

Том II, с. 71–74

УДК: 550.3 + 530.182 + 533.951

## АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛОМ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

А. О. Рябов<sup>1</sup>, В. Л. Фролов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Б.-Печерская 25/12а, НИРФИ ННГУ

E-mail: RyabovAIOI@yandex.ru

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

**Аннотация.** Обсуждается связь между потенциалом корпуса искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. Анализируется выражение для потенциала спутника; указываются недостатки и ограничения представленного теоретического расчета. Рассматриваются экспериментальные результаты, выполненные по программе СУРА-DEMETER, на основании которых разбираются три случая: 1) при включенном наземном передатчике, возмущающем ионосферу, и наличии искусственных ионосферных неоднородностей; 2) при включенном наземном передатчике и отсутствии искусственных ионосферных неоднородностей; 3) при выключенном наземном передатчике, когда нет искусственного возбуждения верхней ионосферы. Анализируется, в каких ситуациях связь между потенциалом корпуса спутника и температурой электронов наибольшая.

**Ключевые слова:** ионосфера, температура электронов, потенциал искусственного спутника Земли

## ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN ARTIFICIAL EARTH SATELLITE POTENTIAL AND ELECTRON TEMPERATURE IN THE UPPER IONOSPHERE

A. O. Ryabov, V. L. Frolov

**Abstract.** The relationship between the potential of artificial earth satellite and the electron temperature in the upper ionosphere is discussed. The expression for the satellite potential is analyzed; the disadvantages and limitations of the theoretical calculation are indicated. The experimental results obtained by the SURA-DEMETER program are considered, on the basis of which three cases are analyzed: 1) with the working ground transmitter perturbing the ionosphere, and the presence of artificial ionospheric inhomogeneities; 2) with the working ground transmitter and no artificial ionospheric inhomogeneities; 3) with the ground transmitter off, when there is no artificial excitation of the upper ionosphere. It is analyzed in which situations the relationship between the potential of the satellite body and the electron temperature is greatest.

**Keywords:** ionosphere, electron temperature, artificial earth satellite potential

### Введение

В настоящее время натурные эксперименты являются одним из актуальных способов изучения плазменных явлений в ионосфере [1–3]. Наиболее эффективным методом исследования верхней ионосферы является использование искусственных спутников Земли (ИСЗ), предназначенных для научных целей [2–5]. Наиболее интересны эксперименты, в рамках которых проводится стимуляция ионосферы радиокomплексами, расположенными на Земле.

Одной из актуальных задач в исследованиях ионосферы Земли является изучение искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), наблюдаемых в  $F_2$ -слое. Условия возникновения этих неоднородностей и их ранжирование по размеру исследовалась во многих работах [1, 6]. Главными инструментами для исследования данных явлений представляются значения плотности  $N_e$  и температуры электронов  $T_e$ . В наиболее результативных случаях ИИН хорошо детектируются и на графиках плотности электронов, и на графиках температуры электронов [5]. Однако

в общем случае слабые неоднородности невозможно достоверно идентифицировать по плотности электронов, и единственным инструментом остается электронная температура.

Отличительной особенностью современных ленгмюровских зондов, расположенных на ИСЗ, является возбуждение достаточно больших шумов при измерении температуры электронов, которые не сглаживаются даже программными методами. В то же время бортовая аппаратура многих спутников Земли позволяет получать значения потенциалов корпусов ИСЗ  $U_s$ , и эти данные характеризуются значительно меньшим уровнем шума, чем для электронной температуры. В работе [5] была зарегистрирована прямая взаимосвязь между температурой электронов и потенциалом ИСЗ. Интересной особенностью являлась практически полная антикорреляция этих величин в областях ИИН, когда с ростом  $T_e$  потенциал  $U_s$  уменьшался. Настоящая работа посвящена более детальному анализу данной закономерности.

### Теоретические представления о связи между температурой электронов и потенциалом спутника

В случае спутника ионы и электроны в основном захватываются передней частью поверхности спутника: ионы набегают спереди на спутник из-за большей скорости его движения ( $V_0 \gg v_i$ , где  $V_0 \sim 8$  км/с – скорость движения спутника,  $v_i \sim 1$  км/с – скорость движения ионов), набегу же электронов сзади препятствует возникающая здесь область с высоким отрицательным потенциалом [7].

Поток электронов определяется выражением

$$j_e = N_0 \sqrt{\frac{KT_e}{2\pi m}} \exp\left(\frac{e\varphi_S}{KT_e}\right), \quad (1)$$

которое, в общем случае, верно для покоящегося тела, но оно верно и в нашем случае, так как скорость  $V_0$  мала по сравнению с тепловой скоростью электронов  $v_e = \sqrt{2KT_e/m}$  ( $v_e \sim 250$  км/с). В данном выражении  $N_0$  – невозмущенная концентрация электронов и ионов,  $K$  – постоянная Больцмана,  $m$  – масса электрона,  $\varphi_S$  – потенциал рассматриваемой точки поверхности тела,  $T_e$  – температура электронов.

В случае металлической поверхности спутника электрический потенциал поля на ней постоянен и равен  $U_s$ . Величина  $U_s$ , естественно, определяется из условия равенства полного тока на поверхность тела, т. е.

$$J_i = j_i dS = J_e = j_e dS, \quad (2)$$

где  $J_i$  и  $J_e$  – полный электронный и ионный ток.

Для сферического тела, используя (1) и (2), получаем при условии  $V_0 \gg \sqrt{2KT_i/M}$  следующее выражение для потенциала:

$$U_s = -\frac{KT_e}{e} \ln \left[ \sqrt{\frac{KT_e}{\pi m V_0^2} \frac{(1 - R_e)}{(1 - R_i)}} \right]. \quad (3)$$

Расчет выражения для потенциала спутника в общем случае затруднен его сложной формой. Таким образом, потенциал спутника будет зависеть от температуры электронов и коэффициентов отражения электронов и ионов. К сожалению,  $R_e$  и  $R_i$  находятся в сложной динамике, зависят от космической погоды и подвержены сильному влиянию нелинейных эффектов, из-за чего их расчет крайне затруднителен.

### Условия экспериментов

В данной работе используются результаты, полученные в период с 2005 по 2010 годы с помощью бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER (высота орбиты спутника была около 660 км). Описание работы стенда СУРА содержится в работе [6]. Стенд СУРА, как правило, включался на  $\sim 15$  мин за  $\sim 13$  мин до пролёта ИСЗ над стендом через возмущённую магнитную силовую трубку; этого времени было достаточно для развития плазменных возмущений до практически стационарного уровня не только в области отражения ВН, но и на высотах внешней ионосферы.

## Результаты экспериментов

В настоящей работе проанализированы результаты 22 сеансов в рамках программы СУРА-DEMETER, а также 10 контрольных сеансов вне рамок этой программы, но в эти же годы.

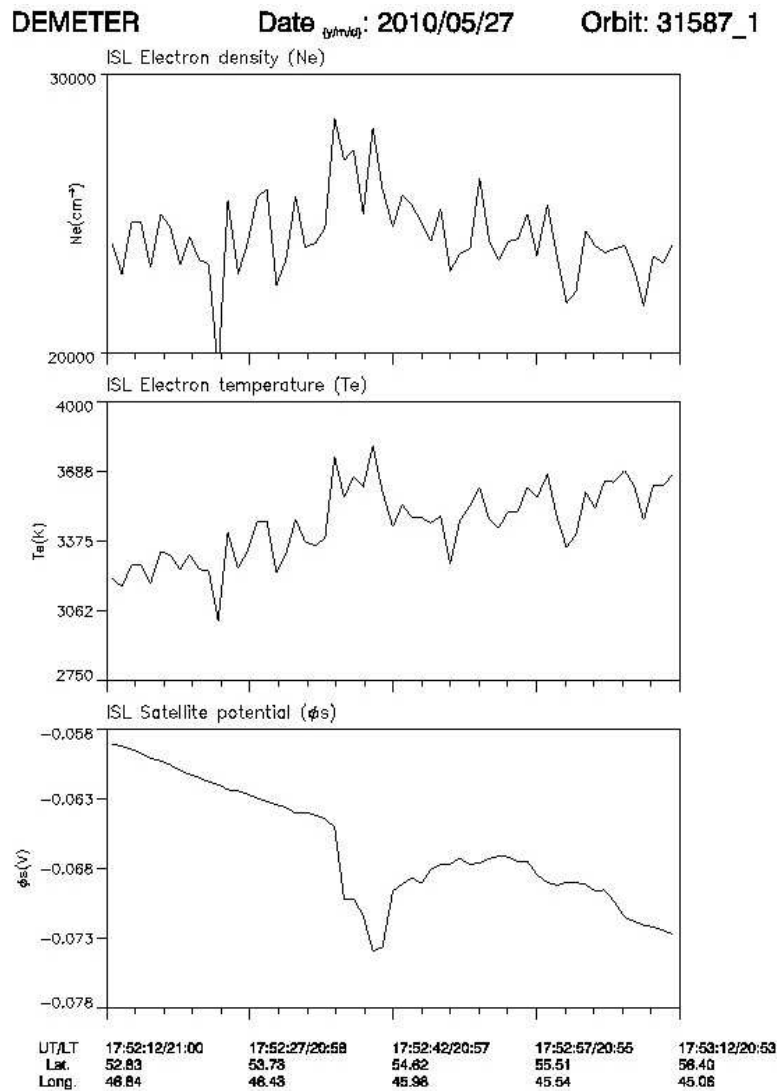


Рис. 1. Результаты измерений концентрации электронов  $N_e$ , температуры электронов  $T_e$  и потенциала корпуса ИСЗ  $U_s$ . 27 мая 2010 г.

В 9 рассматриваемых сеансах наблюдалось формирование ИИН [6]. Один из характерных случаев – сеанс за 27.05.2010 – представлен на Рис. 1. В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 17:35 до 17:50 UT на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4.785$  МГц ( $f_{0F2} \approx 5.3$  МГц) с мощностью  $P_{\text{эфф}} = 70$  МВт (наклон диаграммы направленности –  $12^\circ$  на юг; высота отражения – 250 км). Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 0.515 МГц ниже  $f_{0F2}$ . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях:  $\Sigma K_p = 4$ . Минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущённой магнитной силовой трубки составляло 27 км для  $T^* = 17:52:42$  UT. На верхней панели видно увеличение  $N_e$  на  $\sim 22\%$ , которое свидетельствует о формировании ИИН в возмущенной области; размер возмущенной области  $\sim 60$  км; вариации  $N_e \sim 17\%$ . На второй панели представлена временная зависимость температуры электронов, и в той же области, что и для  $N_e$ , наблюдается увеличение  $T_e$  на  $\sim 8\%$ . Для настоящей работы наиболее интересным представляется корреляция между  $T_e$  и  $-U_s$ , и для сеанса, результаты которого представлены на Рис. 1, коэффициент корреляции

между этими величинами равен 0.61. Средний коэффициент корреляции для 9 сеансов, в которых наблюдались ИИН, составил 0.63, что подтверждает высказанное выше предположение о заметной взаимосвязи между электронной температурой и потенциалом спутника. В 13 сеансах, проведенных по программе СУРА-DEMETER, ИИН не наблюдались. Средний коэффициент корреляции для этого типа сеансов равен 0.37. Кроме сеансов, выполненных по программе СУРА-DEMETER, были рассмотрены 10 сеансов пролетов ИСЗ при выключенном стенде для оценки фонового вклада в рассматриваемое явление. В этих случаях средний коэффициент корреляции равен 0.18.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что взаимосвязь между температурой электронов и потенциалом спутника наиболее заметна в случае наличия ИИН. В противном же случае эта связь значительно меньше.

### Заключение

В рамках настоящей работы была проанализирована связь между потенциалом спутника и температурой электронов. Выражение потенциала спутника (1) указывает на то, что  $U_s \sim T_e$ . Кроме того, из формулы (1) следует, что потенциал спутника зависит от коэффициентов отражения электронов и ионов. Таким образом, очевидно, что  $U_s$  зависит как от температуры электронов, так и от других характеристик.

Экспериментальные данные подтвердили аналитические выводы. В работе была продемонстрирована закономерность, что связь между отрицательным значением потенциала спутника DEMETER и электронной температурой наиболее заметна в области искусственных ионосферных неоднородностях. В дни, когда наземный стенд СУРА работал, но в ионосфере не удалось добиться формирования ИИН, степень рассматриваемой связи сильно снижалась. Кроме того, были проанализированы контрольные сеансы, когда стенд СУРА не был включен. В эти сеансы, коэффициент корреляции был еще ниже.

Помимо фундаментального значения представленных результатов, имеется еще их важное прикладное значение. В некоторых сеансах уровень шумов на графиках концентрации и температуры электронов слишком высок, что осложняет достоверное определение наличия ИИН. В таких ситуациях способом верификации наблюдаемых явлений может служить появление вариаций в значениях потенциала спутника.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 3.1844.2017/4.6). Исследования Рябова А.О. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 17-05-00475).

### Список литературы

1. Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением. // УФН, 2007. Т. 177. № 3. С. 330–340.
2. Ryabov A.O. Determination of the Ion Composition of the Outer Ionosphere from the Characteristics of ELF–VLF Waves Detected during the Operation of the Sura Facility. // Plasma Physics Reports, 2018, Vol. 44, No. 12, pp. 1140–1145.
3. Белов А.С., Марков Г.А., Рябов А.О., Парро М. Возмущение ионосферно-магнитосферных связей мощным ОНЧ-излучением наземных передатчиков. ЖЭТФ, 2012. Том 142, вып. 6 (12). С. 1246–1252.
4. Streltsov A.V., Berthelier J.J., Chernyshov A.A., Frolov V.L. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space. // Space Science Review. Volume 214, Issue 8, P. 1–122.
5. В.Л. Фролов, Р.Ю. Лукьянова, А.С. Белов и др. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450 – 500 км при работе стенда СУРА. // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Том LXI, № 5. С. 359–373.
6. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации  $F_2$ -области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА. // Изв. вузов. Радиофизика, 2016. Т. 59, № 3. С. 198–222.
7. Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Питаевский Л.П. Искусственные спутники в разряженной плазме. // Изд. «Наука». Москва, 1964.