

## КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛОМ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ И ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ИОНОСФЕРЕ

**А.О. Рябов, В.Л. Фролов**

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

## CORRELATION BETWEEN THE POTENTIAL OF AN ARTIFICIAL EARTH SATELLITE AND THE ELECTRON TEMPERATURE IN THE IONOSPHERE

**A.O. Ryabov, V.L. Frolov**

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

**Аннотация.** Представлен детальный разбор связи между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в F2-слое ионосферы. Рассматриваются результаты экспериментов, выполненных по программе СУРА-DEMETER. Проводится анализ, в каких ситуациях связь между потенциалом корпуса спутника и температурой электронов наибольшая.

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

**Abstract.** The relationship between the potential of an artificial Earth satellite and electron temperature in the ionospheric F2-layer is analyzed. The results of experiments performed under the SURA-DEMETER program are considered. We analyze in which situations the relationship between the potential of the satellite and the electron temperature is the greatest.

**Keywords:** ionosphere, electron temperature, artificial Earth satellite potential.

### ВВЕДЕНИЕ

Как было отмечено в ряде работ [Фролов и др., 2018; Рябов, Фролов, 2019а, б], в рамках опытов по модификации F2-области ионосферы воздействием наземного станда «Сура» регистрируется взаимосвязь между температурой электронов и потенциалом искусственного спутника Земли (ИСЗ). Интересна практически полная корреляция этих характеристик в областях с развитой искусственной ионосферной турбулентностью (ИИТ), когда с ростом  $T_e$  потенциал  $U_{sc}$  уменьшался и наоборот. Данная работа посвящена более детальному анализу связи между  $T_e$  и  $U_{sc}$  [Рябов, Фролов, 2019в, 2020]. В рамках данного раздела использовались данные, полученные по программе «Сура»-DEMETER [Рябов, 2018; Белов и др., 2012]. Важно понимать, что под потенциалом ИСЗ в спутниковых измерениях понимается разность потенциалов, измеренная между ленгмюровским зондом и оболочкой спутника [Смирнова, 2008; Pedersen, 1984]. С потенциалом плазмы потенциал спутника  $U_{sc}$  связан соотношением  $U_{sc} = U_1 - U_2$ , где  $U_1$  — разность между потенциалом зонда и потенциалом плазмы в месте расположения зонда,  $U_2$  — разность между потенциалом плазмы и потенциалом спутника.

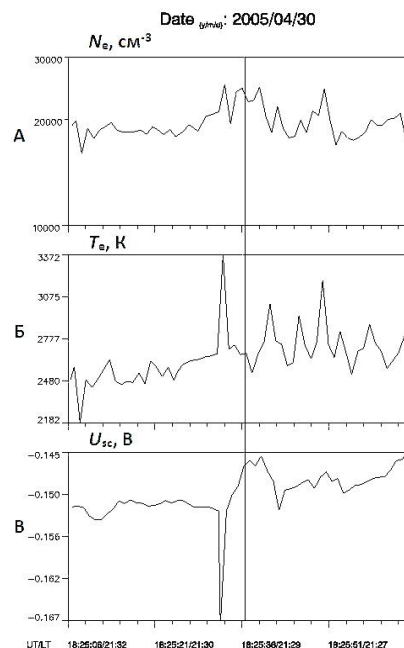
В последние годы к изучению потенциала спутника проявляется все больший научный интерес, хотя раньше потенциал спутника считался сугубо техническим параметром. Например, благодаря новой методике [Escoubet, 1997; Торкар, 1999] стало возможным определение концентрации окружающей плазмы на основе измерений потенциала в магнитосфере на ISEE-1 и других спутниках, что дает новые ресурсы для исследований плазменных характеристик.

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Теоретическое представление о связи между температурой электронов и потенциалом спутника по-

дробно освещено в следующей работе [Рябов, Фролов, 2019а].

В данной работе будет подробно разобрана статистическая взаимосвязь между этими величинами и приведено обоснование полученных результатов. В рамках программы «Сура»-DEMETER (подробно о данных экспериментах можно прочитать в статьях [Рябов, 2017а, б]) было продемонстрировано, что в случае возникновения заметной искусственной ионосферной турбулентности наблюдается заметная связь (рисунок) между  $T_e$  и  $U_{sc}$ .



Концентрация электронов (верхняя панель), температура электронов (средняя), потенциал спутника (нижняя). По оси абсцисс отложено время, вертикальной чертой обозначен момент  $T^* = 18:25:37$  UT 30 апреля 2005 г. максимального сближения спутника с центром возмущенной области (ВО)

Расчет коэффициента корреляции  $T_e$  и  $U_{sc}$ . СКО — среднеквадратичное отклонение

Наличие ИИН		Отсутствие ИИН		Контрольные дни	
Дата	$r$	Дата	$r$	Дата	$r$
30.04.2005	0.79	25.05.2005	0.51	20.08.2005	0.2
17.05.2006	0.81	13.08.2005	0.33	19.08.2006	0.23
12.05.2008	0.37	05.09.2005	0.02	02.09.2006	0.27
28.05.2008	0.55	20.05.2006	0.45	07.04.2007	0.23
27.08.2009	0.73	24.08.2006	0.03	20.04.2007	0.32
18.04.2010	0.68	05.04.2007	0.49	20.08.2007	-0.05
14.05.2010	0.63	07.05.2007	0.39	15.05.2008	0.15
27.05.2010	0.61	24.08.2007	0.27	09.06.2008	0.15
18.09.2010	0.48	30.08.2007	0.43	21.08.2009	0.18
		31.05.2008	0.42	02.05.2010	-0.04
		28.04.2010	0.62		
		24.05.2010	0.4		
		19.06.2010	0.43		
$\langle r \rangle = 0.63$ , СКО = 0.14		$\langle r \rangle = 0.37$ , СКО = 0.15		$\langle r \rangle = 0.16$ , СКО = 0.12	

Был проведен анализ сеансов, в рамках которых наблюдалось возбуждение ионосферы посредством нагрева мощным коротковолновым излучением стэнда «Сура». Был проведен также анализ сеансов по нагреву, в которых генерация искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) не наблюдалась. Третья группа экспериментов стала контрольной — когда стэнд «Сура» не работал. Для сеансов всех трех групп были рассчитаны корреляции между  $T_e$  и  $U_{sc}$ . Результаты приведены в таблице.

Сеансы анализировались на предмет наличия взаимосвязи между  $T_e$  и  $U_{sc}$ , причем наибольший интерес представляет их соответствие в возмущенной области ионосферы. Была посчитана корреляция между изменениями  $T_e$  и  $U_{sc}$  для девяти рассматриваемых сеансов. Средний коэффициент корреляции для девяти сеансов, когда была включена «Сура» и наблюдалась генерация ИИН, оказался равен  $\langle r \rangle = 0.63$ , что подтверждает существование взаимосвязи между электронной температурой и потенциалом спутника. В то же время стоит обратить внимание, что коэффициент корреляции далек от 1. Для 13 сеансов, когда «Сура» была включена, но заметные ИИН не регистрировались, 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 вариаций  $T_e$  и  $U_{sc}$  ока-

залась заметно выше. В случае контрольных сеансов средний коэффициент корреляции оказался заметно ниже:  $\langle r \rangle = 0.16$ , однако заметно выше нуля, что свидетельствует о том, что некоторая связь между электронной температурой и потенциалом спутника имеет место и в естественных условиях.

Серия измерений, когда «Сура» работала, но не были зарегистрированы ИИН, отличается от холостой группы тем, что в ряде случаев нерезультативных сеансов нагрева ионосферы заметные вариации не были зарегистрированы из-за ограниченных возможностей аппаратуры, поэтому нельзя однозначно говорить об отсутствии возбуждения ионосферы радиоволнами стэнда. В случае же контрольной группы отсутствие нагрева однозначно указывает на то, что возмущение ионосферы носит только естественный характер. Поэтому сеансы этих двух групп принципиально отличны друг от друга.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что корреляция между  $T_e$  и  $U_{sc}$  наиболее сильна в случае наличия ИИН. В противном же случае эта связь значительно меньше.

Взаимосвязь между  $T_e$  и  $U_{sc}$ , помимо фундаментального, имеет еще и важное прикладное значение. В некоторых сеансах уровень шумов на графиках концентрации и температуры электронов слишком высок, что осложняет достоверное определение наличия искусственных ионосферных неоднородно-

стей. В таких ситуациях способом верификации наблюдаемых явлений может служить появление вариаций в значениях потенциала спутника. Кроме того, в случае спутника DEMETER потенциал спутника измеряется с большим разрешением (1 измерение в 100 мс), чем концентрация и температура электронов (1 измерение в 1 с), что позволяет более точно определить размеры областей ИИН.

Рябовым А.О. работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ. Работа Фролова В.Л. в части исследования особенностей высыпаний высокоэнергичных электронов выполнялась в рамках научного проекта РНФ № 21-12-00385.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белов А.С., Марков Г.А., Рябов А.О., Парро М. Возмущение ионосферно-магнитосферных связей мощным ОНЧ-излучением наземных передатчиков. *ЖЭТФ*. 2012. Т. 142, № 6. С. 1246–1252.

Новиков Л.С. *Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой*. М.: Университетская книга, 2006. 120 с.

Рябов А.О. Поляризационные характеристики низкочастотных волн, наблюдаемых в ионосфере. Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». *Тезисы докладов. Институт космических исследований РАН*. 2017а. С. 431.

Рябов А.О. Поляризационные характеристики КНЧ/СНЧ-волн, наблюдаемых во внешней ионосфере при воздействии мощным наземным КВ-радиоизлучением. *Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Тезисы докладов XV Конференции молодых ученых*. 2017б. С. 92.

Рябов, А.О. Определение ионного состава внешней ионосферы на основе характеристик КНЧ-СНЧ-волн, регистрируемых во время работы станда «Сура». *Физика плазмы*. 2018. Т. 44, № 11. С. 916–921.

Рябов А.О., Фролов В.Л. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2019а. Т. 62, № 10. С. 736–746.

Рябов А.О., Фролов В.Л. Анализ взаимосвязи между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. *Конференция «Распространение радиоволн – 26»: Труды*. 2019б. Том II. С. 71–74.

Рябов А.О., Фролов В.Л. Исследование взаимосвязи между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. *«Междуна-*

*родная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике»: Труды*. 2019в. С. 207–209.

Рябов А.О., Фролов В.Л. Взаимосвязь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. *Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества*. 2020. С. 44–45.

Смирнова Н. Ф., Станев Г. Определение плотности фотоэлектронного тока на основе сопоставления измерений потенциала спутника «ИНТЕРБОЛ-2» относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7. *Солнечно-земная физика*. 2008. Т. 1, вып. 12. С. 186–189.

Торкар К. Измерения электрического потенциала спутника ИНТЕРБОЛ-2 относительно плазмы и основанное на нем определение концентрации электронов. *Космические исследования*. 1999. Т. 37, № 6. С. 644–653.

Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Белов А.С. и др. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450–500 км при работе станда «Сура». *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 5. С. 359–373.

Escoubet C.P. Density in the magnetosphere inferred from ISEE-1 spacecraft potential. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 17595–17609.

Pedersen A. Quasistatic electric field measurements with spherical double probes on the GEOS and ISEE satellites. *Space Sci. Rev.* 1984. Vol. 37. P. 269–312.