

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

А.О. Рябов, В.Л. Фролов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия
RyabovAIOI@yandex.ru

EXAMINING THE RELATIONSHIP BETWEEN POTENTIAL OF AN ARTIFICIAL EARTH SATELLITE AND ELECTRON TEMPERATURE IN THE UPPER IONOSPHERE

A.O. Ryabov, V.L. Frolov

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhnij Novgorod, Russia
RyabovAIOI@yandex.ru

Аннотация. Анализируется связь между потенциалом искусственного спутника Земли и электронной температурой в верхней ионосфере. Обсуждается выражение для потенциала спутника; указываются недостатки и ограничения представленного теоретического расчета. Рассматриваются экспериментальные результаты, выполненные по программе СУРА-ДЕМЕТЕР. Анализируется, в каких ситуациях связь между потенциалом корпуса спутника и температурой электронов наибольшая.

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

Abstract. The relationship between the potential of artificial earth satellite and the electron temperature in the upper ionosphere is analyzed. 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. It is analyzed in which situations the relationship between the potential of the satellite body and the electron temperature is greatest.

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

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день натурные эксперименты являются одним из актуальных способов изучения плазменных явлений в ионосфере Земли [Фролов и др., 2007; Ryabov, 2018; Белов и др. 2012; Рябов, 2016]. Наиболее результативным методом исследования верхней ионосферы является использование искусственных спутников Земли (ИСЗ), предназначенных для научных целей [Ryabov, 2018; Белов и др. 2012; Streltsov et al., 2018; Фролов и др., 2018]. Наиболее интересны эксперименты, в рамках которых проводится стимуляция ионосферы радиоконструкциями, расположенными на Земле. Одной из актуальных задач в исследованиях ионосферы Земли является изучение искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), наблюдаемых в F2-слое. Условия возникновения этих неоднородностей и их ранжирование по размеру исследовались во многих работах [Фролов и др., 2007; Фролов и др., 2016]. 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 [Фролов и др., 2018]. 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. Под потенциалом ИСЗ в спутниковых измерениях понимается разность потенциалов, измеренная между оболочкой спутника и ленгмюровским зондом. Данная формулировка является общепринятой в условиях, когда потенциал зонда лежит вблизи плазменного потенциала, а это условие выполняется в достаточно плотной плазме [Lebreton et al., 2006]. В работе [Фролов и др., 2018] 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 [Альперт и др., 1964].

Поток электронов определяется выражением.

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

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 $v_e = \sqrt{2KT_e/m}$ ($v_i \sim 250$ км/с). В данном выражении N_0 — невозмущенная концентрация электронов и ионов, K — постоянная Больцмана, m — масса электрона, ϕ_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.

$$J_i = j_i dS = J_e = j_e dS,$$

где J_i и J_e — полный электронный и ионный ток.

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

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

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 с 2005 по 2010 г. с помощью аппаратуры французского спутника DEMETER (высота орбиты спутника была около 660 км). Описание работы стенда СУРА содержится в работе [Фролов и др., 2016]. Стенд СУРА, как правило, включался на ~15 мин за ~13 мин до пролета ИСЗ над стендом через возмущенную 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.

В 9 рассматриваемых сеансах наблюдалось формирование ИИН [Фролов и др., 2016]. 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 $f_{ВН} = 4.785$ МГц ($f_{OF2} \approx 5.3$ МГц) с мощностью $P_{эфф} = 70$ МВт (наклон диаграммы направленности — 12° на юг; высота отражения — 250 км). Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 0.5 МГц

ниже f_{OF2} . Измерения выполнялись в очень спокойных геомагнитных условиях: $\Sigma K_p = 4$. Минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущенной магнитной силовой трубки составляло 27 км для $T^* = 17:52:42$ UT. На верхней панели видно увеличение N_e на ~22 %, которое свидетельствует о формировании ИИН в возмущенной области; размер возмущенной области ~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 ~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 регистрировались. На рис. 2 представлены результаты такого сеанса (24.08.2006; $T^* = 18:22:26$ UT). В возмущенной области не наблюдается признаков генерации ИИН. Можно также отметить практически полное отсутствие взаимосвязи T_e и $-U_s$; коэффициент корреляции для данного сеанса $r = 0.03$. Для 13 сеансов, когда «СУРА» была включена, но заметных ИИН детектировать не удалось, средний коэффициент корреляции $\langle r \rangle = 0.37$. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в тех случаях, когда наблюдались заметные искусственные ионосферные неоднородности взаимосвязь между T_e и $-U_s$ оказалась заметна выше.

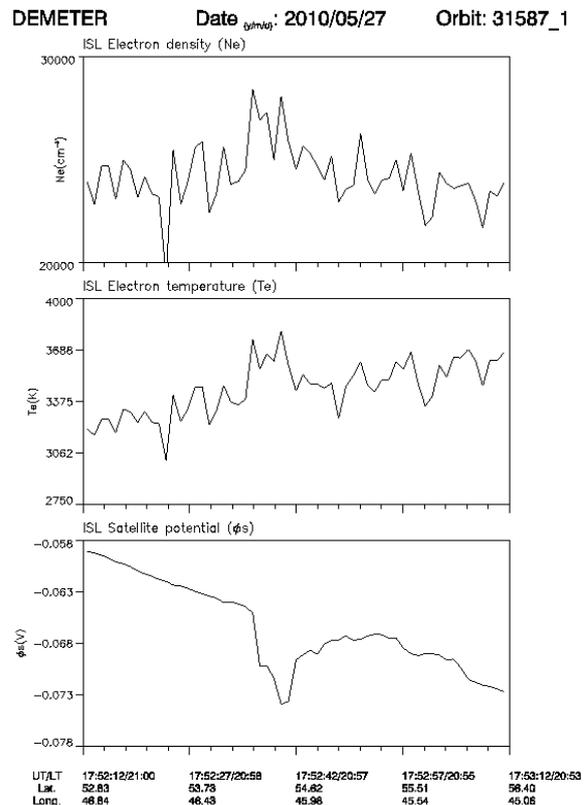


Рис. 1.

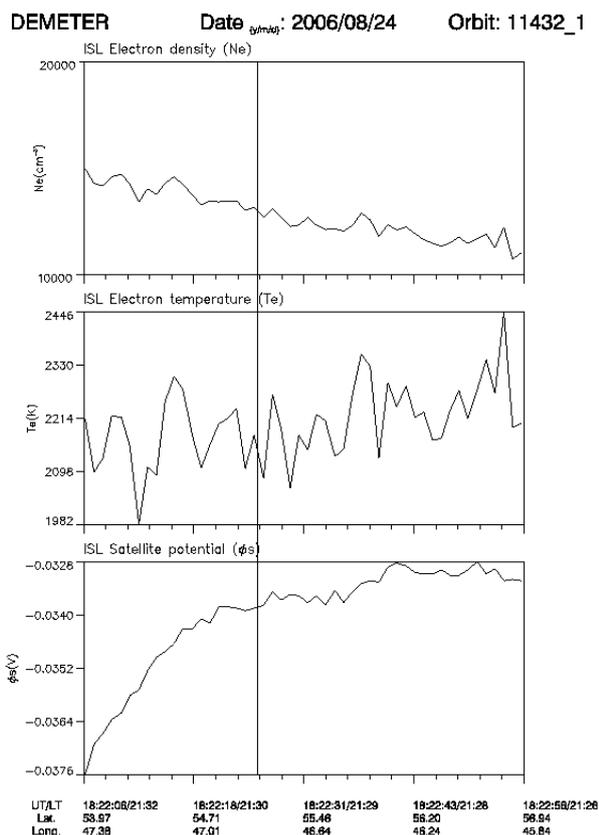


Рис. 2

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

Настоящая работа позволила проанализировать 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

Альперт Я.Л., Гуревич А.В., Питаевский Л.П. Искусственные спутники в разряженной плазме. М.: Наука, 1964.

Белов А.С., Марков Г.А., Рябов А.О., Парро М. Возмущение ионосферно-магнитосферных связей мощным ОНЧ-излучением наземных передатчиков // ЖЭТФ. 2012. Т. 142, вып. 6 (12). С. 1246–1252.

Рябов А.О. Наблюдение генерации магнитосферного мазера приборами искусственного спутника земли // Естественные и технические науки. 2016. № 12. С. 158–164.

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.

Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F₂-области мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198–222.

Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Белов А.С. и др. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450–500 км при работе стенда СУРА // Известия вузов. Радиофизика. 2018. Т. LXI, № 5. С. 359–373.

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. V. 44, N 12. P. 1140–1145.

Lebreton J.-P., Stverak S., Travnicek P., et al. The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results // Planetary Space Sci. 2006. V. 54, N 5. P. 472–486.

Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., et al. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // Space Sci. Rv. 2018. V. 214, iss. 8. P. 1–122.