Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 2. (2008) 261–263

УДК 550.388; 537.525.1; 550.383.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

В.Ф. Губский

THE MAGNETIC FIELD EFFECT ON MEASUREMENTS OF ELECTRON DENSITY AND TEMPERATURE BY CYLINDRICAL PROBES IN THE EARTH IONOSPHERE

V.F. Gubsky

Цилиндрические зонды Ленгмюра, благодаря их относительной простоте изготовления, использовались в 1960–1970 гг. в СССР как на спутниках («Космос-378», «Интеркосмос-2, -4, -8, -10, -19»), так и в экспериментах при вертикальных пусках ракет по программе «Интеркосмос» («Вертикаль-4, -6, -10») для измерений концентрации и температуры электронов. Первоначально измерения проводились на средних широтах. С увеличением наклонения орбиты запускаемых спутников (спутники не имели стабилизации) иногда на зондовых характеристиках наблюдались падающие участки в области электронного тока насыщения. В 1981 г. был запущен стабилизированный по трем осям спутник «Интеркосмос-Болгария-1300» с цилиндрическим зондом, продольная ось которого была постоянно ориентирована вниз на Землю. Только после его запуска стало возможным сделать определенные выводы относительно влияния величины магнитного поля Земли на форму зондовой характеристики и, как следствие, на определение электронной концентрации и температуры. Приведены примеры зондовых характеристик с падающими участками. Проведено сравнение с подобными измерениями в лабораторной плазме. Показано, что появление отрицательных участков на зондовых характеристиках является результатом влияния магнитного поля Земли и степень такого влияния зависит также от величины концентрации и температуры электронов и величины напряжения на зонде.

In 1960–70, cylindrical Langmuir probes were applied due to relative simplicity in their production. They were used in the USSR both at satellites (Cosmos-378, Intercosmos-2, -4, -8, 10, -19) and in experiments in vertical launches of rockets using the program Intercosmos (Vertical-4, -6, -10) for measurements of electron density and temperature. First these measurements were made in the middle latitudes. With increasing inclination of an orbit of launched satellites (satellites had no stabilization), falling sections could sometimes be observed on probe characteristics in the saturation current region. The satellite Intercosmos-Bulgaria-1300 stabilized along three axes was launched in 1981. It had a cylindrical probe, the longitudinal axis of which was constantly oriented down to the Earth. This satellite allowed definite conclusions concerning the geomagnetic field effect on a probe characteristic form and hence on determination of electron density and temperature. Examples are given of probe characteristics with falling sections. These measurements are compared with those performed in the laboratory plasma. Appearance of negative sections on probe characteristics is shown to be due to the geomagnetic field effect. The degree of this effect depends both on the electron density and temperature and on the voltage across the probe.

Введение

Первые эксперименты с определением локальной концентрации и температуры электронов с помощью цилиндрических зондов Ленгмюра были проведены в СССР на спутниках «Интеркосмос-2» (дата выведения на орбиту 25.12.1969) и «Интеркосмос-4» (14.10.1970), имевших наклонение орбиты 48°. После запуска спутника «Космос-378» (17.11.1970) с наклонением орбиты 74° иногда наблюдались искажения классической формы зондовой характеристики (зависимость величины тока, собираемого зондом, от напряжения, подаваемого на зонд). Эти искажения проявлялись в форме уменьшения величины токов, собираемых зондом, при увеличении напряжения на зонде (отрицательные характеристики) в области потенциала на зонде немного выше потенциала плазмы. При дальнейшем увеличении напряжения на зонде форма характеристики в зависимости от величины достижимого увеличения обычно возвращалась к положительной. После сделанного предположения о возможном воздействии магнитного поля Земли на величину собираемых зондом токов было решено уменьшить диаметр применяемого цилиндрического зонда с 6 до 1 мм с целью увеличения отношения ларморовского радиуса электронов к радиусу зонда. После запуска спутника «Интеркосмос-10» (30.10.1973, наклонение орбиты 74°), на котором был установлен такой зонд, отрицательные характеристики наблюдались реже. Только после запуска спутника «Интеркосмос-Болгария-1300» (07.08.1981, наклонение орбиты 81.2°), имевшего ориентацию по трем осям с точностью ±1°, представилась возможность перейти от предположений к количественным оценкам. На этом спутнике для определенности ориентации продольная ось цилиндрического зонда всегда была направлена вертикально вниз на Землю и в области магнитных полюсов ориентирована примерно вдоль вектора магнитного поля Земли.

Примеры отрицательных участков на зондовых характеристиках и обсуждение

На рис. 1 показаны зондовые характеристики, имеющие отрицательные участки различной глубины, зарегистрированные на спутниках «Космос-378» (К378), «Интеркосмос-10» (ІС-10) и «Интеркосмос-Болгария-1300» (ІСВ-1300).

На рис. 2, *а*, *б* на нижних панелях для двух орбит спутника ІСВ-1300, проходящих в районе Северного магнитного полюса, представлены телеметрические записи зондовых характеристик с отрицательными участками в районе насыщения электронных токов. На верхних панелях показаны величины концентрации положительных ионов, измеренные одновременно сферической ловушкой положительных ионов, установленной на том же спутнике.

Стрелкой отмечено время записи зондовых характеристик. Для орбиты 1565 во время приведенной записи зондовых характеристик концентрация ионосферной плазмы составляла примерно $5\cdot10^3$ см$^{-3}$, нап-

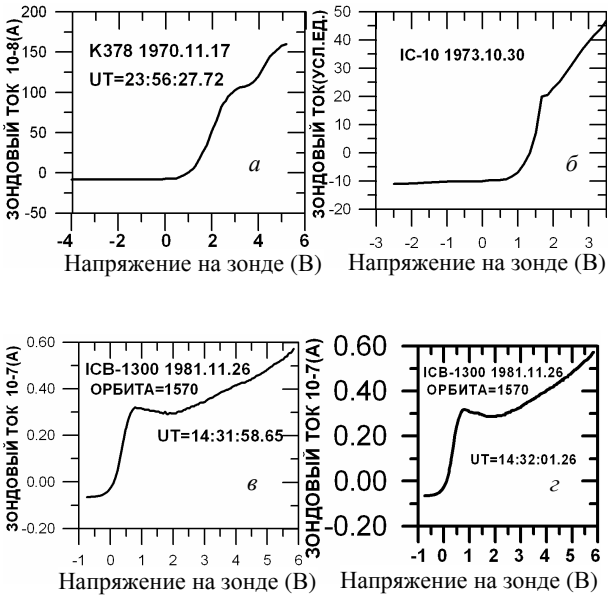

Рис. 1. Примеры зондовых характеристик цилиндрического зонда Ленгмюра с отрицательными участками в районе насыщения электронных токов, полученные на спутниках «Космос-378» (К378) (*а*), «Интеркосмос-10» (IC-10) (*б*), «Интеркосмос-Болгария-1300» (ICB-1300) (*в*, *г*).

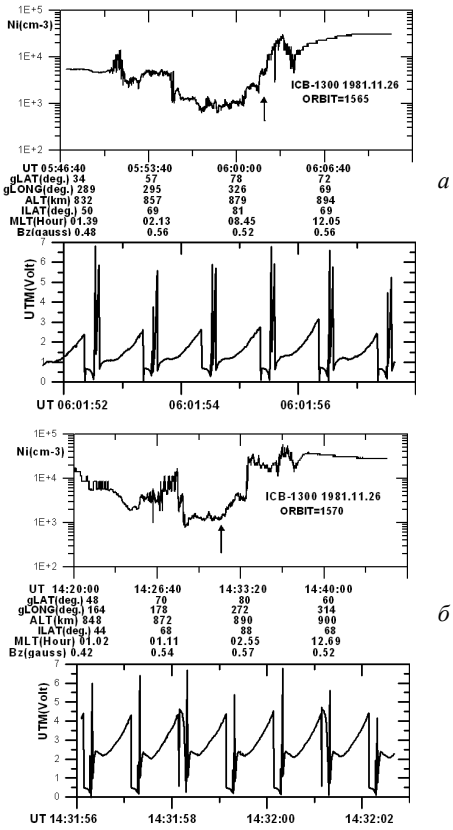

Рис. 2. Орбиты 1565 (*а*), 1570 (*б*). На нижних панелях показаны исходные телеметрические записи зондовых характеристик с отрицательными участками в районе насыщения электронных токов. Верхние панели – одновременные измерения концентрации положительных ионов. Стрелками указаны времена для приведенных последовательностей зондовых характеристик.

ряженность магнитного поля для вертикальной составляющей $B_z = 0.53$ Гс; для орбиты 1570 соответственно 10^3 см$^{-3}$ и $B_z = 0.56$ Гс.

На записях зондовых характеристик в области насыщения ионных токов не было отмечено подобного влияния магнитного поля. Также не было отмечено этого влияния на область торможения электронных токов.

При измерениях с помощью вертикальных пусков ракет в 70-х гг. до высот 1800 км в районе 51 °N применялись такие же цилиндрические зонды диаметром 1 мм. В рабочем положении зонды устанавливались горизонтально относительно поверхности Земли. Не было отмечено каких-либо признаков отрицательных участков на зондовых характеристиках.

В работе [1] проведен анализ образования отрицательных участков на зондовых характеристиках цилиндрического зонда, продольная ось которого ориентирована вдоль магнитного поля. На рис. 3, *а*, *б* показаны полученные зондовые характеристики для значений a = 1.0 и a = 10.0 соответственно, где $a = \alpha\xi / 2\sqrt{2}$, $\alpha = \omega_c/\omega_p$, $\xi = r_p/\lambda_d$, r_p – радиус зонда, λ_d – радиус Дебая, ω_c – угловая циклотронная частота электронов, ω_p – угловая плазменная частота электронов. Проведенные эксперименты в газоразрядной плазме показали, что отрицательные участки на зондовых характеристиках появляются, начиная с $a = 0.8$.

С увеличением α нижний уровень отрицательного участка понижается. Для значений $\alpha \geq 1.0$ максимальное значение тока соответствует потенциалу плазмы. Для больших потенциалов на зонде влияние магнитного поля мало.

В работе [2] показано, что для магнитного поля B=0.6 Гс и потенциала на зонде $V_p \geq 0.1$ В участок торможения электронов в полулогарифмическом масштабе остается прямолинейным, что указывает на отсутствие влияния магнитного поля. Поэтому температура электронов может вычисляться по измерениям на этом участке обычным методом.

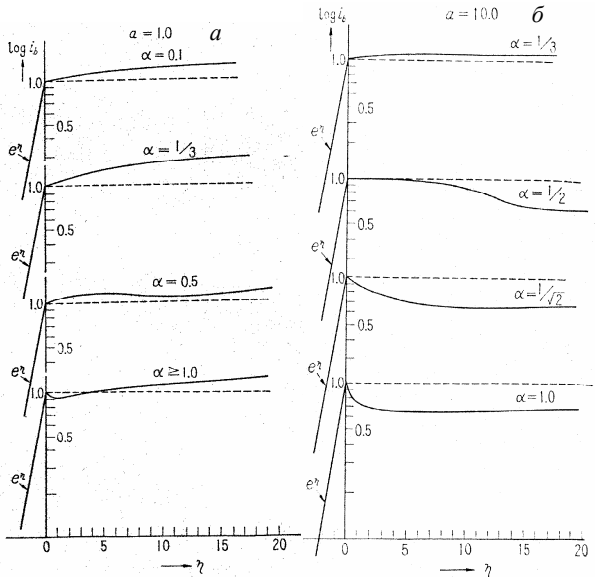

Рис. 3. Влияние продольного магнитного поля на зондовые характеристики цилиндрического зонда, согласно [1]: a = 1.0 (*а*); a = 10.0 (*б*). Здесь $\eta = eV_p/kT_e$, где e – заряд электрона, V_p – потенциал на зонде относительно потенциала плазмы, k – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура.

В [3, 4] исследуется влияние магнитного поля на собирание токов цилиндрическими зондами. Так, в [4] указывается на влияние ориентации зонда относительно направления магнитного поля и отмечается, что влияние магнитного поля на собирание электронов происходит даже в том случае, когда ларморовский радиус электронов больше радиуса зонда. Существенное влияние магнитного поля происходит, когда размер области пространственного заряда вокруг зонда сравним или больше ларморовского радиуса электронов. Делается вывод о том, что в ионосфере магнитное поле величиной 0.25 Гс может влиять в такой же степени, как поле 30 кГс в горячей и плотной плазме.

Заключение

Магнитное поле Земли является основной причиной образования отрицательных участков на зондовых характеристиках в области насыщения электронных токов. Отрицательные участки на зондовых характеристиках наблюдались при величинах концентрации электронов порядка 10^3 см$^{-3}$ и напряженности вертикальной составляющей магнитного поля $B_z \geq 0.5$ Гс.

Неоднородности концентрации ионосферной плазмы проявляются нерегулярным образом на всех участках зондовых характеристик. Вычисление концентрации электронов при наличии отрицательных участков на зондовых характеристиках невозможно по данным зондовых измерений на участке насыщения электронов. Концентрацию электронов в таком случае следует определять по измерениям при потенциале плазмы, точность определения которого возрастает при наличии отрицательных участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dote T., Amemiya H. Analysis of the negative characteristic of a cylindrical probe in a magnetic field // J. Phys. Soc. Japan. 1967. V. 22, N 1. P. 270–276.
2. Dote T., Amemiya H., Ichimiya T. Effect of the geomagnetic field on an ionospheric sounding probe // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 9. P. 2258–2261.
3. Laframboise J.G., Rubinstein J. Theory of a cylindrical probe in a collisionless magnetoplasma // Phys. Fluids. 1976. V. 19, N 12. P. 1900–1908.
4. Szuszczewicz E.P., Takas P. Magnetosheath effects on a cylindrical Langmuir probes // Phys. Fluids. 1979. V. 22, N 12. P. 2424–2429.

Институт космических исследований РАН, Москва