

Температура электронов в спорадическом слое E ионосферы Земли

Л.Б. Волкомирская¹, О.А. Гулевич¹, Н.В. Кривошеев², Т.Н. Ларина²,
Т.Н. Музыка², А.Е. Резников¹

¹ *Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук им. Н.В. Пушкова.*

² *Донской государственной технической университет*

Аннотация: Отмечается необходимость изучения теплового баланса ионосферных электронов в спорадическом слое E для уточнения условий его образования в рамках теории ветрового сдвига. Рассмотрена методика расчета высотного профиля температуры электронов в спорадическом слое E ионосферы. Отмечено удовлетворительное совпадение расчетного профиля электронной температуры с экспериментом.

Ключевые слова: ионосфера, температура электронов, спорадический слой, тепловой баланс, скорость нагрева, ветровой сдвиг, высотный профиль температуры, зондовые измерения.

Спорадический слой Es представляет собой случайное, локальное образование в ионосфере с повышенной концентрацией электронов, которая играет существенную роль при распространении радиоволн декаметрового и метрового диапазона. Слой может как способствовать появлению дополнительного канала радиопередачи, так и вызывать дополнительные помехи, приводя в ряде случаев к полному прекращению радиосвязи. Необходимо учитывать влияние спорадического слоя на распространение радиоволн на трассах в зависимости от их протяженности, технического оснащения и времени работы [1,2].

Трудности прогнозирования параметров слоя Es объясняются рядом причин, среди которых основными можно назвать: случайность появления слоя, отсутствие продолжительных непосредственных измерений характеристик слоя с помощью ракетной техники, многообразие физических явлений, оказывающих воздействие на образование и существование слоя Es [1].

Возникновение спорадического слоя E в средних широтах описывается теорией ветрового сдвига [3,4]. Одной из трудностей этой теории является несоответствие пикообразного теоретического и прямоугольного экспериментального профиля электронной концентрации в спорадическом слое. Это несоответствие может быть отчасти устранено при учете высотного хода электронной температуры в спорадическом слое.

Число экспериментов по измерению температуры электронов в спорадическом слое E невелико и результаты их не всегда однозначны из-за малой разрешающей способности измерительной аппаратуры и технической сложности эксперимента.

На рисунке 1 показан высотный профиль концентрации электронов в области E ионосферы, на котором наблюдается спорадический слой.

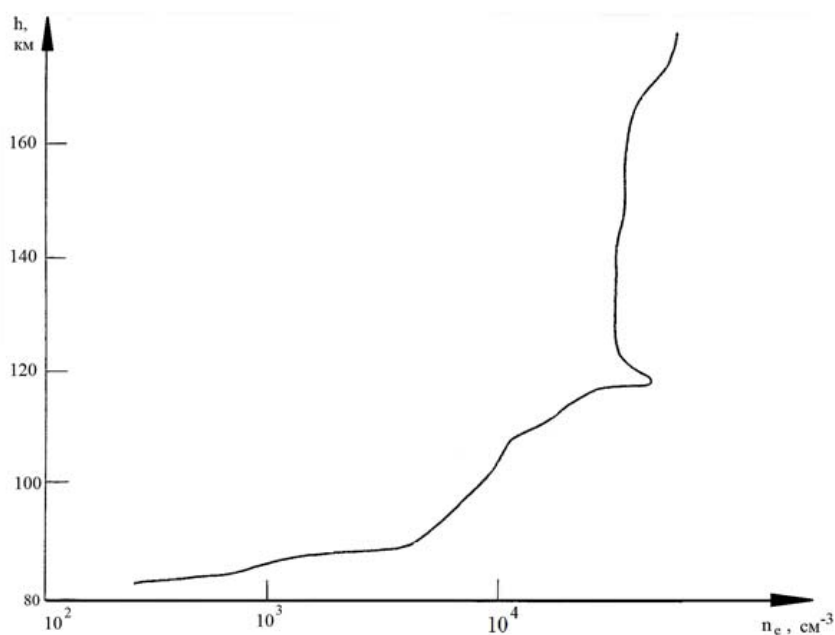


Рис. 1. – Высотный профиль электронной концентрации в присутствии спорадического слоя.

Профиль был получен в результате одного из экспериментов с высокочастотным импедансным зондом, обладающим достаточно высокой разрешающей способностью [5]. Примеры теоретического исследования

профиля электронной температуры в среднеширотном спорадическом слое E также обсуждались в [5].

В одном из примеров рассмотрено уравнение энергетического баланса электронного газа из которого получено выражение для расчета разности между электронной температурой T_e и температурой нейтральных частиц T_n в спорадическом слое. На рисунке 2 (кривая 1) приведен высотный ход разности ($T_e - T_n$) в идеализированном пикообразном спорадическом слое E, для которого зависимость n_e/n_o от высоты h представлена кривой 3. Здесь n_e и n_o – электронная концентрация в спорадическом слое и за его пределами соответственно. Однако расчетная формула сложна для определения $T_e(h)$ и, что наиболее существенно, входящий в нее коэффициент рекомбинации сам является функцией электронной температуры [3,4].

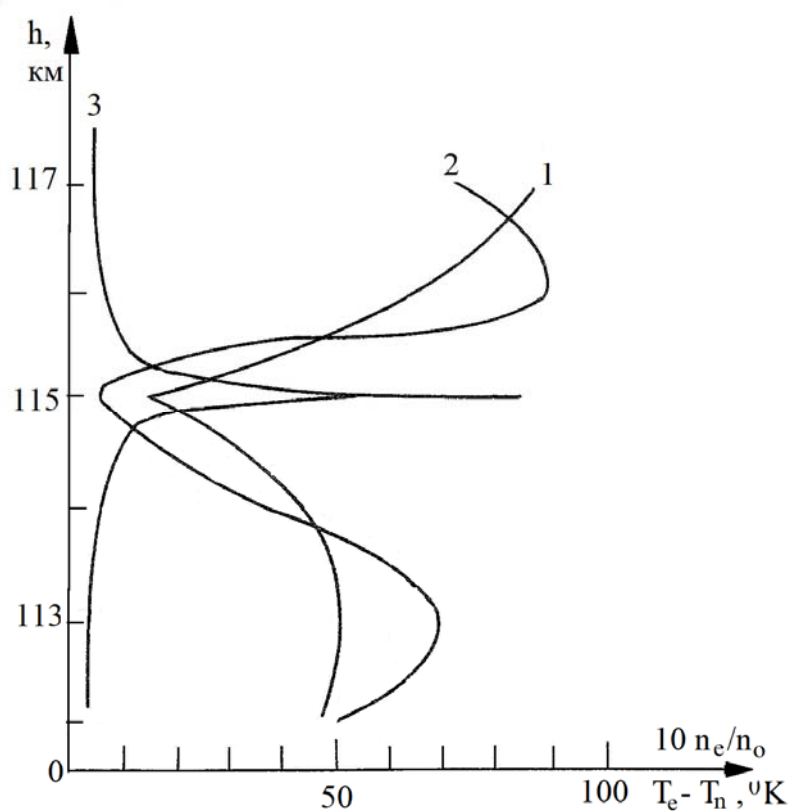


Рис. 2. – Высотный ход разности ($T_e - T_n$) в идеализированном пикообразном спорадическом слое E.

Мы предлагаем более простой метод расчета $T_e(h)$ в спорадическом слое, который также свободен от указанного выше недостатка. Исходя из уравнения энергетического баланса, считая процесс стационарным а среду плоскостной запишем уравнение теплового баланса для электронов в спорадическом слое E:

$$Q_e - L_e = \frac{5}{2} k \frac{d}{dh} (T_e * n_e * U). \quad (1)$$

Здесь Q_e – скорость притока тепла к электронам, L_e – скорость охлаждения электронов, U – скорость нейтрального ветра, k – постоянная Больцмана.

В этом уравнении членами, учитывающими теплопроводность и электрическое поле, пренебрегаем в силу их малости. Для решения уравнения теплового баланса были использованы граничные условия в виде заданного значения электронной температуры вне спорадического слоя вблизи его основания.

Высотный профиль ($T_e - T_n$), рассчитанный, исходя из приведенного выше уравнения теплового баланса для идеализированного спорадического слоя E, показан на рисунке 2 (кривая 2). Видно, что как кривая 1 из [5], так и кривая 2 указывают на уменьшение T_e в области максимума электронной концентрации и на относительное увеличение температуры электронов вблизи границ слоя. Количественные различия результатов расчета полученных двумя методами не превышают 25 К.

На рисунке 3 представлен профиль высотной зависимости концентрации электронов $n_e(h)$ типичного параболического спорадического слоя E с $n_e/n_o = 2,5$ в максимуме. На рисунке 4 для этого слоя представлено изменение профиля $T_e(h)$ в зависимости от величины притока тепла Q_e к электронному газу. Кривая 1 рассчитана для $Q_e = 1,5 * 10^4 (n_e/n_o)^2$ эВ/см³ с¹,

кривая 2 - для $Q_e = 2,25 \cdot 10^4 (n_e/n_0)^2$ эВ/см³ с¹. Из сопоставления результатов расчета видно, что увеличение притока тепла Q_e к электронному газу приводит к смещению профиля $T_e(h)$ в область более высоких значений температуры не изменяя его формы.

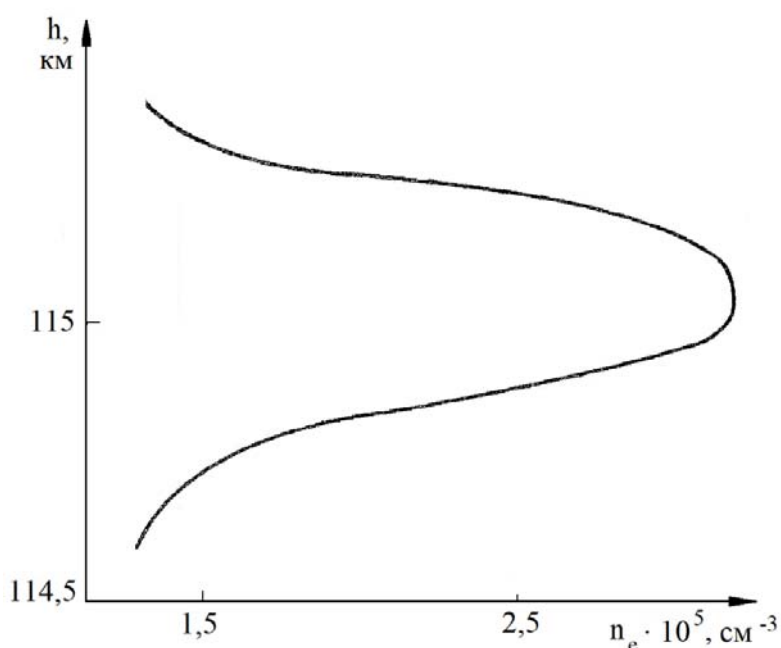


Рис. 3. – Высотные профили электронной концентрации.

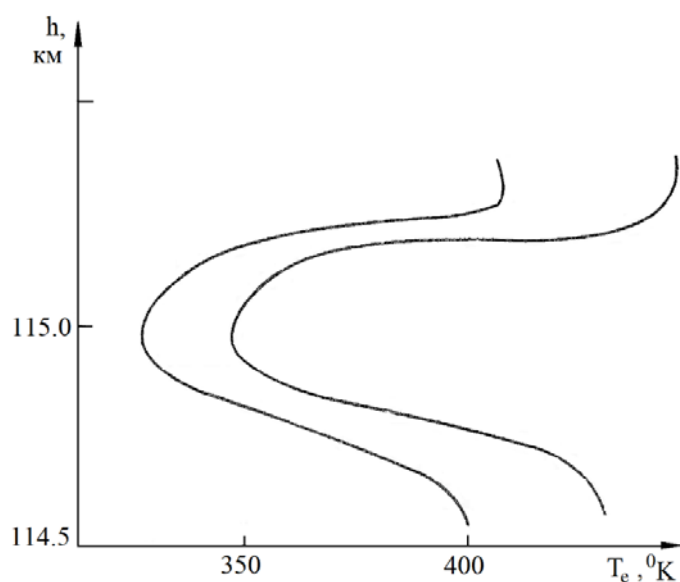


Рис. 4. – Изменение профиля $T_e(h)$ в зависимости от величины притока тепла Q_e к электронному газу для этого слоя.

Было проведено ориентировочное сопоставление рассчитанного нами профиля $T_e(h)$ с одним из экспериментальных профилей приведенным в [5]. Результаты измерений профиля $T_e(h)$ и профиля электронной температуры, рассчитанного из уравнения (1) для того же спорадического слоя показаны на рисунке 5 (кривая 1). Данные полученные в эксперименте отмечены точками. Здесь же (кривая 2) представлен профиль электронной концентрации в рассматриваемом спорадическом слое E. Приток тепла Q_e к электронному газу принимался равным $2,25 \cdot 10^4$ эВ/см³ с⁻¹.

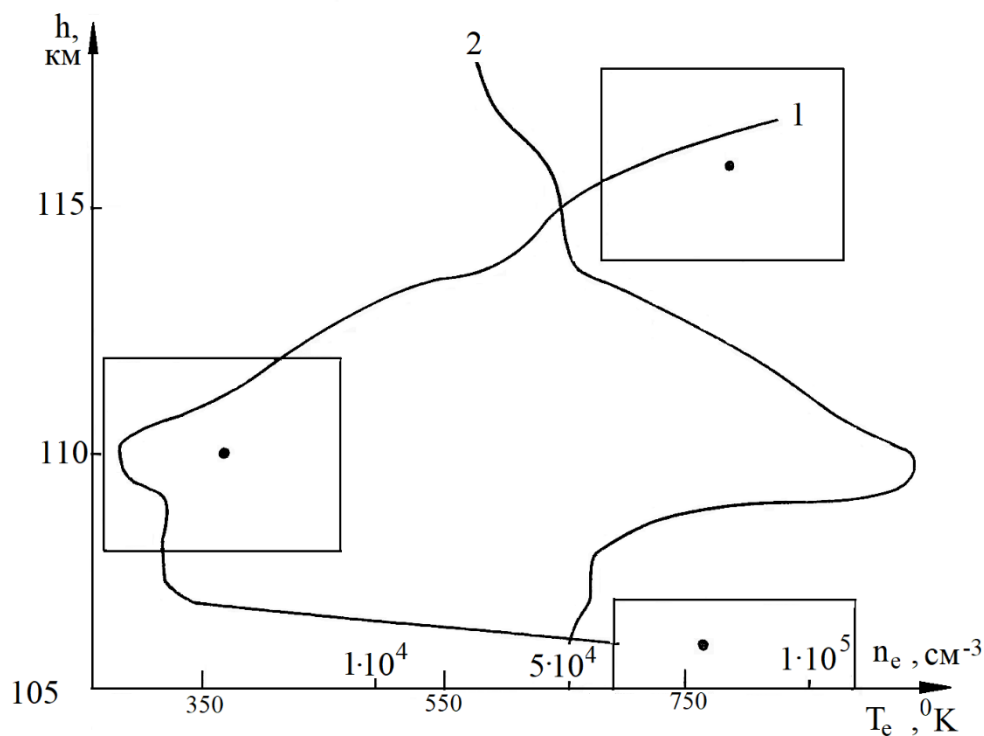


Рис. 5. – Результаты измерений профиля $T_e(h)$ и профиля электронной температуры, рассчитанного из уравнения (1) для того же спорадического слоя.

В эксперименте было получено всего три значения T_e в окрестностях спорадического слоя и в самом слое. Теоретическая кривая удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента.

В [6, 7, 8] было, в частности, показано, что приток тепла к электронному газу от фотоэлектронов зависит от электронной концентрации. Использование этой зависимости позволяет хотя бы отчасти учесть высотные вариации Q_e при расчете температуры электронов в спорадическом слое E. Нами были рассчитаны два профиля $T_e(h)$ для слоя, для двух случаев $Q_e = 1,5 \cdot 10^4 (n_e/n_o)^2 \text{ эВ/см}^3 \text{ с}^{-1}$ и $Q_e = 2,25 \cdot 10^4 (n_e/n_o)^2 \text{ эВ/см}^3 \text{ с}^{-1}$. Потери энергии тепловыми электронами определялись с учетом процессов описанных в [9–12].

Для обоих случаев, как и для постоянного в пределах слоя Q_e , получено падение электронной температуры на высоте максимума электронной концентрации до 50 К.

Таким образом, по нашему мнению в спорадическом слое E имеет место тенденция к уменьшения температуры электронов.

Литература

1. Шерстюков О.Н., Минуллин Р.Г., Акчурин А.Д., Назаренко В.И., Сапаев А.Л., Зыков Е.Ю. Влияние спорадического слоя E на распространение метровых и декаметровых радиоволн на коротких трассах // Геомагнетизм и аэрномия. 2000. 40. N 5. С. 69-74.
2. Омелянчук Е.В., Тихомиров А.В., Кривошеев А.В. Особенности проектирования систем связи миллиметрового диапазона радиоволн //Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1742/.
3. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Игнатьев Ю.А., Понятов А.А. Вертикальные движения в нижней ионосфере и спорадические слои //



Известия высших учебных заведений. Радиофизика. Нижний Новгород: Научно-исследовательский радиофизический институт. 1999. 42. №1. С. 26-35.

4. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Каган Л.М., Понятов А.А., Толмачева А.В. Исследование атмосферы Земли методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы // Вестник РФФИ. 2007. № 3 (53). С. 8-35.

5. Ключева Н.М., Кривошеев Н.В., Часовитин Ю.К. Некоторые вопросы интерпретации результатов зондовых измерений температуры электронов в области E ионосферы // Труды института экспериментальной метеорологии ГУГМС. 1976. вып.5(62). С.84 -103.

6. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Кривошеев Н.В., Ларина Т.Н., Резников А.Е. Расчет притока тепла к электронному газу на высотах области E ионосферы Земли// Инженерный вестник Дона 2016, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3809/.

7. Bilitza D. Heatbalance of the ionosphere: implications for the international reference ionosphere. Adv. Space res. 1985-1986. № 10, pp. 123-130.

8. Khazanov G. V., Glocer A., Liemohn M. W., Himwich E. W. Superthermal electron energy interchange in the ionosphere-plasmasphere system. J. Geophys. Res. A. 2013. 118, N 2, pp. 925-934.

9. Moffett R.J. Rates of electron cooling in the upper atmosphere. Planet and space sci. 1988. 36, № 1, pp. 65-72.

10. Павлов А.В. Скорость охлаждения тепловых электронов при возбуждении колебательных уровней N(2) электронным ударом //Геомagnetизм и аэрономия. 1986. 26, №4, С. 669-670.

11. Павлов А. В. Колебательно- возбужденные N₂ и O₂ в верхней атмосфере (обзор) //Геомagnetизм и аэрономия. 2011. 51, N 2, С. 147-173.

12. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Кривошеев Н.В., Ларина Т.Н., Резников А.Е. Результаты расчета высотного профиля температуры электронов в области E ионосферы Земли //Инженерный вестник Дона, 2017, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4370/.

References

1. Sherstjukov O.N., Minullin R.G., Akchurin A.D., Nazarenko V.I., Sapaev A.L., Zikov E.Ju. Geomagnetizm i ajeronomija. 2000. 40. N 5. pp. 69-74.
2. Omel'janchuk E.V., Tihomirov A.V., Krivosheev A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1742/.
3. Bahmet'eva N.V., Belikovich V.V., Ignat'ev Ju.A., Ponjatov A.A. Nizhnij Novgorod: Nauchno-issledovatel'skij radiofizicheskij institute. 1999. 42. №1. pp. 26-35.
4. Bahmet'eva N.V., Belikovich V.V., Kagan L.M., Ponjatov A.A., Tolmacheva A.V. Vestnik RFFI. 2007. № 3 (53). pp. 8-35.
5. Kljueva N.M., Krivosheev N.V., Chasovitin Ju.K. Trudy instituta jeksperimental'noj meteorologii GUGMS. 1976. vyp.5 (62). pp.84 -103.
6. Volkomirskaja L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Larina T.N., Reznikov A.E. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3809/.
7. Bilitza D. Adv. Space res. 1985-1986. № 10, pp. 123-130.
8. Khazanov G. V., Glocer A., Liemohn M. W., Himwich E. W.J. Geophys. Res. A. 2013. 118, N 2, pp. 925-934.
9. Moffett R.J. Planet. and space sci. 1988. 36, № 1, pp. 65-72.
10. Pavlov A.V. Geomagnetizm i aeronomiya. 1986. 26, №4, pp. 669-670.
11. Pavlov A. V. Geomagnetizm i aeronomiya. 2011. 51, N 2, pp. 147-173.



12. Volkomirskaja L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Larina T.N., Reznikov A.E. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4370/.