

Результаты расчета высотного профиля температуры электронов в области E ионосферы Земли

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

А.Е. Резников¹

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

² *Донской государственной технической университет*

Аннотация: Рассмотрена методика расчета высотного профиля температуры электронов в области E ионосферы Земли. Приведены примеры расчета профиля электронной температуры на высотах 100 - 170 км в зависимости от зенитного угла Солнца. Обсуждаются проблемы теплового баланса ионосферных электронов в области E.

Ключевые слова: ионосфера, температура электронов, концентрация, тепловой баланс, скорость нагрева, солнечное излучение, соударения электронов, высотный профиль температуры, зондовые измерения.

Проектирования средств связи возможно при надежном прогнозе условий распространения волн в различных диапазонах [1]. Для моделирования ионосферного распространения радиоволн необходимо задать надежные пространственные распределения электронной концентрации, расчет которых, в свою очередь, требует использования достоверных моделей нейтральной атмосферы, а также температурного режима как ионизированной, так и нейтральной составляющих. Поэтому расчет высотных профилей температуры электронов в ионосфере является актуальной задачей.

В условиях области E ионосферы теплопроводностью электронного газа можно пренебречь, и для стационарного случая использовать уравнение теплового баланса для электронов в виде:

$$Q = L. \quad (1)$$

Здесь $Q = Q_1 + Q_2$. Q_1 – скорость нагрева единицы объема электронного газа фотоэлектронами [2,3]. Q_2 – скорость нагрева излучением

в континиуме Шумана-Рунге. В процессе диссоциации молекулярного кислорода под действием солнечного излучения с длиной волны $1350-1750 \text{ \AA}$ возможно образование одного из атомов в возбужденном состоянии, что приводит к передаче энергии тепловым электронам. [4,5]. Такие источники как нагревание электронного газа за счет тушения метастабильных ионов, образующихся при фотоионизации нейтральных составляющих атмосферы, за счет выделения энергии в результате реакций диссоциативной рекомбинации и за счет наличия электрического поля являются второстепенными [4,5].

Правая часть уравнения (1) представляет собой суммарную скорость потерь тепла единицей объема электронного газа в процессе упругого и неупругого взаимодействия с нейтральными молекулами и положительными ионами.

Наиболее существенным фактором, определяющим перенос энергии от тепловых электронов к нейтральным частицам, являются неупругие соударения, в которых электроны теряют энергию за счет возбуждения внутренних степеней свободы нейтралов. К числу таких процессов, играющих более или менее важную роль в охлаждении электронного газа в ионосфере, относятся: вращательное и колебательное возбуждение молекулярного кислорода и азота, возбуждение тонкой структуры атомарного азота. Тепловые электроны также теряют энергию при упругих взаимодействиях с молекулярным и атомарным кислородом и молекулярным азотом. Имеют место потери энергии и при упругих соударениях с положительными ионами [6-9].

Таким образом, расчет температуры электронов T_e сводится к решению уравнения (1).

Нами была рассчитана скорость нагрева электронного газа фотоэлектронами Q_1 . Результаты расчета для трех случаев представлены на рисунках 1–3. Здесь же приведены профили Q_2 –скорости нагрева ионосферных электронов излучением в континиуме Шумана-Рунге. Расчеты проводились для значений зенитного угла Солнца 70, 77, и 86 градусов соответственно и среднего уровня солнечной активности. При расчетах использовалась модель нейтральной атмосферы CIRA.

Результаты расчетов, представленные на рисунках 1–3, показывают, что в зависимости от зенитного угла Солнца основным источником нагрева электронного газа на высотах области E ионосферы может быть, как Q_1 , так и Q_2 . Следовательно, во всех случаях расчета теплового баланса ионосферных электронов на этих высотах необходимо учитывать оба эти источника тепла.

В первом и втором случае основную роль в нагреве электронов играет Q_1 , в то время, как величина Q_2 по отношению к общему притоку тепла $Q = Q_1 + Q_2$ составляет не более 25%.

В то же время в третьем случае нагрев электронов на высотах менее 150 км происходит, главным образом, за счет излучения Шумана-Рунге. На высотах более 150 км значения Q_2 также достаточно велики. Так на высоте 170 км отношение Q_2 к Q_1 составляет более 30%. Таким образом можно с уверенностью утверждать, что оба источника нагрева электронного газа должны быть учтены при решении уравнения теплового баланса.

Профили Q_1 обнаруживают следующие особенности. В диапазоне высот от 100 до 170 км наблюдается монотонное увеличение Q_1 . С возрастанием зенитного угла Солнца рост Q_1 с высотой становится все более резким.

Считается, что результаты теоретического расчета дают значения Q_1 с точностью до фактора 1,5, поскольку именно такова точность при задании

сечений ионизации и поглощения [3]. При увеличении зенитного угла Солнца и уменьшении высоты в спектре первичных фотоэлектронов все заметнее возрастает относительное содержание частиц с большими энергиями, способных производить вторичную ионизацию нейтральных молекул. Эффект наличия вторичных электронов учитывался нами в работах [2,3] откуда следует, что на малых высотах при больших значениях зенитного угла Солнца ошибка при расчете Q_1 наиболее существенна. Графики на рисунках 1 – 3 позволяют проследить уменьшение Q_1 с ростом зенитного угла на фиксированных высотах.

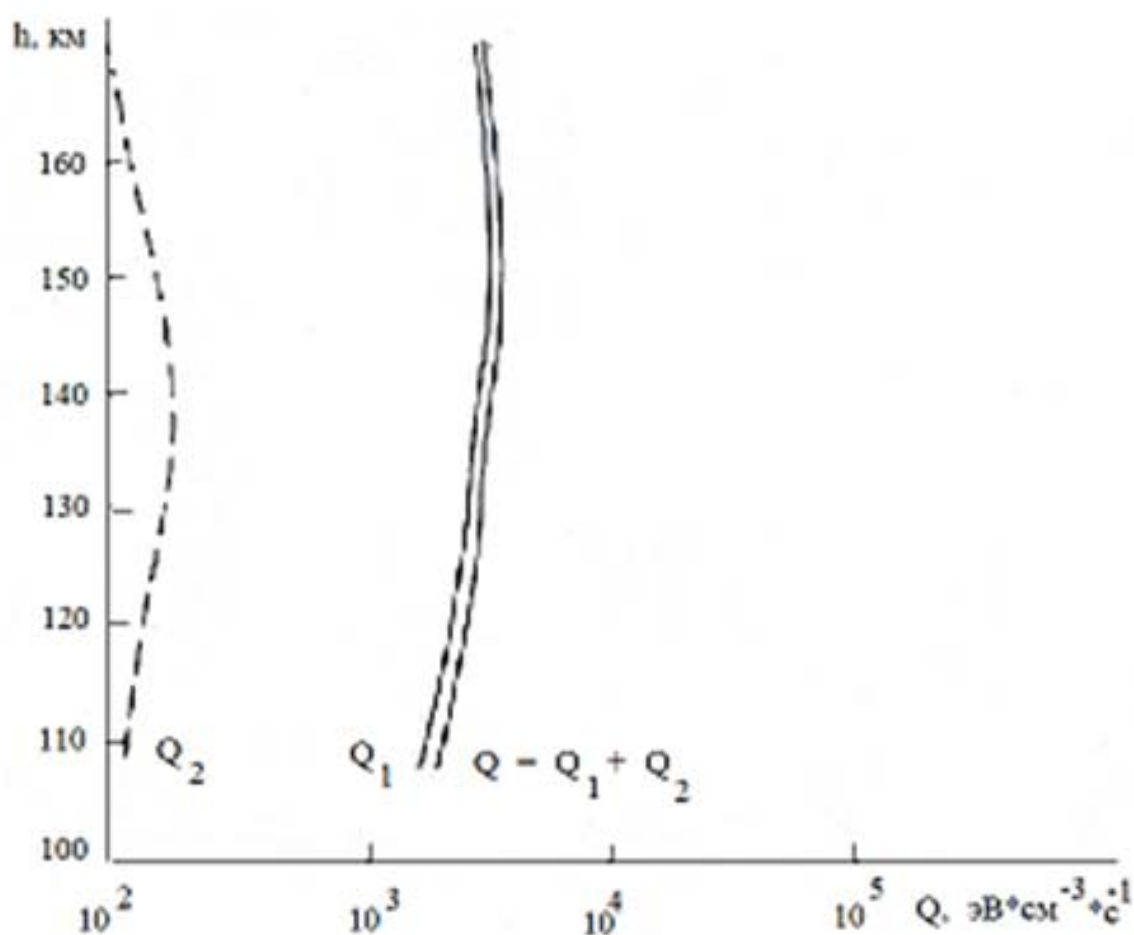


Рис. 1. – Высотные профили Q , зенитный угол $\chi = 70^\circ$.

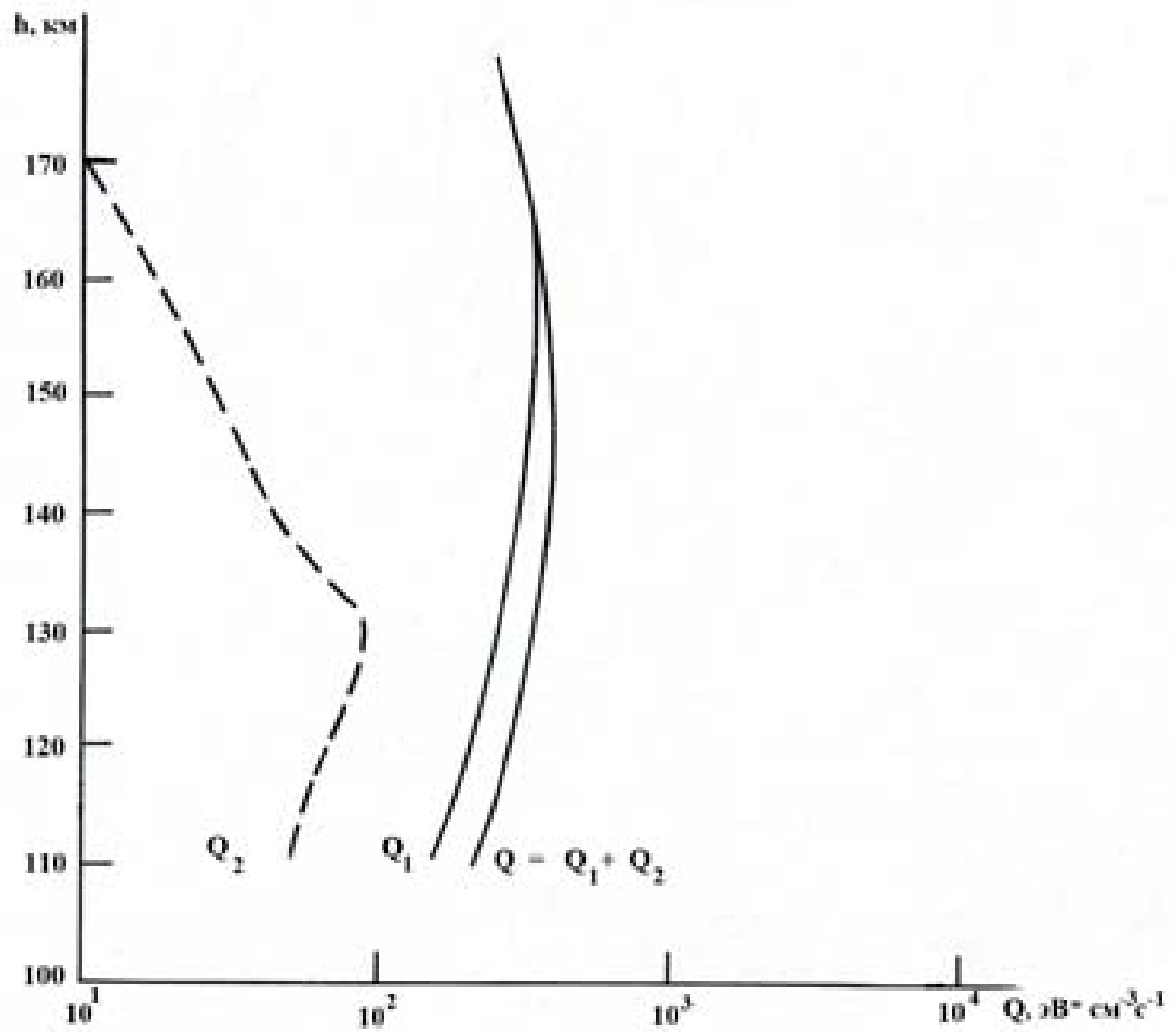


Рис. 2. – Высотные профили Q , зенитный угол $\chi = 77^\circ$.

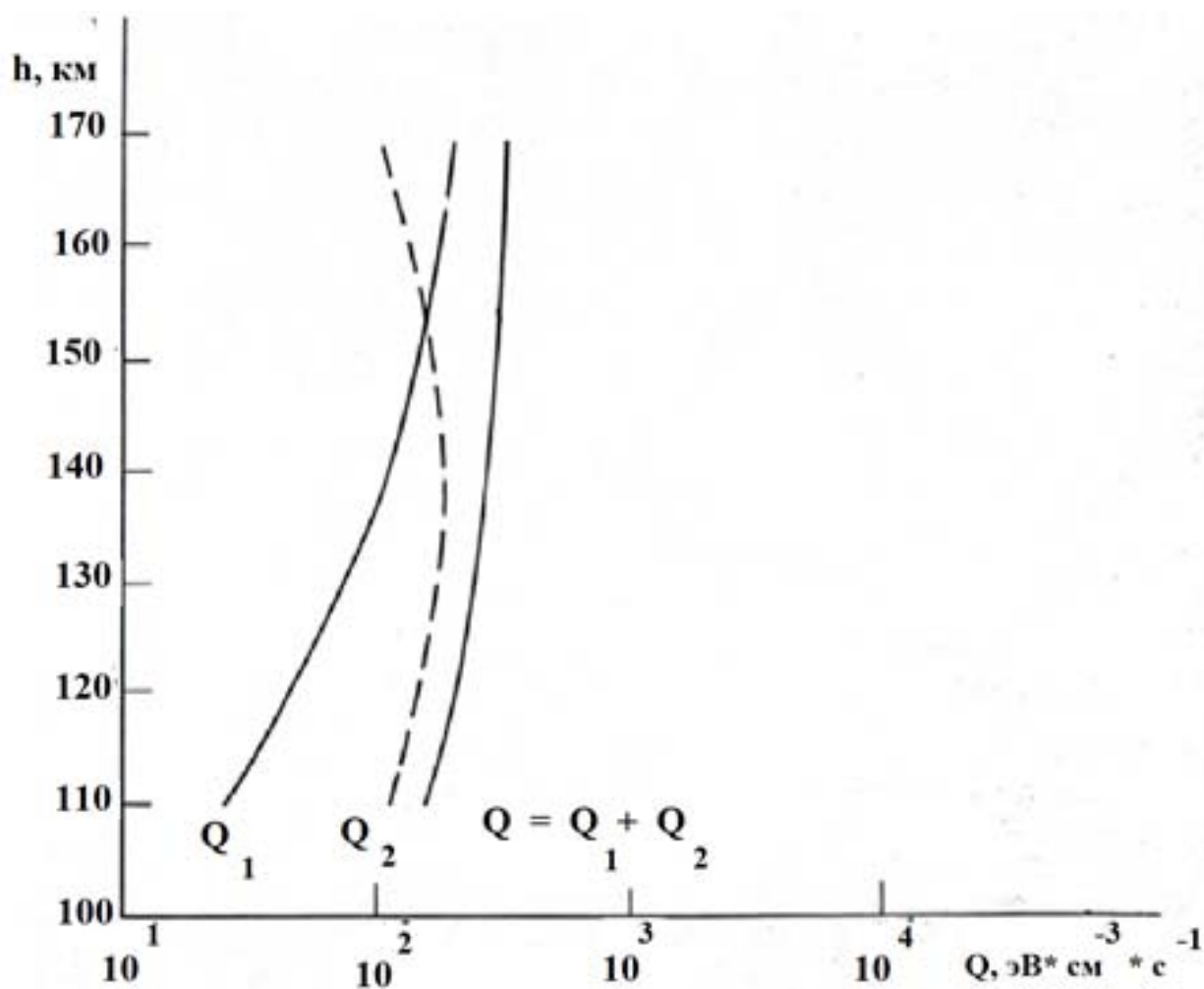


Рис. 3. – Высотные профили Q , зенитный угол $\chi = 86^\circ$.

Имея рассчитанные профили Q и учитывая перенос энергии от электронов к нейтральным частицам атмосферы, нами были рассчитаны профили температуры электронов для указанных выше зенитных углов Солнца. Результаты расчетов представлены на рисунках 4–6. Здесь же представлены высотные профили температуры нейтральных частиц T_n

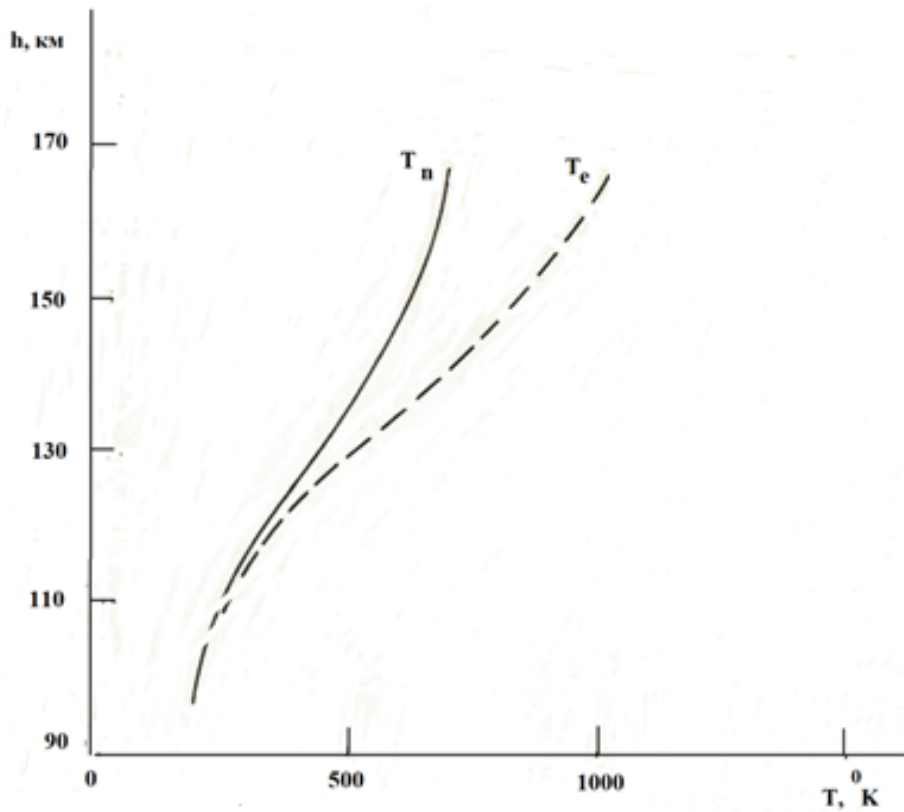


Рис. 4. – Профили температуры электронов T_e и нейтральных частиц T_n для зенитного угла Солнца $\chi = 70^\circ$.

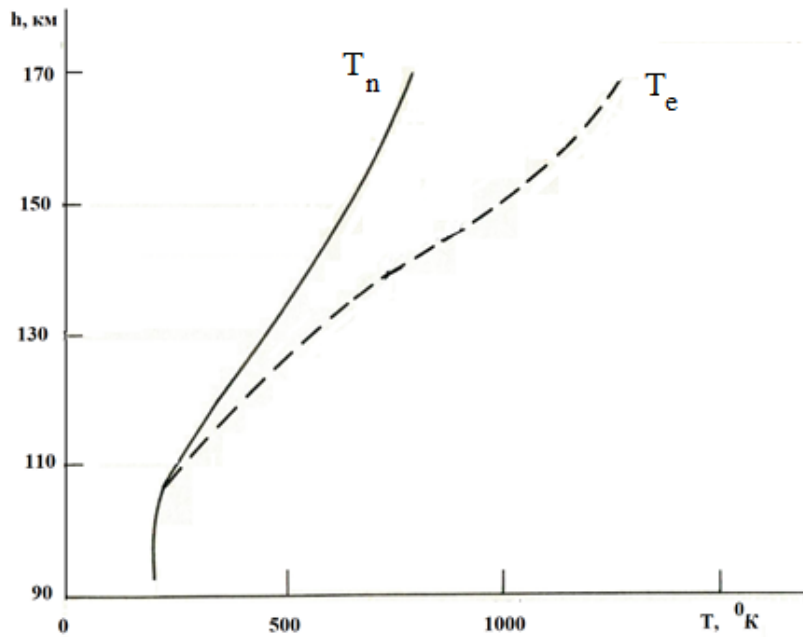


Рис. 5. – Профили температуры электронов T_e и нейтральных частиц T_n для зенитного угла Солнца $\chi = 77^\circ$.

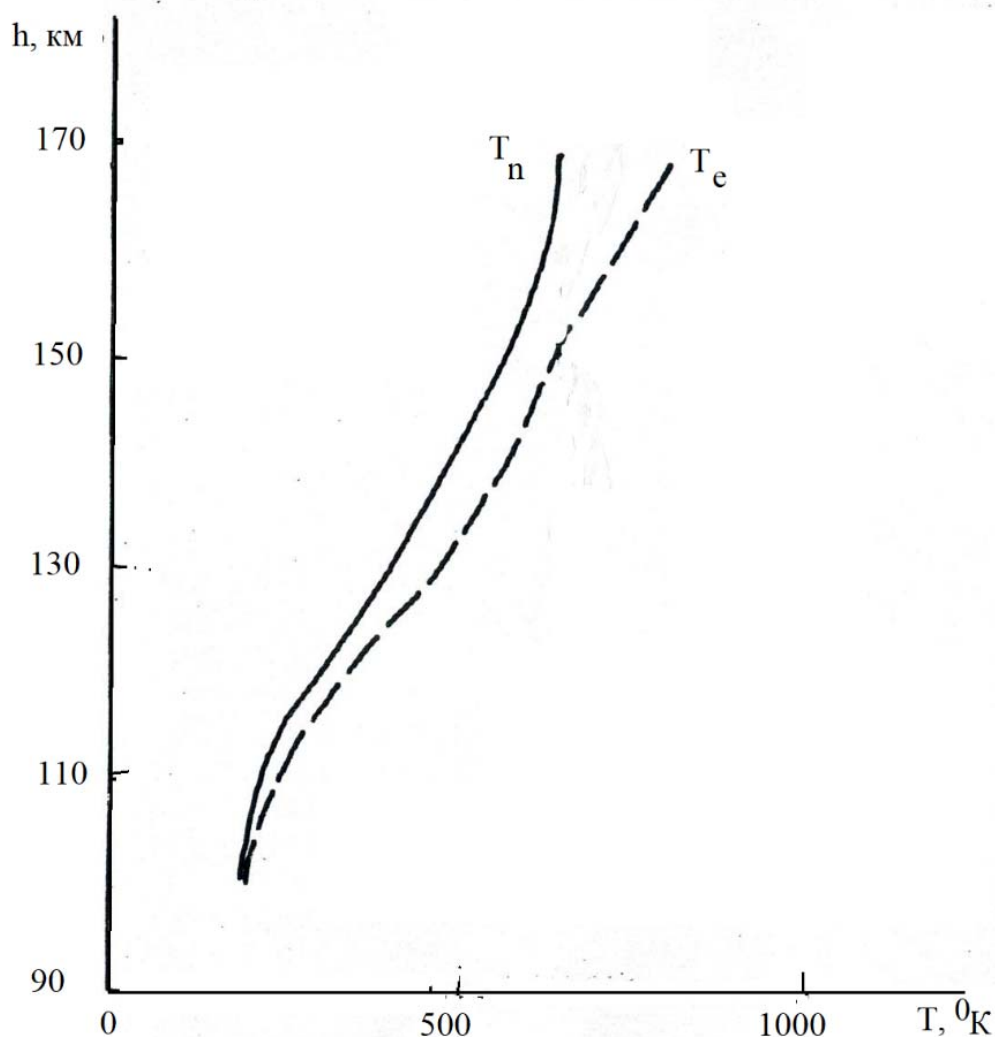


Рис. 6. Профили температуры электронов T_e и нейтральных частиц T_n для зенитного угла Солнца $\chi = 86^\circ$.

Из полученных результатов видно, что температура электронов монотонно возрастает с высотой. Температура электронов выше 140 км заметно превышает температуру нейтральных частиц.

При расчетах были использованы экспериментальные профили электронной концентрации, полученные с помощью высокочастотного импедансного зонда для данных условий из [10].

Важной и давней проблемой теплового баланса E области ионосферы является тот факт, что результаты измерения температуры электронов с помощью зондов, поднимаемых на ракетах, систематически дают более высокие значения T_e , чем результаты расчетов из уравнения теплового баланса. Зондовая температура электронов, как правило, превышает температуру, измеренную методом некогерентного рассеяния радиоволн, которая стремится к температуре нейтральных частиц на высотах менее 130-140 км. Косвенные расчеты T_e , например по результатам измерения поглощения радиоволн методом A_1 и A_2 , также дают $T < T_e$ [11,12].

Литература

1. 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/.
2. Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Кривошеев Н.В., Ларина Т.Н., Резников А.Е. Метод расчета спектров фотоэлектронов в ионосфере // Инженерный вестник Дона 2016, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3809/.
3. 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/n2y2017/4107/.
4. Bilitza D. Heatbalance of the ionosphere: implications for the international reference ionosphere. Adv. Space res. 1985-1986. № 10, pp. 123-130.
5. 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.

6. Moffett R.J. Rates of electron cooling in the upper atmosphere. Planet. and space sci. 1988. 36, № 1, pp. 65-72.
7. Павлов А.В. Скорость охлаждения тепловых электронов при возбуждении колебательных уровней N(2) электронным ударом // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. 26, №4, С. 669-670.
8. Павлов А. В. Колебательно- возбужденные N₂ и O₂ в верхней атмосфере (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. 51, N 2, С. 147-173.
9. Павлов А. В., Павлова Н. М., Макаренко С. Ф. Изучение теплового баланса ионосферы и плазмосферы средних широт по данным станции "Миллстоун-Хилл" с 14 по 17 января 1986 г.// Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. 44, N 2, С. 204-215.
10. 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. 5, №62, С. 113-124.
11. Oyama Kohichiro (Institute of Space & Astronautical Science, 3-1-1, Yoshinodai, Sagamihara, Japan) Insitu measurements of T_e in the lower ionosphere - a review. Adv. Space Res. 2000. 26, N 8, pp. 1231-1240.
12. Oyama Kohichiro Langmuir probe measurements in the ionosphere and contemporary issues. JAXA Spec. Publ., 2005(2006), N 20, pp. 3-19.

References

1. Omel'yanchuk E.V., Tikhomirov A.V., Krivosheev A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1742/.
 2. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Larina T.N., Reznikov A.E. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), Dona 2016, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3809/.
-



3. Volkomirskaya L.B., Gulevich O.A., Krivosheev N.V., Larina T.N., Reznikov A.E. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4107/.
4. Bilitza D. Adv. Space res. 1985-1986. № 10, pp. 123-130.
5. Khazanov G. V., Glocer A., Liemohn M. W., Himwich E. W.J. Geophys. Res. A. 2013. 118, N 2, pp. 925-934.
6. Moffett R.J. Planet. and space sci. 1988. 36, № 1, pp. 65-72.
7. Pavlov A.V. Geomagnetizm i aeronomiya. 1986. 26, №4, pp. 669-670.
8. Pavlov A. V. Geomagnetizm i aeronomiya. 2011. 51, N 2, pp. 147-173.
9. Pavlov A. V., Pavlova N. M., Makarenko S. F. Geomagnetizm i aeronomiya. 2004. 44, N 2, pp. 204-215.
10. Klyueva N.M., Krivosheev N.V., Chasovitin Yu.K., Trudy instituta eksperimental'noy meteorologii, GUGMS. 1976. 5, №62, pp. 113-124.
11. Oyama Kohichiro Adv. Space Res. 2000. 26, N 8, pp. 1231-1240.
12. Oyama Kohichiro JAXA Spec. Publ. 2005(2006), № 20, pp. 3-19.