

УДК 533.95+550.348

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛОМ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ И ТЕМПЕРАТУРОЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ, ВОЗМУЩЁННОЙ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НАЗЕМНОГО СТЕНДА «СУРА»

А. О. Рябов^{1*}, *В. Л. Фролов*^{1,2}

¹ Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

Обсуждается связь между температурой электронов и потенциалом корпуса искусственного спутника Земли в верхней ионосфере. Анализируется выражение для потенциала спутника; указываются ограничения теоретического представления. Рассматриваются экспериментальные результаты, выполненные по программам «Сура»—DEMETER и «Сура»—SWARM, на основании которых разбираются три случая: 1) когда искусственные ионосферные неоднородности возбуждаются в верхней ионосфере при её стимуляции мощными короткими радиоволнами; 2) когда неоднородности не возбуждаются при стимуляции верхней ионосферы; 3) когда измерения выполнялись в естественной ионосфере. Установлено, что наибольший коэффициент корреляции между вариациями температуры электронов и потенциала спутника наблюдается при наличии искусственных ионосферных неоднородностей. Обсуждается прикладное значение полученных результатов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время натурные эксперименты являются одним из актуальных способов изучения плазменных явлений в ионосфере. Такие исследования представляют интерес как для изучения общих вопросов генерации плазменных волн и турбулентности [1–5], так и для определения состояния космической погоды [6–9]. Помимо фундаментальной ценности, эти эксперименты важны с прикладной точки зрения для осуществления связи в коротковолновом (КВ), ультракоротковолновом (УКВ) и более высокочастотных диапазонах, т. к. проблема нестационарности ионосферы, вызванной её модификацией, является фактором, который может приводить к ухудшению качества передаваемой информации и надёжности каналов связи.

Наиболее эффективным методом исследования верхней ионосферы является использование искусственных спутников Земли, предназначенных для научных целей. В нашем случае это спутники DEMETER, SWARM, DMSP, NOAA и другие [2, 4, 10–12]. Эти спутники обладают широким набором приборов для исследования характеристик ионосферы Земли, например, векторные и скалярные магнетометры позволяют измерять магнитное поле, а ленгмюровские зонды — концентрацию и температуру электронов, а также потенциал корпуса спутника.

Помимо исследований, выполняемых в естественных условиях, дополнительные возможности могут дать эксперименты, в рамках которых проводится стимуляция ионосферы посредством радиоизлучения радиоконфлюэсов, расположенных на Земле: «Сура», HAARP, NWC, NAA, NPM [10, 13–15]. Нагрев ионосферы радиоизлучением наземных станций является эффективным методом, позволяющим осуществлять систематические исследования околоземной плазмы с контролируемыми параметрами воздействия [16].

Одной из актуальных задач в исследованиях ионосферы Земли является изучение свойств искусственных ионосферных неоднородностей, наблюдаемых в слое F_2 . Условия возникновения

* RyabovAlOl@yandex.ru

этих неоднородностей и их ранжирование по размерам рассматривались во многих работах [1, 14, 17]. Основными измеренными величинами здесь являются вариации концентрации N_e и температуры T_e электронов, получаемые с помощью бортовой аппаратуры спутника. В наиболее результативных случаях искусственные ионосферные неоднородности (в частных случаях — дакты концентрации) хорошо детектируются на графиках пространственных вариаций как концентрации, так и температуры электронов [11, 15]. Отличительной особенностью современных ленгмюровских зондов, расположенных на спутниках, является возбуждение достаточно больших шумов при измерении температуры электронов, которые не сглаживаются даже программными методами [18]. Как результат, во многих случаях возможность определения свойств искусственной ионосферной турбулентности ограничивается качеством получаемых данных. В то же время бортовая аппаратура многих спутников позволяет получать значения их потенциалов U_s (DEMETER, SWARM), которые характеризуются значительно меньшим уровнем шума, чем при измерениях электронной температуры. Под потенциалом спутника в спутниковых измерениях понимается разность потенциалов, измеренная между оболочкой спутника и ленгмюровским зондом. Данная формулировка является общепринятой, когда потенциал зонда лежит вблизи плазменного потенциала, а это условие выполняется в достаточно плотной плазме [18, 19]. В работе [11] была зарегистрирована прямая взаимосвязь между температурой электронов и потенциалом спутника. Интересной особенностью являлась практически полная (до деталей) взаимосвязь этих величин в областях искусственной ионосферной турбулентности, когда с ростом T_e потенциал U_s уменьшался, однако по причине побочности данного наблюдения для работы [11] ему не было уделено достаточно внимания. Данная работа посвящена более детальному анализу связи между величинами T_e и U_s на основе всех полученных нами данных (программа «Сура»—DEMETER [15], программа «Сура»—SWARM [11]).

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СВЯЗИ МЕЖДУ ТЕМПЕРАТУРОЙ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОТЕНЦИАЛОМ СПУТНИКА

На поверхности спутника ионы могут нейтрализоваться, а электроны поглощаться. При этом сам спутник в общем случае заряжается, т. к. число попадающих на него электронов и ионов неодинаково. Число поглощающихся электронов и ионов существенно зависит от потенциала на поверхности спутника, её формы и свойств, а также от состояния плазмы. Понятно, что спутник будет заряжаться до тех пор, пока число поглощающихся на его поверхности в единицу времени электронов и ионов не станет одинаковым. Иначе говоря, полный ток на спутник должен быть равным нулю; этим условием и определяется потенциал на поверхности спутника.

В случае спутника ионы и электроны в основном захватываются передней частью его поверхности: ионы набегают спереди на спутник из-за большей скорости его движения ($V_0 \gg v_i$, где $V_0 \approx 8$ км/с — скорость движения спутника, $v_i \approx 1$ км/с — скорость движения ионов), набегу же электронов сзади препятствует возникающая здесь область с высоким отрицательным потенциалом [20].

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 справедливо и в нашем случае, т. к. скорость V_0 мала по сравнению с тепловой скоростью электронов $v_e = \sqrt{2KT_e/m}$ ($v_e \approx 250$ км/с). В данном выражении N_0 — невозмущённая концентрация электронов и ионов, K — постоянная

Больцмана, m — масса электрона, φ_S — потенциал рассматриваемой точки поверхности тела, T_e — температура электронов.

Следуя [20], поток ионов с массой M и температурой T_i в рассматриваемых условиях будет определяться выражением

$$j_i = N_0 \left\{ (\mathbf{V}_0 \mathbf{n}) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Phi \left(\frac{\mathbf{V}_0 \mathbf{n}}{\sqrt{2KT_i/M}} \right) \right] + \sqrt{\frac{KT_i}{2\pi M}} \exp \left[-\frac{M(\mathbf{V}_0 \mathbf{n})^2}{2KT_i} \right] \right\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{n}$ — внешняя нормаль к поверхности спутника, M — масса иона, T_i — температура ионов, Φ — интеграл вероятностей, $\mathbf{V}_0$ — вектор скорости движения спутника.

Если поверхность тела — диэлектрик, то равенство потоков поглощаемых электронов и ионов должно соблюдаться в каждой точке поверхности, т. е.

$$(1 - R_e)j_e = (1 - R_i)j_i,$$

где R_e и R_i — коэффициенты отражения электронов и ионов. Отсюда следует, что потенциал на поверхности равен

$$\varphi_S = -\frac{KT_e}{e} \ln \left\{ \frac{\sqrt{\frac{KT_e}{2\pi m}} (1 - R_e)}{(1 - R_i) (\mathbf{V}_0 \mathbf{n}) \left[\frac{1}{2} + \frac{A}{2} \right] + (1 - R_i) \sqrt{\frac{KT_i}{2\pi M}} \exp \left[-\frac{M(\mathbf{V}_0 \mathbf{n})^2}{2KT_i} \right]} \right\},$$

где

$$A = \Phi \left(\frac{\mathbf{V}_0 \mathbf{n}}{\sqrt{2KT_i/M}} \right).$$

В рассматриваемом приближении будем считать, что температуры ионов и электронов равны.

В случае металлической поверхности спутника потенциал электрического поля на ней постоянен и равен U_s . Величина U_s , естественно, определяется из условия равенства полных токов 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 соответственно.

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

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

Расчёт потенциала спутника в общем случае затруднён его сложной формой. В то же время нет оснований считать, что сильно будут изменены качественные закономерности $U_s \propto T_e$ и $U_s \propto \ln[\sqrt{T_e}]$.

Даже в случае простой формы спутника (например, сферическая) полученное выражение для потенциала тела имеет приближённый характер, поскольку для точного расчёта U_s необходимо учитывать множество других процессов, приводящих к изменению тока на поверхности спутника, таких как фотоэффект, термоэлектронная эмиссия, выбивание электронов и ионов с поверхности под влиянием корпускулярного излучения, из-за столкновения с нейтральными атомами среды и др. [18, 21].

Таким образом, потенциал спутника будет зависеть от температуры электронов и коэффициентов отражения электронов и ионов. Как было показано в работе [21], значения R_e и R_i зависят от высоты и наклона орбиты космического аппарата. На низких околоземных орбитах в ионосфере (в том числе орбитах DEMETER и SWARM) энергия частиц плазмы невелика, а их концентрация такова, что процент отражённых от бортов спутника частиц будет относительно невелик. Например, в области средних энергий падающих электронов $E_p = (0,1 \div 10)$ кэВ, характерных для рассмотренных в настоящей работе экспериментов, величина коэффициента отражения электронов обычно $R_e = (0,02 \div 0,03)$. К сожалению, R_e и R_i имеют сложную динамику, зависят от космической погоды и подвержены сильному влиянию нелинейных эффектов, из-за чего их расчёт невозможен. По этой причине определить, в какой момент главным фактором, влияющим на динамику потенциала спутника, является изменение температуры электронов, а в какой — изменение коэффициентов отражения, теоретически очень сложно. Важно добавить, что спутники DEMETER и SWARM имеют сложную пространственную конфигурацию и не были оснащены аппаратурой, необходимой для прямого расчёта R_e и R_i [18].

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данной работе используются результаты, полученные в период с 2005 по 2010 год с помощью бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER (высота орбиты около 660 км), и результаты, полученные с помощью спутников SWARM в 2016–2018 годы (высота орбит 450–500 км). Используемый в представленных экспериментах по модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами нагревный стенд «Сура» имеет координаты $\varphi_0 = 56,15^\circ$ с. ш., $\lambda_0 = 46,1^\circ$ в. д. [22]. Эффективная мощность излучения стенда в режиме синхронной работы всех трёх его модулей с максимальной мощностью составляет $P_{\text{эфф}} \approx 80$ МВт на частотах излучения $f_{\text{ВН}} \approx 4,3$ МГц, увеличиваясь с ростом $f_{\text{ВН}}$ до 180 МВт при $f_{\text{ВН}} \approx 6,5$ МГц. Во всех рассматриваемых в настоящей работе экспериментах стенд излучал мощные радиоволны обыкновенной поляризацией (О-мода) при наклоне диаграммы направленности излучения волны накачки (ВН) на 12° на юг (для усиления генерации искусственных ионосферных турбулентностей за счёт эффекта «магнитного зенита») [10]. Стенд «Сура», как правило, включался на 15 мин примерно за 13 мин до пролёта спутника над ним через возмущённую магнитную силовую трубку. Это время является достаточным для развития плазменных возмущений до практически стационарного уровня не только в области отражения ВН, но и на высотах внешней ионосферы [11]. Не было зарегистрировано каких-либо искусственных плазменных возмущений при работе стенда в дневные часы, что связано с высоким поглоще-

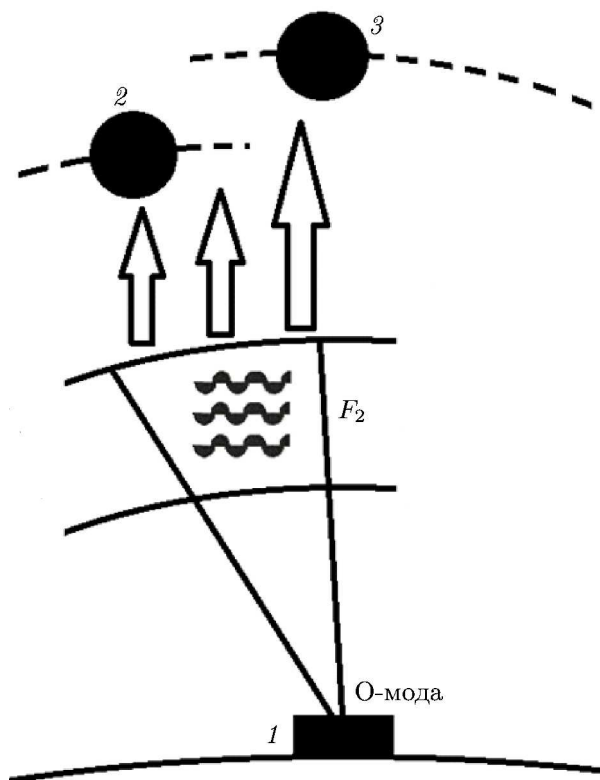


Рис. 1. Схема проведения экспериментов в рамках программ «Сура»–DEMETER и «Сура»–SWARM: 1 — стенд «Сура», 2 — спутник SWARM, 3 — спутник DEMETER

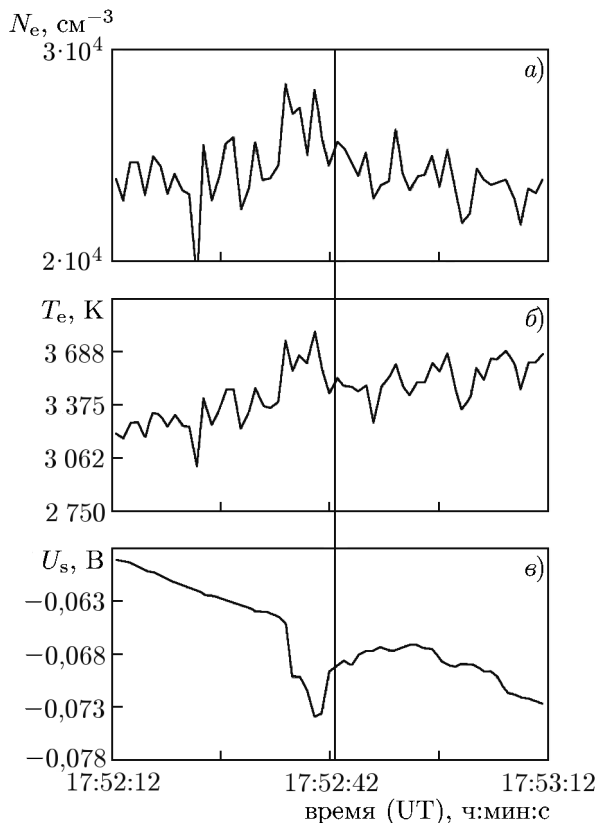


Рис. 2. Результаты измерений концентрации электронов N_e , их температуры T_e и потенциала корпуса спутника U_s 27 мая 2010 года. Вертикальной линией отмечен центр возмущённой области. Наблюдение искусственных ионосферных неоднородностей в стороне от центра возмущённой области объясняется эффектом магнитного зенита

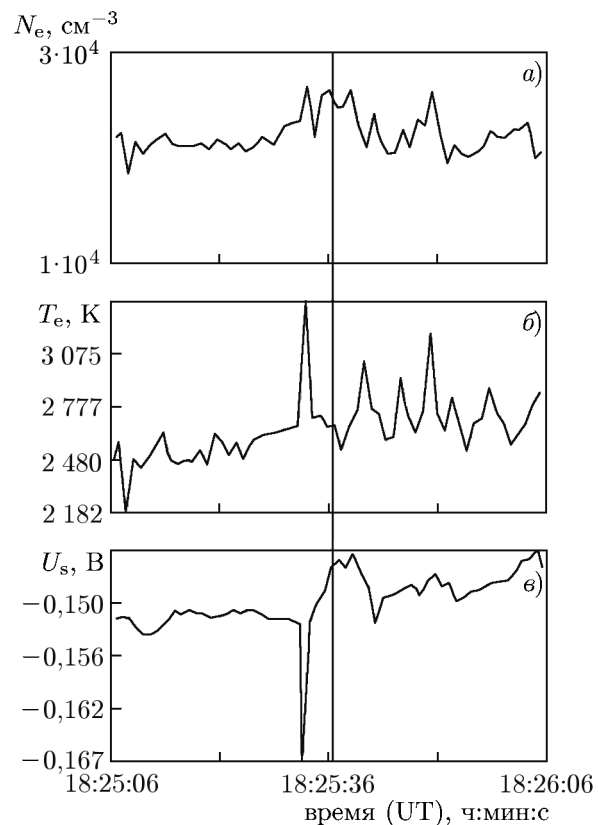


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для сеанса 30 апреля 2005 года

нием радиоволн в нижней ионосфере, формированием дефокусирующей линзы и низкой высотой отражения волны накачки (~ 200 км) [3, 23]. Кроме того, возмущения не регистрировались, когда частота мощной радиоволны превышала критическую частоту f_{0F_2} слоя F_2 ионосферы (нагрев «на просвет»), а также когда орбита спутника проходила на расстоянии больше 100 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки. Отметим, что практически все измерения были выполнены в годы затянувшегося минимума солнечной активности в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях. Схема экспериментов представлена на рис. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В данной работе проанализированы результаты 22 сеансов в рамках программы «Сура»—DEMETER, выполненных в период с апреля по сентябрь в 2005–2010 годы, а также 10 контрольных сеансов вне рамок этой программы. Кроме того, анализируются результаты сеансов измерений, выполненных по программе «Сура»—SWARM в 2016–2018 годы.

В 9 рассматриваемых сеансах по программе «Сура»—DEMETER наблюдалась генерация искусственных ионосферных неоднородностей, характеризующихся ярко выраженным и стабильным увеличением концентрации и температуры электронов в области, возмущённой наземным

передатчиком. Один из характерных случаев — сеанс 27.05.2010 — представлен на рис. 2. В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 17:35 до 17:50 UT на частоте $f_{\text{ВН}} = 4,785$ МГц ($f_{0F_2} \approx 5,3$ МГц) с мощностью $P_{\text{эфф}} = 70$ МВт (наклон диаграммы направленности 12° на юг; высота отражения ВН 250 км). Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота ВН была на 0,5 МГц ниже f_{0F_2} . 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 рис. 2а видно увеличение концентрации N_e примерно на 22 % (вариации N_e около 17 %). Такое увеличение N_e свидетельствует о формировании дакта в возмущённой области; размер последней составляет около 60 км. На рис. 2б представлена временная зависимость температуры электронов. Из него видно, что в той же области, что и для вариаций N_e , наблюдается увеличение T_e примерно на 8 %. Подробный анализ этих результатов приводится в статье [14]. Важно отметить, что дакты, в свою очередь, могут включать мелкомасштабные неоднородности, что сопровождается заметными вариациями концентрации и температуры электронов [24]. На рис. 2 явно обнаруживается связь между величинами T_e и $-U_s$.

Сеансы анализировались на предмет наличия взаимосвязи между T_e и $-U_s$, причём наибольший интерес представляет их соответствие в возмущённой области ионосферы. Была вычислена корреляция между изменениями T_e и $-U_s$ для 9 рассматриваемых сеансов. Например, для сеанса 27.05.2010 (рис. 2) коэффициент корреляции $r = 0,61$, а для сеанса 30.04.2005 (рис. 3) $r = 0,79$. Средний коэффициент корреляции для 9 сеансов, когда был включён стенд «Сура» и наблюдалась генерация искусственных ионосферных неоднородностей, оказался равен 0,63, что подтверждает существование взаимосвязи между электронной температурой и потенциалом спутника.

В 13 сеансах, проведённых по программе «Сура»—DEMETER, искусственные неоднородности не регистрировались. На рис. 4 представлены результаты одного такого сеанса (24.08.2006; $T^* = 18:22:26$ UT). В возмущённой области не наблюдается признаков генерации неоднородностей. Можно также отметить практически полное отсутствие взаимосвязи T_e и $-U_s$; коэффициент корреляции для данного сеанса $r = 0,03$. Для 13 сеансов, когда стенд «Сура» был включён, но заметные неоднородности детектировать не удалось, средний коэффициент корреляции $\langle r \rangle = 0,37$. Таким образом, можно сделать вывод, что в тех случаях, когда наблюдались заметные искусственные ионосферные неоднородности, взаимосвязь между T_e и $-U_s$ оказалась заметно сильнее.

Кроме сеансов, выполненных по программе «Сура»—DEMETER, были рассмотрены 10 пролётов спутника при выключенном стенде для оценки фонового вклада в рассматриваемое явление. В случае контрольных сеансов средний коэффициент корреляции оказался заметно ни-

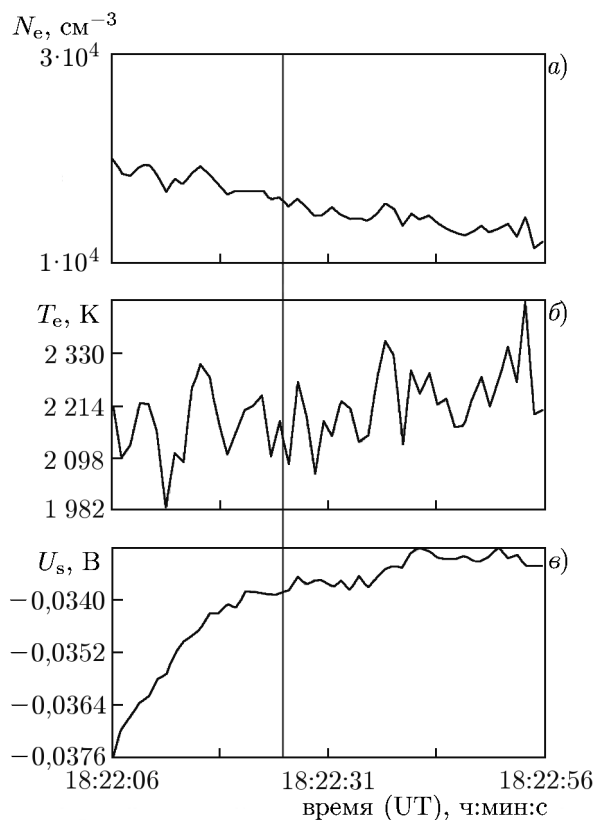


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для сеанса 24 августа 2006 года

Таблица 1. Сводная таблица по результатам программы «Сура»—DEMETER (ИИН — искусственные ионосферные неоднородности, 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	0,20
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	0,40		
		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	

же: $\langle r \rangle = 0,16$, однако заметно выше нуля, что свидетельствует о том, что слабая связь между электронной температурой и потенциалом спутника имеет место и в естественных условиях.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что взаимосвязь между T_e и $-U_s$ наиболее заметна при наличии искусственных ионосферных неоднородностей, интенсивность которых максимальна в дактах плотности плазмы. В противном случае эта связь значительно меньше. Сводные результаты по итогам анализа данных программы «Сура»—DEMETER представлены в табл. 1.

В рамках экспериментов «Сура»—SWARM [11] также были сеансы с подобной взаимосвязью между величинами T_e и $-U_s$. В качестве примера был проанализирован сеанс за 23 мая 2017 года (рис. 5). Спутник SWARM (C) пролетал в условиях вечерней ионосферы ($T^* = 17:11:40$ UT) на высоте 452 км в направлении с юга на север в 40 км к западу от центра возмущённой магнитной силовой трубки. Модификация ионосферы началась за 16 мин до пролёта спутника. Волна накачки излучалась на частоте $f_{\text{ВН}} = 4300$ кГц при $f_{0F_2} = 4,6$ МГц с эффективной мощностью излучения $P_{\text{эфф}} = 50$ МВт, высота отражения ВН составляла $h \approx 235$ км. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 15^-$). Увеличение T_e на $4 \div 5\%$ совпадает с падением $-U_s$ на 3% . Коэффициент корреляции между T_e и $-U_s$ в рассматриваемом сеансе равен 0,83. Важно отметить, что подобный сеанс не единственный в рамках программы «Сура»—SWARM. Однако в отличие от работы со спутником DEMETER, во время пролётов спутников SWARM над возмущённой областью ни разу не было обнаружено случаев формирования дактов [11]. Из этого следует, что наличие дакта не является фактором, увеличивающим корреляцию между T_e и $-U_s$. Главной причиной, влияющей на рост корреляции между рассматриваемыми величинами, являются неоднородности концентрации плазмы с размерами поперёк магнитного поля $l_{\perp} \leq 15$ км, которые сконцентрированы в дактах плотности с размерами $l_{\perp} \geq 100$ км. Эти неоднородности характеризуются появлением заметных вариаций концентрации и температуры электронов (не менее 2% для N_e и 3% для T_e).

В сеансах по программе «Сура»—SWARM, в которых не наблюдалась генерация искусственных ионосферных неоднородностей, взаимосвязь между T_e и $-U_s$ была значительно меньше по сравнению с сеансами, в которых эти неоднородности регистрировались. В качестве примера рассмотрим сеанс 03.06.2017 (рис. 6). В этот день спутник SWARM В (высота орбиты около 500 км)

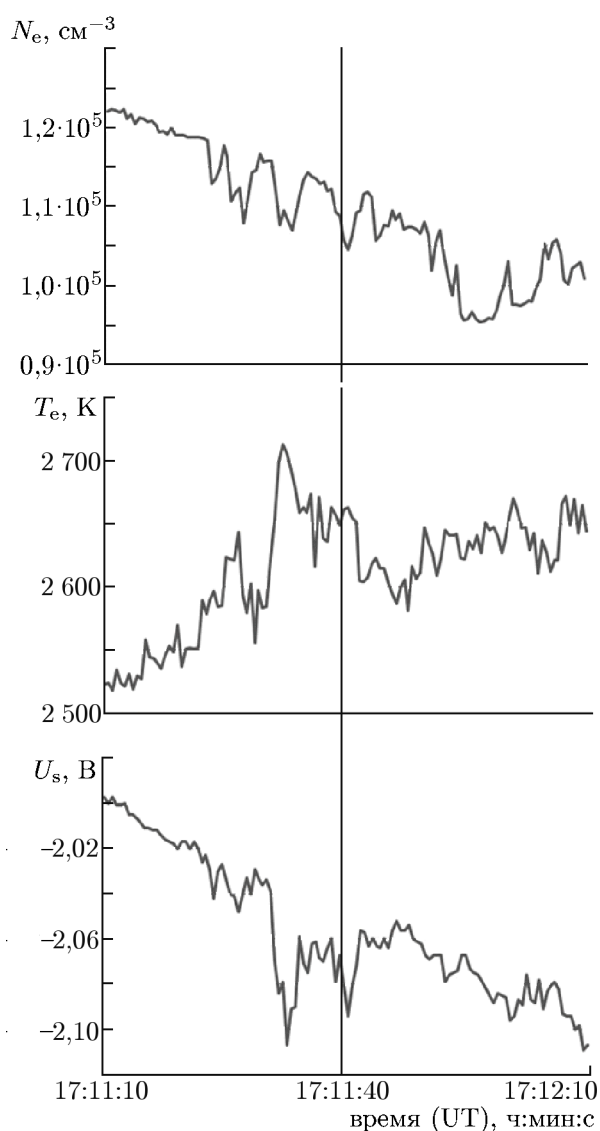


Рис. 5. Результаты измерений концентрации электронов N_e , их температуры T_e и потенциала корпуса спутника U_s на спутнике SWARM 23 мая 2017 года. Вертикальной линией отмечено время $T^* = 17:11:40$ UT

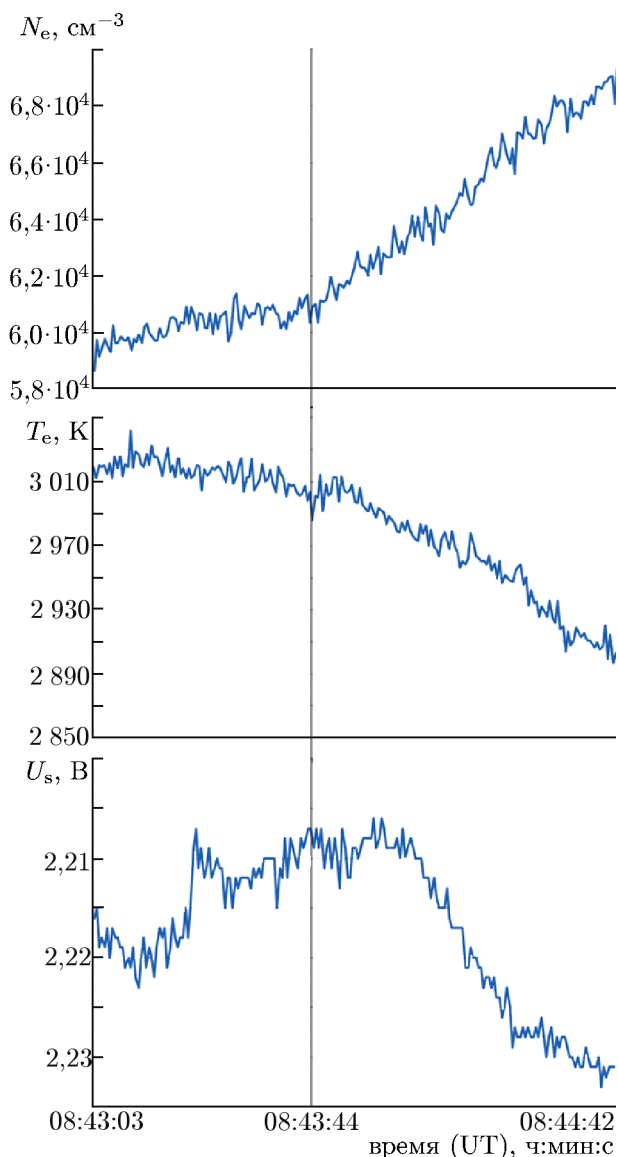


Рис. 6. То же, что на рис. 5, для 3 июня 2017 года

пролетал через центр диаграммы направленности утром. Ряд неблагоприятных условий [11] привёл к тому, что заметных изменений концентрации и температуры электронов не было (едва заметно уменьшение температуры на 0,6%). Рисунок 6 демонстрирует отсутствие взаимосвязи между T_e и $-U_s$ (коэффициент корреляции равен 0,07), в отличие от рис. 5. Эти результаты подтверждают вывод, который был сделан при анализе сеансов по программе «Сура»—DEMETER: отсутствие искусственных ионосферных неоднородностей приводит к заметному ослаблению корреляции между T_e и $-U_s$.

Всего было проанализировано 9 сеансов по программе «Сура»—SWARM, когда наблюдались искусственные ионосферные неоднородности (для этих случаев $\langle r \rangle = 0,67$), и 7 сеансов, когда

Таблица 2. Сводная таблица по результатам программы «Сура»—SWARM

Наличие ИИН		Отсутствие ИИН	
дата	r	дата	r
24.05.2016	0,75	06.03.2017	0,07
27.08.2016	0,85	12.06.2017	0,35
30.08.2016	0,43	29.06.2017	0,38
02.09.2016	0,59	15.10.2017	0,42
07.10.2016	0,66	18.10.2017	0,36
23.05.2017	0,83	29.10.2017	0,51
27.05.2017	0,60	24.11.2018	0,22
07.06.2017	0,66		
07.09.2017	0,70		
$\langle r \rangle = 0,67$, СКО=0,13		$\langle r \rangle = 0,33$, СКО=0,14	

неоднородности не наблюдались ($\langle r \rangle = 0,33$). Сводные результаты по итогам анализа данных программы СУРА—SWARM представлены в табл. 2.

Таким образом, наличие дактов плотности, которые наблюдались в рамках экспериментов по программе «Сура»—DEMETER, не влияет на значение $\langle r \rangle$, т. к. в рамках программы «Сура»—SWARM дакты не наблюдались, а значения $\langle r \rangle$ в обеих программах для случаев наличия и отсутствия искусственных ионосферных неоднородностей оказались близкими (см. табл. 1 и 2).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была проанализирована связь между потенциалом корпуса спутника и температурой электронов. Выражение для U_s (3) указывает на то, что $U_s \propto T_e$, однако данная формула справедлива для спутника сферической формы и не учитывает ряда процессов (фотоэффект, термоэлектронная эмиссия и пр.). Поэтому её можно использовать только для получения качественных выводов. Кроме того, из формулы (3) следует, что потенциал спутника зависит от коэффициентов отражения электронов и ионов, значения которых не детектируются бортовой аппаратурой используемых в настоящее время спутников. Таким образом, U_s зависит как от температуры электронов, так и от других характеристик. Поэтому использовать данное теоретическое представление на практике, а также определить границы его применимости затруднительно.

Экспериментальные данные подтвердили аналитические выводы. В работе было продемонстрировано, что связь между отрицательным значением потенциала спутника DEMETER и электронной температурой наиболее заметна в области существования искусственных ионосферных неоднородностей. В те дни, когда наблюдались эти неоднородности, в возмущённой области имела место высокая корреляция ($\langle r \rangle = 0,63$) между T_e и $-U_s$, причём эта корреляция уменьшалась или вообще полностью исчезала в отдалении от возмущённой области. В дни, когда наземный стенд «Сура» работал, но в ионосфере не удалось добиться формирования интенсивных неоднородностей, степень рассматриваемой связи сильно снижалась ($\langle r \rangle = 0,37$). Кроме того, были проанализированы контрольные сеансы, когда стенд «Сура» не был включён. В эти сеансы коэффициент корреляции падал еще ниже ($\langle r \rangle = 0,16$). Анализ экспериментальных данных, полученных по программе «Сура»—SWARM, в целом, подтвердил описанные выше выводы. Кроме того, анализ данных программы «Сура»—SWARM позволил сделать вывод, что наличие дактов, которые наблюдались в рамках экспериментов «Сура»—DEMETER, не увеличивает коэффициент корреляции по сравнению с неоднородностями в отсутствие дактов («Сура»—SWARM).

Как показали последние исследования высыпаний энергичных электронов, такие электроны могут оказывать сильное влияние на состояние ионосферы, приводя к увеличению поглощения в нижней ионосфере, генерации ионосферных токов и другое [25]. Как было показано в настоящей работе, увеличение уровня плазменной турбулентности, приводит к увеличению корреляции между T_e и $-U_s$. Существует ли непосредственная связь между высыпаниями и рассматриваемой корреляцией ещё предстоит выяснить.

Представленные результаты, помимо фундаментального, имеют ещё и важное прикладное значение. В некоторых сеансах уровень шумов на графиках концентрации и температуры электронов слишком высок, что осложняет достоверное определение наличия искусственных ионосферных неоднородностей. В таких ситуациях способом верификации наблюдаемых явлений может служить появление вариаций в значениях потенциала спутника.

Исследования В. Л. Фролова выполнены при поддержке РФФИ (грант 20-05-00166А). Исследования А. О. Рябова выполнены при поддержке РФФИ (грант 19-52-15007 НЦНИ_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
2. Рябов А. О. // Физика плазмы. 2018. V. 44, No. 11. P. 916.
3. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Монография. Н. Новгород: Изд. ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. 468 с.
4. Белов А. С., Марков Г. А., Рябов А. О., Парро М. // Журн. exper. теор. физ. 2012. Т. 142, вып. 6 (12). С. 1246.
5. Рябов А. О. // Естественные и техн. науки. 2016. № 12. С. 158.
6. Емельянов Л. Я., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58, № 4. С. 551.
7. Благовещенский Д. В. // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 3. С. 291.
8. Благовещенский Д. В., Калишин А. С. // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 2. С. 213.
9. Kotov D. V., Bogomaz O. V., Chernogor L. F., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys.. 2016. V. 121, No. 7. P. 7013.
10. Streltsov A. V., Berthelier J.-J., Chernyshov A. A., Frolov V. L. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214, No. 8. P. 1.
11. Фролов В. Л., Лукьянова Р. Ю., Белов А. С. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 5. С. 359.
12. Рябов А. О. // Успехи современной науки. 2017. Т. 7, № 3. С. 46.
13. Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
14. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, вып. 12. С. 908.
15. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198.
16. Parrot M., Sauvaud J. A., Berthelier J. J., Lebreton J. P. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. Art. no. L11111.
17. Фролов В. Л. // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 22.
18. Lebreton J.-P., Stverak S., Travnicek P., et al. // Planetary Space Sci. 2006. V. 54, No. 5. P. 472.
19. Смирнова Н. Ф., Станев Г. // Солнечно-земная физика. 2008. Т. 1, вып. 12. С. 186.
20. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Питаевский Л. П. Искусственные спутники в разряженной плазме. М.: Наука, 1964. 382 с.
21. Новиков Л. С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой. М.: Университетская книга, 2006. 120 с.
22. Беликович В. В., Грач С. М., Караптин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.

23. Бойко Г. Н., Васьков В. В., Голян С. Ф. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 39, вып. 11. С. 533.
24. Rapoport V. O., Frolov V. L., Polyakov S. V., et al. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art. no. A10322.
25. Фролов В. Л., Рябов А. О., Акчурин А. Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 9. С. 641.

Поступила в редакцию 5 июня 2019 г.; принята в печать 30 октября 2019 г.

**RELATIONSHIP BETWEEN THE POTENTIAL OF AN ARTIFICIAL
EARTH SATELLITE AND THE TEMPERATURE OF ELECTRONS
IN THE UPPER IONOSPHERE PERTURBED BY HIGH-POWER
SHORT-WAVE RADIATION OF THE “SURA” GROUND-BASED FACILITY**

A. O. Ryabov and V. L. Frolov

We discuss the relationship between the electron temperature and the potential of the body of an artificial Earth satellite in the upper ionosphere. The formula for the satellite potential is analyzed, and the limitations of the theoretical representation are shown. The experimental results obtained within the framework of the Sura—DEMETER and Sura—SWARM programs are considered and serve as the basis for analysis of three cases: (i) when artificial ionospheric inhomogeneities are excited in the upper ionosphere stimulated by high-power short radio waves, (ii) when no inhomogeneities are excited in the process of stimulation of the upper ionosphere; and (iii) when measurements were performed in the natural ionosphere. It was found that the greatest value of the coefficient of correlation between the variations in the electron temperature and the satellite potential is observed in the presence of the ionospheric inhomogeneities. The applied relevance of the obtained results is discussed.