральности ионосферной плазмы ($N_e = N_{i1} + N_{i2}$) имеют вид

$$J_e - \alpha_{i1}(N_e^0 - N_{i2}^0) N_e^0 - \alpha_{i2} N_{i2}^0 N_e^0 = 0; \quad (1)$$

* Это эквивалентно предположению, что размер возмущенной области достаточно велик, так что можно пренебречь процессами переноса.

** Индекс «00» будем относить к случаю изотермической ионосферы ($T_e = T$), а индекс «0» — к случаю $T_e < T$, но без учета перераспределения ионизации, т. е. в отсутствие слоя E_s .

$$J_{i2} - \alpha_{i2} N_{i2}^0 N_e^0 - \beta N_{i2}^0 = 0. \quad (2)$$

Здесь J_e и J_{i2} — соответственно функции образования электронов и металлических ионов, α_{i1} и α_{i2} — коэффициент диссоциативной рекомбинации атмосферных ионов NO^+ и O_2^+ и радиативной рекомбинации металлических ионов. Все величины в данных выражениях относятся к случаю $T_e > T$. При $T_e = T$, т. е. без нагрева электрическим полем, $J_e = \alpha_{i1}^0 N_{i1}^{00} N_e^{00} + \alpha_{i2} N_{i2}^{00} N_e^{00}$ и $J_{i2} = \alpha_{i2} N_{i2}^{00} N_e^{00} + \beta N_{i2}^{00}$. В (2) учтено, что металлические ионы могут исчезать в результате инно-обменных реакций типа $A^+ + \text{O}_3 \rightarrow \text{AO}_2^+ + \text{O}$ со скоростью $\beta = 10^{-10} N_{\text{O}_3} \text{c}^{-1}$ (A^+ — ионы металла, N_{O_3} — концентрация молекул O_3) [8]. В этом случае из (1) и (2) можно получить следующие выражения для N_e^0 и N_{i2}^0 :

$$N_e^0 = N_{i2}^{00}/2 + [(N_{i2}^{00}/2)^2 + \alpha_{i1}^0 N_e^{00} (N_e^{00} - N_{i2}^{00}/\alpha_{i1}^0)]^{1/2}; \quad (3)$$

$$N_{i2}^0 = (\beta N_{i2}^{00} + \alpha_{i2}^0 N_{i2}^{00} N_e^{00})/\beta. \quad (4)$$

Здесь $\alpha_{i1} = \alpha_{i1}^0 (T/T_e)^{1/2}$ при $T_e < 1000^\circ$ и $\alpha_{i1} = \alpha_{i1}^0 (T/T_e)^{3/2}$ при $T_e \gg 1000^\circ$. В силу такой зависимости α_{i1} от T_e электронная концентрация в области E при нагреве сильным полем радиоволн увеличивается. Расчеты по формуле (3) показывают, что при нагреве электронов сильным электрическим полем до $T_e/T = 1,33$ электронная концентрация области E увеличивается на 7%, а при $T_e/T = 2$ концентрация N_e^0 увеличивается на 17%. (Выбирали $N_e^{00} = 10^5 \text{ см}^{-3}$, $N_{i2}^{00} = 10^4 \text{ см}^{-3}$ и $T = 300^\circ$.)

Появление среднеширотного слоя E_s связывают с перераспределением долгоживущих положительных ионов области E ионосферы в присутствии магнитного поля Земли под действием горизонтальных ветров, обладающих резкими градиентами скорости (сдвигами) по высоте [6, 7, 9, 10]. В этом случае, несмотря на то, что размер возмущенной мощным радиоизлучением области достаточно велик, необходимо учитывать влияние амбиполярной диффузии и увлечения заряженных частиц нейтральными. Исходными являются уравнения движения для электронов, атмосферных NO^+ и O_2^+ и металлических ионов:

$$m N_e \frac{\partial V_e}{\partial t} + m N_e \nu_e (V_e - U) = -\chi T_e \nabla N_e - e N_e E - m N_e \omega_H [V_e h]; \quad (5)$$

$$M_1 N_{i1} \frac{\partial V_{i1}}{\partial t} + M_1 N_{i1} \nu_{i1} (V_{i1} - U) = -\chi T \nabla N_{i1} + e N_{i1} E + M_1 N_{i1} \Omega_{H1} [V_{i1} h]; \quad (6)$$

$$M_2 N_{i2} \frac{\partial V_{i2}}{\partial t} + M_2 N_{i2} \nu_{i2} (V_{i2} - U) = -\chi T \nabla N_{i2} + e N_{i2} E + M_2 N_{i2} \Omega_{H2} [V_{i2} h]. \quad (7)$$

Здесь индекс «1» относится к атмосферным ионам, а индекс «2» — к долгоживущим металлическим, V_e , V_{i1} , V_{i2} — скорости упорядоченного движения электронов и обоих сортов положительных ионов, U — скорость нейтрального ветра, χ — постоянная Больцмана, m , M_1 , M_2 и ω_H , Ω_{H1} , Ω_{H2} — массы и гирочастоты электронов и ионов, E — внутреннее электрическое поле, h — единичный вектор в направлении геомагнитного поля H_0 , ν_e и ν_{i1} , ν_{i2} — частоты столкновений электронов и обоих сортов ионов с молекулами. Эффекты воздействия мощного радиоизлучения на слой E_s рассматриваются для идеализи-

рованной модели однородного нагрева электронного газа в области E до температуры T_e , в связи с этим не учитываются процессы термодиффузии. Выражения (5)—(7) необходимо дополнить уравнениями непрерывности для электронов и ионов:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \operatorname{div}(N_e V_e) = J_e - (\alpha_{i1} N_{i1} + \alpha_{i2} N_{i2}) N_e; \quad (8)$$

$$\frac{\partial N_{i1}}{\partial t} + \operatorname{div}(N_{i1} V_{i1}) = J_{i1} - \alpha_{i1} N_{i1} N_e; \quad (9)$$

$$\frac{\partial N_{i2}}{\partial t} + \operatorname{div}(N_{i2} V_{i2}) = J_{i2} - \alpha_{i2} N_{i2} N_e - \beta N_{i2}. \quad (10)$$

Из теории ветрового сдвига следует [10], что слой E_s формируется в области высот, где $\omega_H^2 \cos^2 \alpha \gg v_e^2$ и $\Omega_H^2 \cos^2 \alpha \ll v_i^2$ (α — угол между вертикалью z и геомагнитным полем в прямоугольной системе координат x, y, z). Частота ν_e увеличивается в результате нагрева электронного газа области E мощным радиоизлучением. Однако, как показали расчеты, условие $\omega_H^2 \cos^2 \alpha \gg v_e^2$ выполняется с достаточно большим запасом, так что нагрев даже до $T_e/T = 10$ не меняет это условие. Далее учтем, что для атмосферных ионов процесс диссоциативной рекомбинации на уровне области E является более быстрым, чем динамические процессы [6]. Это дает основание не учитывать в (9) слагаемое $\operatorname{div}(N_{i1} V_{i1})$. Для металлических же ионов процессы перераспределения за счет ветровых сдвигов являются более эффективными, чем процессы исчезновения за счет радиативной рекомбинации, либо ионно-обменных реакций. Вследствие этого в уравнении (10) можно не учитывать слагаемые в правой части.

В этом случае, используя ряд типичных для области E предположений, из уравнений (5)—(7) можно выразить скорости V_e, V_{i1}, V_{i2} . Подставляя их в (8)—(10) после исключения электрического поля E , получим следующие выражения:

$$N_e = J_{i1} / \alpha_{i1} N_{i1}; \quad (11)$$

$$[N_{i1} / (J_{i1} / \alpha_{i1} - N_{i1}^2)]^{T/T_e} N_{i1} = R \exp \left(\frac{M_2 \Omega_{H2} \sin \alpha}{x T_e} \int U_y(z) dz \right); \quad (12)$$

$$N_{i2} = (J_{i2} - \alpha_{i2} N_{i1}^2) / \alpha_{i1} N_{i1}, \quad (13)$$

где R — постоянная интегрирования, $U_y(z)$ — зональная составляющая скорости ветра U . Для случая формирования достаточно интенсивного слоя E_s выполняется условие $N_e/N_{e0} \gg N_{i1}/N_{i1}^0$. Это означает, что спорадический слой E образуется в основном из металлических ионов. При выполнении указанного выше неравенства из (11)—(13) можно получить выражения для определения концентрации электронов и обоих сортов ионов в слое E_s для случая нагрева электронного газа области E полем мощной радиоволны до температуры T_e :

$$N_{e, \max} \approx \frac{(N_{i2}^0)^2 2\pi\delta + N_{i1}^0 N_e^0}{N_{i2}^0 \sqrt{2\pi\delta}}; \quad (14)$$

$$N_{i1} \approx \frac{N_{i1}^0 N_e^0}{N_{i2}^0 \sqrt{2\pi\delta}}; \quad (15)$$

$$N_{i2, \max} \approx N_{i2}^0 \sqrt{2\pi\delta}. \quad (16)$$

Здесь $\delta = M_2 \Omega_{H2} U_0 \lambda \sin \alpha / 2\pi k (T + T_e)$, U_0 и λ — амплитуда и длина волны высотного профиля скорости ветра $(U_y(z) = U_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} z)$. Значе-

ния концентраций регулярной области E при учете влияния поля мощной радиоволны определяются по формулам (3), (4). Отметим, что при $T_e = T$ выражения (14) — (16) переходят в полученные ранее в теории ветрового сдвига с учетом перераспределения металлических ионов в области E [6]. Постоянная интегрирования R определяется из условия сохранения полного числа ионов металла в столбе высотой λ , так как процесс исчезновения этих ионов из-за радиативной рекомбинации или ионно-обменных реакций намного медленнее динамических процессов:

$$\int_0^\lambda N_{i2}^0 dz = \int_0^\lambda N_{i2} dz.$$

Ширина спорадического слоя E будет порядка

$$\Delta z \approx \lambda / 2\pi \sqrt{\delta}. \quad (17)$$

Анализ полученных выражений позволяет сделать вывод, что влияние нагрева области E полем мощной радиоволны проявляется в уменьшении электронной концентрации в спорадическом слое E и увеличении его ширины. Это связано со следующим. Процессами, препятствующими собиранию ионизации на определенном уровне вследствие перераспределения, являются диффузия и рекомбинация. Но на средних широтах слой E_s формируется в основном из металлических ионов, для которых процесс амбиполярной диффузии является преобладающим по сравнению с фотохимическими реакциями. Вследствие же нагрева электронного газа мощным радиоизлучением коэффициент амбиполярной диффузии $D_a = \frac{\alpha(T + T_e)}{M_2 \nu_{i2}}$ увеличивается. Расчеты показывают, что при нагреве электронов до $T_e/T = 1,33$ максимальная электронная концентрация в слое E_s уменьшается примерно на 10%, а при $T_e/T = 2$ концентрация $N_{e, \max}$ уменьшается примерно на 18%.

Для достаточно интенсивного спорадического слоя E $(N_{i2}^0)^2 \times \times 2\pi\delta \gg N_{i1}^0 N_e^0$. В этом случае получим следующую температурную зависимость отношения $N_{e, \max}$ в максимуме слоя E_s к $N_{e, \max}^{00}(T_e = T)$ без нагрева ионосферы полем мощной радиоволны.

$$\frac{N_{e, \max}(T_e > T)}{N_{e, \max}^{00}(T_e = T)} = [2/(1 + T_e/T)]^{1/2}. \quad (18)$$

Выражение (18) наглядно показывает, что максимальное значение электронной концентрации в слое E_s тем меньше, чем больше нагрев области E полем мощной радиоволны.

В табл. 1 приведены значения электронной концентрации в регулярной области E и электронной концентрации на уровне, где образуется слой E_s ($U_y = 0$ и $\frac{dU_y}{dz} > 0$) как функции отношения T_e/T . Расчеты проводились по формулам (3) и (14) для $U_0 = 150$ м/с, $\lambda = 20$ км, $N_e^{00} = 10^5$ см⁻³ и $N_{i2}^{00} = 2 \cdot 10^4$ см⁻³. В этом случае при отсутствии

искусственного нагрева ионосферы ($T_e = T$) под действием ветровых сдвигов формируется слой E_s с максимальным значением электронной концентрации $6,9 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Более быстрый рост N_e^0 при $T_e/T > 3$ объясняется более сильной зависимостью α_{ii} от T_e при $T_e \geq 1000^\circ$. При нагреве до $T_e/T = 5$ используемые формулы удовлетворительно описывают поведение электронной концентрации. При $T_e/T \geq 5$ формула (14) не применима, так как нарушается условие $N_e/N_{e0} \gg N_{ii}/N_{ii}^*$. При нагреве электронного газа области E полем мощной радиоволны выше $T_e/T = 5$ электронная концентрация в регулярной области E возрастает до значений, больших значения концентрации металлических ионов в слое E_s . Таким образом, при достаточно сильном нагреве увеличение концентрации электронов в регулярной области E из-з уменьшения α_{ii} будет доминирующим. Однако следует отметить, что для нагрева области E до температур $T_e/T = 5$ на частоте $f \sim 6 \text{ МГц}$, например, необходимо создать на этих высотах ионосферы переменное поле весьма большей амплитуды порядка 2 В/м .

Таблица 1

T_e/T	1	1,33	1,66	2	3,33	5	10	20
$N_e^0 \cdot 10^{-5}$	1	1,07	1,13	1,28	2,3	3,1	5,10	6
$N_{e, \text{max}} \cdot 10^{-5}$	6,9	6,5	6	5,7	4,6	3,1	5,1	6

ЛИТЕРАТУРА

1. В Л Гинзбург, А. В Гуревич, УФН, 70, 201, 393 (1960).
2. D. T. Farley, J. Geophys. Res., 68, 401 (1963).
3. А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург, Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере, изд Наука, М, 1973
4. Н. А Митяков, В. О. Рапопорт, В. Ю. Трахтенгерц, Геомагнетизм и аэрономия, 14, 36 (1974).
5. Г. С Иванов-Холодный, Г. М. Никольский, Солнце и ионосфера, изд. Наука, М, 1969.
6. Ю. А. Игнат'ев, Изв высш. уч. зав. — Радиофизика, 14, № 4, 554 (1971).
7. Ю. А. Игнат'ев, Н. И Лисина, Геомагнетизм и аэрономия, 12, 756 (1972).
8. W. Swider, Planet. Space Sci., 17, 1233 (1969).
9. J. D. Whitehead, Radio Sci., 1, № 2, 198 (1966).
10. Б. Н. Гершман, Ю. А. Игнат'ев, Геомагнетизм и аэрономия, 9, 630 (1969).

Научно-исследовательский радиофизический институт

THE INFLUENCE OF IONOSPHERE POWERFUL HEATING ON SPORADIC E- REGION

Yu. A. Ignat'ev

The influence of the ionospheric electron gas heating by powerful radiation on the sporadic E-region in the frame of the wind shift theory with taking into account the metal ion re-distribution is investigated. Estimations of the change in the electron density in regular E-and E_s -regions are given for different degrees of heating the electron gas by powerful radiation. It is shown that due to heating by the radio wave field the electron density in E_s -region decreases and its thickness increases.

* При $T_e/T \geq 5$ в последней строке табл. 1 приведены значения N_e^0 для регулярной области E .