

УДК 533.951+537.86+537.876

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ НА ВЫСОТАХ 450÷500 км ПРИ РАБОТЕ СТЕНДА «СУРА»

В. Л. Фролов^{1,3*}, Р. Ю. Лукьянова², А. С. Белов^{1,4}, И. А. Болотин¹,
М. Н. Добровольский², А. О. Рябов¹, Е. А. Шорохова⁴

¹ НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

² Геофизический центр РАН, г. Москва;

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань;

⁴ Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю. Е. Седакова, г. Нижний Новгород, Россия

Обсуждаются результаты выполненных с помощью спутников серии SWARM измерений характеристик искусственных плазменных возмущений, которые возбуждаются на высотах 450÷500 км при модификации F_2 -слоя ионосферы мощными короткими радиоволнами, излучаемыми стендом «Сура». Установлено, что на этих высотах наблюдаются вариации температуры и концентрации плазмы в возмущённой магнитной силовой трубке; при этом не обнаруживаются дакты с увеличенной концентрацией плазмы, которые ранее были зарегистрированы на высотах около 660 км. Результаты выполненных исследований сравниваются с данными измерений с помощью спутника DEMETER и с радиотомографическими измерениями. Отмечается, что с помощью спутников SWARM были впервые зарегистрированы продольные токи, которые индуцируются в возмущённой ионосфере при работе стенда «Сура».

ВВЕДЕНИЕ

Выполненные на среднеширотном стенде «Сура» (НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород) эксперименты по модификации F_2 -области ионосферы Земли мощными короткими радиоволнами с обыкновенной (О) поляризацией убедительно показали, что если частота волны накачки (f_0) немного ниже критической частоты F_2 -области ионосферы f_{0F_2} , то в ионосферной плазме развивается интенсивная искусственная ионосферная турбулентность [1–5]. При этом в вечерних и ночных условиях генерация искусственных плазменных возмущений (в первую очередь, возмущений концентрации и температуры плазмы) обнаруживается во всей толще ионосферы от E -области до высот порядка 1 000 км и более. Сами возмущения на уровне F_2 -области ионосферы в горизонтальном направлении регистрируются на расстояниях до 200÷500 км, далеко выходя за область, засвеченную пучком мощных радиоволн [2, 4, 5]. Отметим результаты выполненных на стенде «Тромсё» (Норвегия) экспериментов, в которых при зондировании возмущённой области ионосферы радаром некогерентного рассеяния были обнаружены сильное увеличение температуры электронов в F_2 -области до высот $h \approx 600$ км (т. е., по крайней мере, до предельной высоты регистрации возмущений с помощью используемого радара) и вынос ионов вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля из нагретой области ионосферы [6].

Сильный разогрев плазмы в условиях вечерней и ночной ионосферы приводит к тому, что вблизи уровня отражения волны накачки наблюдается формирование области с пониженной концентрацией плазмы. Эта область оказывается заполненной искусственными ионосферными неоднородностями с ортогональными к геомагнитному полю размерами $l_{\perp}$ от долей метра до

* frolov@nirfi.unn.ru

десятков километров, которые возбуждаются в результате развития различного рода неустойчивостей [1, 2, 4, 5]. Отмеченные выше исследования [3–6], а также эксперименты, выполненные на стенде HAARP (Аляска, США) [7, 8], позволили доказать важную роль эффекта «магнитного зенита». С учётом данного эффекта в той части возмущённой области ионосферы, где мощная радиоволна с О-поляризацией распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля вблизи высоты её отражения, наблюдается генерация наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности. Природа и роль эффекта «магнитного зенита» подробно рассматриваются в работе [9].

Несмотря на достигнутые успехи в исследовании свойств искусственной ионосферной турбулентности, до сих пор ещё остаётся ряд нерешённых проблем, касающихся формирования пространственной структуры возмущённой области ионосферы. К ним можно отнести: 1) природу механизмов генерации искусственных неоднородностей на высотах нижней ионосферы (в E -области); 2) причины, приводящие к генерации искусственных неоднородностей далеко за пределами диаграммы направленности излучения мощных радиоволн; 3) особенности процессов переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля вверх и вниз от области их генерации; 4) природу механизмов формирования дактов концентрации плазмы на высотах внешней ионосферы при модификации F_2 -области мощными короткими радиоволнами и др. Без знания ответов на все эти вопросы нельзя считать завершённой работу по созданию эмпирической модели генерации искусственной ионосферной турбулентности.

Исследования свойств плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы активно выполнялись на стенде «Сура» с 2005 года с помощью бортовой аппаратуры спутников DEMETER и DMSP (высоты орбит примерно 660 и 840 км соответственно). Результатом этих исследований явилось обнаружение формирования на указанных высотах дактов с избыточной концентрацией плазмы в магнитной силовой трубке, опирающейся на область с сильно развитой искусственной ионосферной турбулентностью вблизи высоты отражения волны накачки [10–15]. Эти исследования позволили определить условия формирования дактов при модификации F_2 -области ионосферы, определить их характеристики и показать, что их генерация в утренние, вечерние и ночные часы — обычно наблюдаемое явление. Последнее может быть использовано в экспериментах для решения задач, связанных с модификацией ионосферно-магнитосферных связей и взаимодействий.

Целью данной работы является анализ результатов выполненных в 2016–2017 годах исследований характеристик возмущений концентрации и температуры плазмы, индуцируемых на высотах 450–500 км при работе стенда «Сура» и детектируемых бортовой аппаратурой спутников SWARM. Следует подчеркнуть, что в настоящее время имеется лишь ограниченный объём данных о свойствах плазменной турбулентности, регистрируемой на данных высотах (см., например, работу [6]). В этом интервале высот имеет место переход от области с интенсивной генерацией искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения волны накачки (области сильного нагрева ионосферы вблизи максимума F_2 -слоя, формирования фокусирующей линзы и интенсивной генерации искусственных ионосферных неоднородностей с различными масштабами) к области переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу и формирования дактов с повышенной концентрацией плазмы. Считается, что формирование дактов определяется выносом плазмы из области её сильного разогрева [13–15]. Поэтому знание характеристик плазменной турбулентности в области высот около 500 км необходимо для определения особенностей механизмов транспорта плазменных возмущений в возмущённой магнитной силовой трубке и для верификации модели формирования дактов с избыточной концентрацией плазмы.

1. ОРГАНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Группировка европейских спутников серии SWARM, состоящая из трёх идентичных аппаратов, была выведена на орбиту 22 ноября 2013 года. Спутники имеют низкие круговые орбиты, лежащие в меридиональной плоскости. При этом два спутника (А и С) летают на высоте около 450 км параллельно друг другу на расстоянии до 500 км, наклонение орбиты $87,4^\circ$. Третий спутник (В) летает в другой меридиональной плоскости на высоте 500 км, наклонение орбиты 88° . Постепенно смещаясь по долготе, орбиты этих спутников за $7\div 10$ месяцев полёта покрывают все долготные секторы Земного шара.

Все три спутника SWARM оснащены идентичной аппаратурой. Основным их модулем является комплекс для магнитных измерений: высокочувствительные векторный и скалярный магнетометры для измерения величины и направления полного магнитного поля и его вариаций с точностью до $0,1\div 0,5$ нТл. Эти магнетометры позволяют проводить измерения для решения широкого круга задач, включая измерения напряжённости главного магнитного поля Земли, литосферного поля и внешнего магнитного поля, которое создаётся электрическими токами, текущими между магнитосферой и ионосферой (продольными токами). Кроме магнитометрической аппаратуры, спутники SWARM оснащены инструментами EFI для измерения электрического поля. Инструмент EFI включает в себя два ленгмюровских зонда для детектирования концентрации и температуры электронов в окружающей плазме (каждые 0,5 с), а также электрического потенциала корпуса спутника. Более подробное описание аппаратуры спутников SWARM можно найти в работе [16].

Используемый в наших экспериментах по модификации ионосферы мощными короткими радиоволнами нагревный стенд «Сура» расположен вблизи р/п Васильсурск в 120 км к востоку от г. Нижнего Новгорода (координаты стенда: $56,15^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.) [3]. Эффективная мощность излучения стенда в режиме синхронного излучения всех трёх его модулей с максимальной мощностью составляет $P_{\text{eff}} \approx 80$ МВт на частоте излучения $f_0 \approx 4,3$ МГц, увеличиваясь с ростом f_0 до $P_{\text{eff}} \approx 180$ МВт для $f_0 \approx 6,5$ МГц. Во всех рассматриваемых в данной работе экспериментах стенд излучал мощные радиоволны с О-поляризацией при наклоне диаграммы направленности излучения волны накачки на 14° на юг, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счёт эффекта «магнитного зенита». В выполняемых на стенде «Сура» экспериментах излучение волны накачки начиналось, как правило, за 16 мин до пролёта спутника через возмущённую магнитную силовую трубку. Как показали выполненные ранее эксперименты и модельные расчёты, этого времени достаточно для практически полного развития искусственной ионосферной турбулентности в ионосфере в вечерние и ночные часы и заполнения магнитной силовой трубки искусственными плазменными возмущениями, по крайней мере, до высот порядка 700 км.

2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В 2016–2017 годах было выполнено 58 сеансов нагрева ионосферы по программе «Сура»–SWARM при различных условиях их проведения. Полученные результаты позволили сформулировать необходимые требования для возбуждения возмущений концентрации и температуры электронов на высотах $h \approx 450\div 500$ км и определить их основные характеристики. Было установлено, что генерация искусственных плазменных возмущений регистрируемого уровня наблюдалась только при работе стенда в вечерние и ночные часы в условиях, когда частота мощной радиоволны не превышала 6 МГц, была ниже критической частоты f_{0F_2} , высота отражения волны накачки была больше 200 км, а орбита спутника проходила на расстоянии меньше 60 км от центра

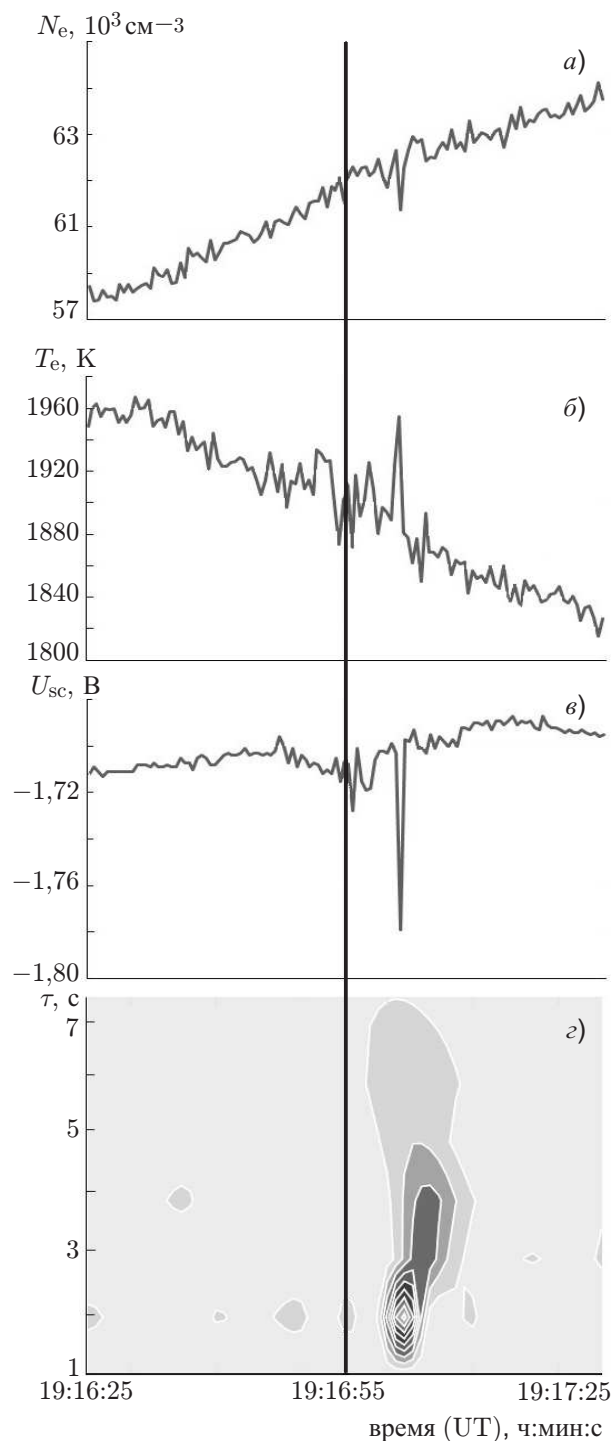


Рис. 1. Результаты измерений концентрации электронов N_e (а), температуры электронов T_e (б), потенциала корпуса спутника U_{sc} (в) и вэйвлет-преобразование вариаций концентрации плазмы (г), в эксперименте 27.04.2016. Вертикальной линией отмечено время $T^* = 19:16:55$ UT; на панели (г) τ — период гармоника вариаций концентрации плазмы

возмущённой магнитной силовой трубки. В большинстве случаев генерация искусственных плазменных возмущений наблюдалась, когда эффективная мощность излучения волны накачки была не меньше 40 МВт. Высокий уровень взаимодействия мощной радиоволны с плазмой в проводимых измерениях подтверждался следующими фактами. На ионограммах вертикального зондирования для расположенного на стенде «Сура» ионозонда регистрировалось возбуждение сильного или очень сильного F -рассеяния, когда уширение ветвей ионограммы по частоте составляло $0,3 \div 0,5$ МГц или превышало 0,5 МГц соответственно, а также наблюдалось подавление ветки О-моды из-за развития эффекта аномального ослабления зондирующих ионосферу радиоволн [1, 4]. Важно, что все эти условия для генерации плазменных возмущений на высотах около 500 км полностью повторяют условия для формирования дактов концентрации плазмы на высотах внешней ионосферы (около 660 км) [12], что указывает на общность механизмов, определяющих развитие этих двух явлений.

Ниже для демонстрации свойств наблюдаемых возмущений концентрации и температуры плазмы и большой изменчивости их характеристик приводятся результаты спутниковых измерений для четырёх сеансов нагрева ионосферы мощными короткими радиоволнами. Также представлены результаты измерений потенциала спутника.

2.1. Сеанс 25 апреля 2016 года

Спутник SWARM В пролетал в условиях ночной ионосферы (время максимального сближения спутника с осью трубки $T^* = 19:16:55$ UT) на высоте 514 км в направлении с севера на юг практически через центр возмущённой магнитной силовой трубки. Модификация ионосферы началась за 16 мин до пролёта спутника через трубку. Волна накачки излучалась на частоте $f_0 = 4300$ кГц при высоте её отражения $h \approx 240$ км и критической частоте $f_{0F_2} = 4,6$ МГц. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 10$). Особенностью этого сеанса является достаточно низкая эффективная мощ-

ность излучения волны накачки: $P_{\text{eff}} = 20$ МВт. Тем не менее, даже при такой низкой P_{eff} наблюдалось развитие очень сильной диффузности на ионограммах, а приборами спутника были зарегистрированы хорошо заметные искусственные вариации концентрации и температуры плазмы.

На рис. 1 представлены результаты измерений концентрации электронов N_e (панель *a*), температуры электронов T_e (*b*) и электрического потенциала корпуса спутника U_{sc} (*в*). По оси абсцисс отложено мировое (UT), отличающееся от московского времени T_{MSK} на три часа. Вертикальной линией отмечено время $T^* = 19:16:55$ UT. Из результатов измерений концентрации N_e видно появление искусственных вариаций плотности плазмы в интервале времени от 19:16:59 до 19:17:08 UT со средней величиной $1 \div 3$ % и максимальными значениями в 19:17:02 UT (в южной части возмущённой магнитной силовой трубки). Эти измерения позволяют оценить размер области с искусственными вариациями концентрации плазмы вдоль орбиты спутника величиной около 70 км, что соответствует размеру области ионосферы, засвеченной пучком мощных радиоволн. При этом центр области с максимальными возмущениями смещён на юг на 50 км от точки максимального сближения, что отражает влияние эффекта «магнитного зенита». На несколько большем интервале времени с 19:16:46 до 19:17:10 UT (на расстоянии примерно 180 км вдоль орбиты спутника) регистрируются искусственные вариации температуры электронов со средней величиной $1 \div 2$ % и максимальными значениями около 3 % в 19:17:02 UT. Увеличения среднего уровня концентрации плазмы в этом сеансе не наблюдалось, а рост температуры электронов не превышал 1 %. Из рис. 1 (панели *a–в*) хорошо видно, что выделяющийся на записи максимум температуры T_e в 19:17:02 UT точно совпадает с минимумом концентрации N_e и с максимумом величины отрицательного потенциала корпуса спутника. Ниже мы ещё вернёмся к обсуждению такого рода эффектов корреляции.

На рис. 1г приведены результаты вейвлет-анализа вариаций концентрации плазмы. Видно, что во время пролёта спутника через возмущённую магнитную силовую трубку (на рис. 1 это соответствует времени 19:16:59–19:17:10 UT) наиболее сильные вариации имеют характерный период $\tau \approx 2$ с, что соответствует размерам неоднородностей около 16 км вдоль орбиты спутника (практически в ортогональном к геомагнитному полю направлении).

2.2. Сеанс 27 августа 2016 года

Спутник SWARM C в условиях вечерней ионосферы ($T^* = 17:22:06$ UT) пролетал на высоте 452 км в направлении с юга на север в 18 км к западу от центра возмущённой магнитной силовой трубки. Модификация ионосферы началась за 16 мин до пролёта спутника, волна накачки излучалась на частоте $f_0 = 4300$ кГц с эффективной мощностью $P_{\text{eff}} = 55$ МВт. Во время сеанса величина f_{0F_2} уменьшилась от 5,1 до 4,9 МГц, высота отражения волны накачки составляла $h \approx 230$ км. На ионограммах регистрировался спорадический слой E_s с критической частотой f_{0E_s} до 4,5 МГц. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 9$). Во время нагрева ионосферы наблюдалось развитие очень сильного F -рассеяния.

На рис. 2 представлены результаты измерений концентрации электронов N_e (панель *a*), температуры электронов T_e (*b*) и потенциала корпуса спутника U_{sc} (*в*). Вертикальной линией отмечено время $T^* = 17:22:06$ UT. Из результатов измерений концентрации N_e видно появление её искусственных вариаций со средней величиной $2 \div 4$ % в интервале времени от 17:21:58 до 17:22:12 UT или на расстоянии около 120 км вдоль орбиты спутника. При этом центр данной области с более сильными вариациями N_e и T_e смещён приблизительно на 30 км к югу от центра возмущённой магнитной силовой трубки из-за влияния эффекта «магнитного зенита». В этом сеансе также не отмечается увеличения среднего уровня концентрации плазмы; наоборот, здесь, скорее, можно

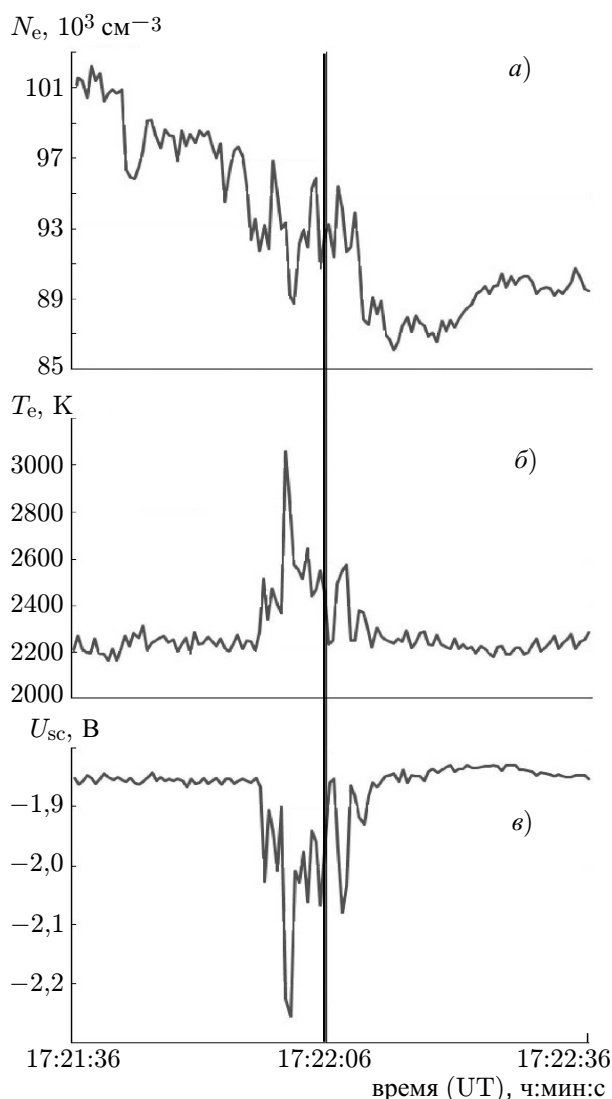


Рис. 2. Результаты измерений концентрации электронов N_e (а), их температуры T_e (б) и потенциала корпуса спутника U_{sc} (в) в эксперименте 27.08.2016. Вертикальной линией отмечено время $T^* = 17:22:06$ UT

отметить его уменьшение на величину около 2 %. Это может свидетельствовать о том, что орбита спутника ещё проходила через верхнюю часть возмущённой ионосферы области с пониженной концентрацией плазмы. В то же время, в интервале времени от 17:21:58 до 17:22:12 UT наблюдается явное увеличение среднего значения величины T_e примерно на 14 % и появление сильных искусственных вариаций температуры электронов со средней величиной 8 % и максимальным значением до 36 % в $T = 17:22:01$ UT. Более высокие значения вариаций величин N_e и T_e в этом сеансе по сравнению с предыдущим сеансом, при всех прочих равных условиях, естественно связывать с более высокой мощностью излучения волны накачки и более высоким уровнем развития искусственной ионосферной турбулентности.

Обращает на себя внимание чёткая корреляция поведения температуры T_e и потенциала U_{sc} вплоть до деталей, когда увеличение температуры плазмы сопровождается увеличением отрицательного потенциала корпуса спутника (в рассматриваемом случае до величины $-2,3$ В). Согласно [17], в случае распределения энергии электронов по закону Больцмана абсолютная величина потенциала металлического корпуса спутника в первом приближении пропорциональна величине κT_e , где κ — постоянная Больцмана; в этом случае вариации температуры T_e напрямую влияют на величину потенциала U_{sc} . Из рис. 2 видно, что канал измерения U_{sc} имеет гораздо меньшую зашумлённость по сравнению с каналом измерения T_e (0,4 % и 2 % для данного сеанса соответственно), что в ряде случаев использовалось нами для выявления слабых искусственных вариаций T_e , на основе регистрации вариаций величины U_{sc} .

2.3. Сеанс 23 мая 2017 года

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 $f_0 = 4300$ кГц при $f_{0F_2} = 4,6$ МГц с эффективной мощностью $P_{\text{eff}} = 50$ МВт, высота отражения волны накачки составляла $h \approx 235$ км. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 15^-$). Во время нагрева ионосферы на ионограммах наблюда-

лось развитие достаточно сильной диффузности. Особенностью этого сеанса являлось то, что эксперимент проводился при наличии полупрозрачного спорадического слоя E_s с частотой экранирования около 3 МГц и критической частотой f_{0E_s} до 7 МГц. Присутствие столь мощного спорадического слоя могло приводить не только к уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности волны накачки, что выразилось в более слабом F -рассеянии по сравнению с сеансом 27 августа 2016 года, выполненном в близких (не считая слоя E_s) условиях, но и к полному экранированию верхней ионосферы в отдельных участках возмущённой области ионосферы, как это наблюдалось в работе [18].

На рис. 3 представлены результаты измерений концентрации электронов N_e (панель а), их температуры T_e (б) и потенциала корпуса спутника U_{sc} (в). Вертикальной линией отмечено время $T^* = 17:11:40$ UT. Из результатов измерений концентрации N_e в интервале времени 17:11:23–17:11:48 UT, т.е. на дальностях до 140 км к югу и до 60 км к северу от центра возмущённой магнитной силовой трубки (или на расстоянии около 200 км вдоль орбиты спутника), видно появление областей с сильно уменьшенными значениями N_e (до 7 %) с характерным пространственным масштабом 45 км. Такая структура вариаций концентрации плазмы, как отмечалось выше, может быть связана с облачной структурой спорадического слоя E_s , которая проецируется на верхнюю ионосферу. Следствием этого является локальность нагрева плазмы, выражающегося в увеличении T_e (см. панель б), уменьшение её концентрации и возбуждение искусственной ионосферной турбулентности вблизи высоты отражения волны накачки. При этом горизонтальный размер облаков непрозрачного слоя E_s можно оценить величиной около 20 км. Приблизительно в том же интервале времени наблюдалось увеличение среднего значения температуры T_e приблизительно на 2 % с вариациями её амплитуды 1÷2 %. Увеличение значений T_e , как и раньше, сопровождается уменьшением потенциала спутника. Видно, что центр области с максимальными плазменными возмущениями смещён приблизительно на 25 км к югу от центра возмущённой магнитной силовой трубки (из-за влияния эффекта «магнитного зенита»).

Несколько позднее в интервале времени от 17:11:50 до 17:12:12 UT (на расстоянии 80÷260 км к северу от центра возмущённой магнитной силовой трубки) регистрируется появление второй группы вариаций концентрации и температуры плазмы, которые, судя по области их регистрации, простирающейся далеко на север, имеют, скорее всего, естественный характер. Однако нельзя

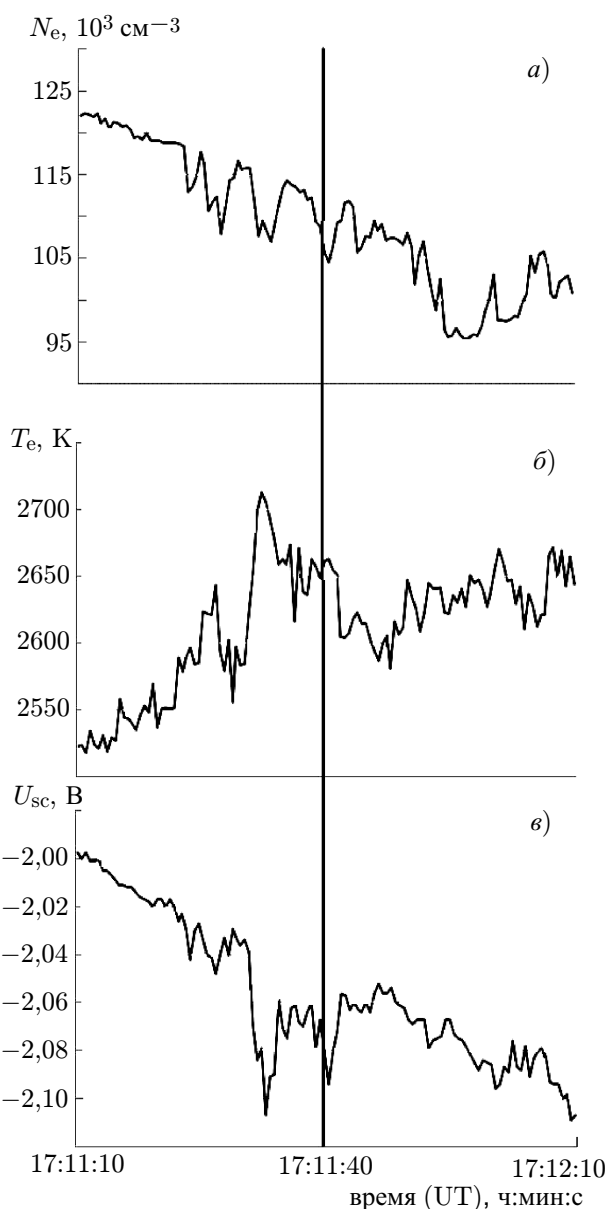


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 23.05.2017 ($T^* = 17:11:40$ UT)

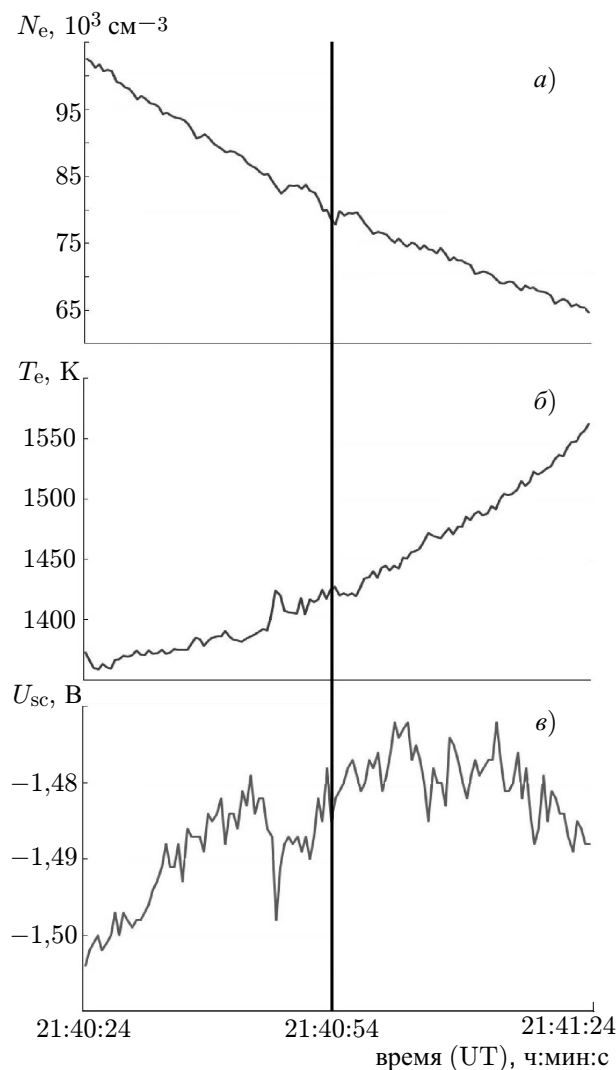


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для 27.05.2017 ($T^* = 21:40:54$ UT)

время нагрева ионосферы на ионограммах продолжало наблюдаться развитие сильной диффузности; её уровень сильно ослаб, только когда значение f_{0F_2} упало до 4,3 МГц.

Возможность генерации интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей при частоте волны накачки, превышающей частоту f_{0F_2} на величину примерно до 200 кГц, неоднократно отмечалась ранее (см., например, [21, 22]). Этот эффект связан с тем, что даже в этих условиях частота верхнегибридного резонанса (в нашем случае $f_{UHf} \approx 4,56$ МГц) остаётся меньше f_{0F_2} . При этом, хотя и на меньшем уровне, продолжается развитие тепловой параметрической неустойчивости, особенно в условиях уже сильно развитой искусственной ионосферной турбулентности.

На рис. 4 представлены результаты измерений концентрации электронов N_e (панель *a*), их температуры T_e (*б*) и потенциала корпуса спутника U_{sc} (*в*). Вертикальной линией отмечено время $T^* = 21:40:54$ UT.

Из результатов измерений очевидно наличие искусственных вариаций концентрации плазмы N_e с величиной 2 % и размерами $30 \div 40$ км в интервале времени $T = 21:40:48 \div 21:41:01$ UT, т. е. на расстояниях от 60 км к югу до 50 км к северу от центра возмущённой магнитной сило-

полностью исключать, что эта группа плазменных возмущений является и результатом развития искусственной ионосферной турбулентности в области фокусировки мощных радиоволн на искусственной крупномасштабной неоднородности или на больших градиентах концентрации плазмы, как это обсуждалось, например, в работах [19, 20].

2.4. Сеанс 27 мая 2017 года

Спутник SWARM В пролетал в условиях ночной ионосферы ($T^* = 21:40:34$ UT) на высоте 512 км в направлении с севера на юг в 25 км к востоку от центра возмущённой магнитной силовой трубки. Особенностью этого сеанса являлось то, что модификация ионосферы проводилась с 20:00:00 до 21:27:00 UT на частоте $f_0 = 4740$ кГц в режиме 3 мин — излучение, 3 мин — пауза, в условиях, когда значение критической частоты f_{0F_2} непрерывно уменьшалось: до 4,7 МГц в 20:30:00 UT, до 4,5 МГц в 21:00:00 UT и до 4,3 МГц в 21:30:00 UT. Последний сеанс нагрева проводился с 21:24:00 до 21:27:00 UT и закончился почти за 14 мин до пролёта спутника. При этом с 21:00:00 до 21:27:00 UT модификация ионосферы осуществлялась уже в условиях нагрева «на просвет». Эффективная мощность излучения волны накачки в этих экспериментах составляла $P_{\text{eff}} = 85$ МВт, высота её отражения была около 280 км. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 13^+$). Отмечалось, что ещё при $f_{0F_2} \approx 4,5$ МГц во время

вой трубки, или на расстоянии 110 км вдоль орбиты спутника. Центр вариаций немного сдвинут к югу от центра трубки. В этой же области наблюдается слабое увеличение средней температуры электронов на величину около 1 % и вариации T_e до 0,7 %, которые наиболее сильны в 30 км южнее центра возмущённой трубки (влияние эффекта «магнитного зенита»). Более чётко вариации температуры T_e проявляются здесь в канале регистрации потенциала корпуса спутника.

Полученные в этом сеансе измерений результаты показывают, что генерация плазменных возмущений на высотах 500 км имеет место и в условиях, когда частота волны накачки может даже немного превышать критическую частоту F_2 -слоя ионосферы, но ещё выполняются условия развития тепловой параметрической неустойчивости. Время релаксации этих возмущений, исходя из времени окончания последнего цикла излучения волны накачки в 21:27:00 UT, заведомо превышает 14 мин. Однако оно может составлять и 40 мин, если время прекращения их возбуждения отсчитывать от 21:00:00 UT, когда значение критической частоты f_{0F_2} упало до 4,5 МГц и стало ниже частоты верхнегибридного резонанса для волны накачки в плазме f_{UHR} . Полученные экспериментальные данные позволяют также заключить, что времена релаксации возмущений T_e имеют меньшие значения, чем времена релаксации возмущений концентрации плазмы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ВДОЛЬ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для моделирования эффектов нагрева ионосферы мощным коротковолновым радиоизлучением в данной работе использован открытый программный код двумерной модели низко- и среднеширотной ионосферы SAMI2 (Sami2 is Another Model of the Ionosphere) [23], позволяющий описывать динамику околоземной плазмы во всей возмущённой магнитной силовой трубке. В работе [24] эта модель была модифицирована для проведения расчётов в условиях нагрева F_2 -области среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами, когда за счёт эффекта аномального ослабления основная доля энергии волны накачки О-поляризации поглощается в локальной по высоте области немного ниже высоты её отражения, что приводит к сильному увеличению температуры электронов [6, 9, 25, 26]. Нагрев плазмы F_2 -области ионосферы за счёт мощного коротковолнового радиоизлучения О-поляризации учитывается в модели с помощью включения дополнительного источника тепла Q_{HF} в уравнение теплопроводности для электронов:

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - \frac{2}{3N_e} \nabla(K \nabla T_e) = Q_{en} + Q_{ei} + Q_{phe} + Q_{HF}. \quad (1)$$

Здесь Q_{en} , Q_{ei} и Q_{phe} — источники энергии за счёт столкновений электронов с нейтральными частицами, ионами и фотоэлектронами соответственно, а Q_{HF} представляется в виде модельного источника

$$Q_{HF} = \frac{\kappa_a(N_e)}{N_e \Delta z} S_t, \quad (2)$$

где S_t — поток энергии волны накачки, κ_a — коэффициент её аномального поглощения, Δz — характерный размер источника нагрева по высоте (соответствует области аномального поглощения волны накачки, расположенной между высотами её отражения и верхнегибридного резонанса). В зависимости от профиля F_2 -слоя $\Delta z \approx 2 \div 10$ км.

Коэффициент аномального поглощения κ_a энергии волны накачки для приближения холодной плазмы при гауссовом спектре вытянутых неоднородностей определяется формулой [26]

$$\kappa_a = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega_{He}}} \frac{(\delta N)^2}{N_{UHR}^2} (1 - \omega_{He}/\omega_0)^2 \frac{\delta_1}{\Delta^2} \exp(-\delta_1/\Delta), \quad (3)$$

где

$$\Delta = \frac{N_e - N_{\text{UHR}}}{N_{\text{UHR}}}, \quad (4)$$

$$\delta_1 = \frac{1}{2}(r_0\omega_{\text{He}}/c)^2(1 + \omega_{\text{He}}/\omega_0), \quad (5)$$

$$\overline{(\delta N)^2} = \delta N_m^2 \left(\frac{a}{2r_0} \sqrt{\pi/2} \right), \quad (6)$$

где a — характерный масштаб изменения концентрации плазмы в неоднородности, r_0 — поперечный масштаб неоднородности, $\omega_0 = 2\pi f_0$, ω_{He} — гирочастота электронов, $N_{\text{UHR}} = m_e(\omega_0^2 - \omega_{\text{He}}^2)/(4\pi e^2)$ — концентрация плазмы на высоте верхнегибридного резонанса мощной радиоволны, $\delta N = \Delta N/N$ — относительное изменение концентрации, δN_m — максимальное возмущение концентрации в центре неоднородности.

Величина потока энергии мощной радиоволны находится из решения уравнения переноса:

$$\frac{dS_t}{dt} = -2\frac{\omega_0}{c}\kappa_a S_t. \quad (7)$$

Ниже приводятся результаты численного моделирования, выполненного для рассмотренного в работе сеанса нагрева 27 августа 2016 года, для которого вариации измеренных значений концентрации и температуры электронов вдоль орбиты спутника показаны на рис. 2. Расчёты проводились для неоднородностей с величиной возмущения концентрации $\Delta N_m = 0,02N_{\text{UHR}}$ и характерным масштабом $a = 0,25$ м при условии, что расстояние между неоднородностями составляет $6a$, т. е. граница неоднородности располагается на расстоянии $r_0 = 3a$ от её центра.

Результаты численного моделирования возмущений околоземной плазмы на высоте 444 км, соответствующей высоте орбиты спутника SWARM C, для момента времени $T^* = 17:22:06$ UT представлены на рис. 5. Из него хорошо видно, что индуцируемые возмущения концентрации имеют заметно меньшую величину относительных вариаций ($2 \div 5$ %), чем вариации температуры (около 30 %). Такое поведение концентрации и температуры плазмы соответствует полученным экспериментальным данным для этого сеанса измерений: $\Delta N \approx 2 \div 4$ % и $\Delta T \approx 8$ % с максимальным значением $\delta T = 36$ %. Согласно расчётам, на высоте 444 км имеет место двугорбая пространственная структура возмущений концентрации плазмы с провалом вдоль оси возмущённой силовой трубки, в то время как в пространственном распределении возмущений температуры электронов наблюдается лишь один широкий максимум, положение которого совпадает с минимумом концентрации N_e . Следует заметить, что, согласно расчётам, на высотах $450 \div 500$ км должно иметь место увеличение концентрации плазмы в возмущённой магнитной силовой трубке (или формирование дакта с избыточной концентрацией плазмы). Это не наблюдается в измерениях, где увеличение N_e , если оно и имеет место, не превышает 1 % и не обнаруживается на фоне регистрируемых неоднородностей концентрации. Проведённое моделирование показывает, что двугорбая пространственная структура возмущений концентрации обусловлена вытеснением плазмы из центральной области возмущённой магнитной силовой трубки, где имеет место наиболее сильный её нагрев; при этом на начальной фазе нагрева продолжительностью порядка 5 мин реализуется распределение с одним максимумом концентрации плазмы.

Выполненные расчёты показали, что для высот более 500 км при имеющихся условиях нагрева возмущения концентрации плазмы имеют форму уединённого дакта концентрации, что согласуется с ранее полученными результатами экспериментов «Сура»–DEMETER [12]. Эффектов вытеснения плазмы из центра возмущённой области здесь не наблюдается, потому что за

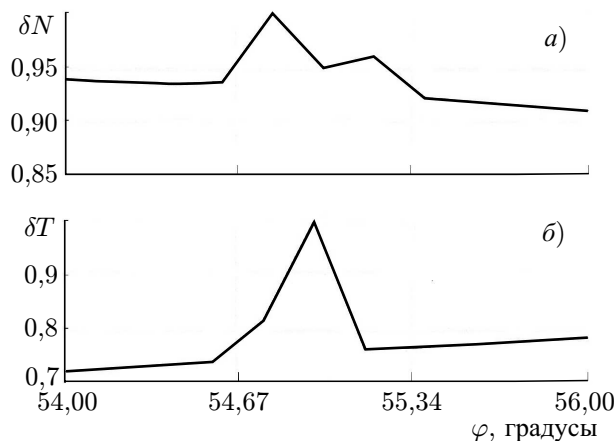


Рис. 5. Широтные зависимости расчётных вариаций концентрации и температуры электронов на высоте 444 км для сеанса 27.08.2016, $T^* = 17:22:06$ UT

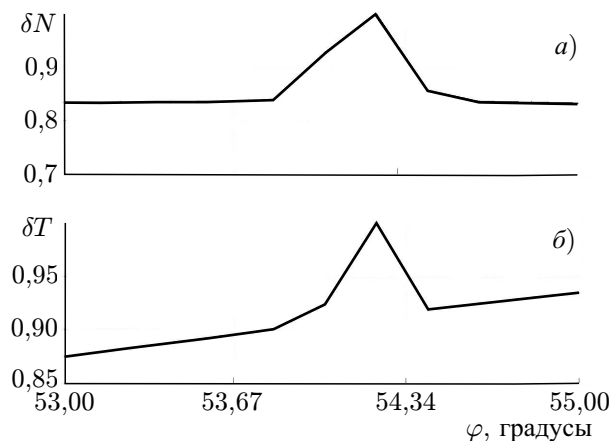


Рис. 6. Широтные зависимости расчётных вариаций концентрации и температуры электронов на высоте 660 км для сеанса 27.08.2016 $T^* = 17:22:06$ UT

время нагрева температура электронов на этих высотах увеличивается лишь на 10÷15 % относительно фонового уровня. Для подтверждения сказанного на рис. 6 представлены результаты численного моделирования вариаций концентрации плазмы в возмущённой магнитной силовой трубке на высоте 660 км (на высоте орбиты спутника DEMETER) для условий, соответствующих представленному на рис. 2 сеансу. Видно, что увеличение концентрации плазмы в дакте составило около 20 % при росте температуры электронов примерно на 11 %. При этом с увеличением высоты от 440 до 660 км относительный рост температуры электронов уменьшается с 30 до 10 %, в то время как относительное увеличение концентрации плазмы растёт с 9 до 20 %. Отметим, что такой характер их изменения соответствует результатам экспериментов. Из рис. 5 и 6 можно также сделать вывод, что размер области с возмущениями T_e и N_e вдоль орбиты спутника практически не изменяется с высотой, оставаясь равным 80÷90 км, т. е. определяется размерами возмущённой магнитной силовой трубки. Как будет показано ниже, последнее не соответствует результатам экспериментов.

4. ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВАРИАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ ПО ДАННЫМ РАДИОТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В дополнение к рассмотрению выполненных с помощью спутника SWARM измерений вариаций концентрации и температуры электронов плазмы в возмущённой магнитной силовой трубке проанализируем результаты эксперимента по изучению пространственной структуры возмущённой области ионосферы, проведённого 18 августа 2011 года, когда спутник «Космос 2407» пролетал над станцией «Сура» практически в зените ($T^* = 18:48$ UT = 22:48 MSK) [27]. Модификация ионосферы осуществлялась на частоте 4785 кГц с эффективной мощностью $P_{\text{eff}} = 50$ МВт в спокойных геомагнитных условиях ($\Sigma K_p = 11^+$) при критической частоте $f_{0F_2} \approx 5,2$ МГц. Нагрев ионосферы проводился с 21:01 до 22:51 MSK в режиме 10 мин — излучение, 10 мин — пауза. Спутник пролетал через возмущённую магнитную силовую трубку во время цикла нагрева 22:41–22:51 MSK. В целом, условия выполнения эксперимента были близки к условиям проведения анализируемых в данной работе измерений.

Из представленной в работе [27] на рис. 12 реконструкции вариаций концентрации плазмы в широкой области пространства над станцией «Сура» хорошо видно следующее. На высотах

250÷400 км имеет место формирование полости с пониженной (до 30 %) концентрацией плазмы; в интервале высот 400÷500 км регистрируются вариации концентрации без видимых изменений её среднего уровня, и только на высотах $h \geq 500$ км начинается обнаруживаться формирование дакта с повышенной плотностью, который хорошо регистрируется до высот около 800 км (верхней границы высот возможного построения радиотомографической реконструкции). Как показала детальная обработка полученных в этом сеансе данных, в интервале высот 500÷660 км величина относительного изменения концентрации плазмы в дакте δN остаётся практически неизменной: $\delta N \approx 6\%$; с ростом высоты от 500 до 800 км наблюдается рост размера дакта вдоль орбиты спутника в $1,5 \div 2$ раза.

Как видно из анализа радиотомографической реконструкции и результатов спутниковых измерений вариаций концентрации плазмы, в целом наблюдается совпадение характера изменения вариаций концентрации плазмы на высотах 450÷660 км в возмущённой магнитной силовой трубке. Имеющие место отличия касаются величины регистрируемых вариаций концентрации и температуры электронов, а также увеличения с высотой размера дакта в поперечном к геомагнитному полю направлении.

5. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В работе впервые представлены результаты спутниковых измерений свойств плазменных возмущений в области высот 450÷500 км. Эта область является переходной от области ионосферы вблизи высоты отражения волны накачки (где имеет место резонансное взаимодействие мощной радиоволны О-поляризации с плазмой F_2 -области, генерация интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и сильный разогрев электронов, следствием чего является формирование полости с дефицитом плазмы — фокусирующей линзы) к области высот внешней ионосферы, где регистрируется формирование дактов с повышенной концентрацией плазмы внутри возмущённой магнитной силовой трубки, опирающейся на область с сильно развитой искусственной ионосферной турбулентностью. Измерения плазменных возмущений проводились с использованием аппаратуры спутников серии SWARM. Модификация ионосферы осуществлялась радиоизлучением стенда «Сура» в поздние вечерние и ночные часы в спокойных геомагнитных условиях, когда волна накачки излучалась в диапазоне частот 4,3÷4,8 МГц с эффективной мощностью 20÷100 МВт.

Выполненные измерения характеристик плазменных возмущений позволили установить следующее.

На высотах 450÷500 км вариации концентрации и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты спутника (приблизительно вдоль линии север–юг), что в $1,5 \div 3$ раза превышает как горизонтальные размеры центральной части возмущённой области ионосферы на уровне отражения волны накачки, где наблюдаются развитие наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и наиболее сильный разогрев плазмы, так и размеры дактов, генерируемых на высотах около 660 км. Отмечается, что, как и в случае формирования дактов, на пространственное распределение искусственных плазменных возмущений на высотах около 500 км сильное влияние оказывает эффект «магнитного зенита».

В области высот 450÷500 км наблюдаются средний рост температуры электронов на $2 \div 14\%$ и сильные флуктуации её значений ($1 \div 8\%$), причём имеет место практически полная корреляция между изменениями величины T_e и соответствующими изменениями отрицательного потенциала корпуса спутника, что указывает на больцмановский закон распределения электронов по энергии в окружающей спутник плазме [17]. Сравнивая результаты измерений с помощью спутников SWARM и DEMETER, можно заключить, что величина вариаций T_e с ростом высоты уменьша-

ется.

На высотах $450 \div 500$ км с точностью до 1 % не было обнаружено характерного для дактов увеличения концентрации плазмы с размерами около 100 км поперёк линий геомагнитного поля, которые регистрировались на высотах 660 км в экспериментах со спутником DEMETER. При этом было установлено, что должны выполняться одни и те же условия для появления плазменных возмущений на высотах около 500 км и формирования дактов концентрации плазмы на высотах около 660 км, что может указывать на существующую общность механизмов, определяющих развитие этих двух явлений.

На высотах $450 \div 500$ км наиболее интенсивными являются неоднородности концентрации плазмы с размерами $l_{\perp} \approx 15$ км в ортогональном к геомагнитному полю направлении и амплитудой $\delta N \approx 3$ %. Заметим, что неоднородности почти таких же размеров обнаруживаются как вблизи высоты отражения мощных радиоволн в F_2 -слое, так и внутри дактов концентрации плазмы [2, 4, 12].

В целом, имеет место хорошее соответствие характеристик плазменных возмущений, измеренных с помощью спутников SWARM и DEMETER, данным томографических исследований крупномасштабной структуры возмущённой области ионосферы и результатам численного моделирования. Последнее может свидетельствовать о достаточно адекватном описании природы наблюдаемых в плазме термодиффузионных процессов.

Как было установлено, в возмущённой магнитной силовой трубке на всей её протяжённости от области отражения мощной радиоволны до высот внешней ионосферы наиболее интенсивными являются неоднородности с масштабами $l_{\perp} \approx 15$ км. В такой пространственно неоднородной структуре возмущённой области ионосферы должно иметь место разбиение потока энергии волны накачки на отдельные пучки волн и, как следствие, сильно неоднородный нагрев ионосферной плазмы. Последнее регистрируется в измерениях как вариации величин N_e и T_e по сечению возмущённой магнитной силовой трубки. Поэтому модель источника выделения энергии волны накачки в пределах пучка мощных радиоволн, определяемых исключительно диаграммой направленности его излучения (которая, как правило, задаётся в гауссовом виде), не отражает существующей реальности и должна быть заменена на источник с несколькими центрами нагрева. Использование такого источника, возможно, позволит объяснить наблюдающиеся сильные вариации концентрации и температуры плазмы сразу над источником и более точно описать высотную зависимость их характеристик.

Завершая рассмотрение полученных с помощью спутников SWARM результатов, укажем, что установленные на них векторные магнитометры позволяют измерять три компонента вектора магнитного поля. В случае, если траектория пролёта спутника пересекает продольный ток, в магнитной компоненте, перпендикулярной траектории пролёта спутника, наблюдаются определённые вариации, по которым можно рассчитать плотность продольного тока [28].

Результаты предварительного анализа данных для сеанса 27 августа 2016 года, когда спутники SWARM A и C пролетали над станцией «Сура» параллельно друг другу на расстоянии 65 км, показали, что в возмущённой магнитной силовой трубке при модификации F_2 -области ионосферы мощными короткими радиоволнами индуцируются достаточно интенсивные как втекающие в ионосферу, так и вытекающие из неё продольные токи. Эти токи локализованы строго в области нагрева и представляют собой перемежающиеся втекающие и вытекающие токовые нити или слои с поперечным масштабом около 50 км, причём в центре возмущённой области продольный ток направлен из ионосферы, что подтверждается измерениями выноса ионов [6]. Оценки показывают, что максимальная плотность индуцированных в возмущённой ионосфере продольных токов составляет $1,5 \cdot 10^{-8}$ А/м². Более детальный анализ результатов измерений таких токов будет представлен в отдельной публикации.

Авторы благодарят сотрудников стенда «Сура» за помощь в организации и проведении экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17–05–00475). Исследования А. О. Рябова выполнялись при поддержке Минобрнауки (грант 3.1844.2017). В. Л. Фролов благодарит Международный институт космических исследований (Берн, Швейцария) за предоставление площадки для всестороннего обсуждения полученных в работе результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерухимов Л. М., Метелёв С. А., Мясников Е. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30, № 2. С. 208.
2. Фролов В. Л., Бахметьева Н. В., Беликович В. В. и др. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 330.
3. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
4. Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы: Монография. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2017. 468 с.
5. Фролов В. Л. // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 22.
6. Rietveld M. T., Kosch M. J., Blagoveshchenskaya N. F., et al. // J. Geophys. Res., 2003. V. 108, No. A4. P. 1141.
7. Pedersen T. R., McCarrick M., Selcher C., et al. // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30, No. 4. P. 1169.
8. Djuth F., Reinisch B. W., Kitrosser D. F., et al. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. Art. no. L04107.
9. Гуревич А. В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
10. Рапопорт В. О., Фролов В. Л., Комраков Г. П. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2007. Т. 50, № 8. С. 709.
11. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Комраков Г. П. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, № 12. С. 908.
12. Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2016. Т. 59, № 3. С. 198.
13. Milikh G. M., Papadopoulos K., Shroff H., et al. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, No. 7. Art. no. L17104.
14. Milikh G. M., Demekhov A., Vartanyan A. et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, No. 10. Art. no. L10102.
15. Vartanyan A., Milikh G. M., Mishin E., et al. // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, No. 10. Art. no. A10307.
16. Olsen N., Friis-Christensen E., Floberghagen R., et al. // Earth Planets Space. 2013. V. 65, No. 11. P. 1189.
17. Альперт Я. Л., Гуревич А. В., Питаевский Л. П. Искусственные спутники в разреженной плазме. М.: Наука, 1964. 384 с.
18. Kagan L. M., Kelley M. C., Garcia F., et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85, No. 1. P. 218.
19. Kosch M. J., Pedersen T., Mishin E. et al. // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art. no. A08304.
20. Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Пластинин Ю. А. и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53, № 1. С. 1.
21. Leyser T. B. // Space Sci. Rev. 2001. V. 98, No. 3–4. P. 223.
22. Frolov V. L., Chugurin V. V., Komrakov G. P., et al. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 6. С. 497.

23. Huba J. D., Joyce G., Fedder J. A. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, No. A10. P. 23,035.
24. Белов А. С. // Журн. эксперимент. теорет. физики. 2015. Т. 148, вып. 4 (10). С. 758.
25. Gurevich A. V., Lukyanov A. V., Zybin K. P. // Phys. Lett. A. 1996. V. 211, No. 6. P. 363.
26. Васьков В. В., Димант Я. С., Рябова Н. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32, № 5. С. 140.
27. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47, No. 4. Art. no. RS0L15.
28. Ritter P., Luhr H. // Earth Planets Space. 2006. V. 58, No. 4. P. 463.

Поступила в редакцию 3 апреля 2018 г.; принята в печать 29 мая 2018 г.

CHARACTERISTICS OF PLASMA DISTURBANCE EXCITED AT ALTITUDES OF 450–500 km DURING THE “SURA” FACILITY OPERATION

V. L. Frolov, R. Yu. Lukyanova, A. S. Belov, I. A. Bolotin, M. N. Dobrovolsky, A. O. Ryabov, and E. A. Shorokhova

We discuss the results of measuring characteristics of the artificial plasma disturbances excited at altitudes of 450–500 km with the ionospheric F_2 layer modified by high-power HF radio waves from the Sura facility. It is stated that at these altitudes there are plasma temperature and density variations in the HF-perturbed magnetic flux tube. No ducts with increased plasma density that were previously recorded at altitudes of about 660 km were detected. The results of the studies are compared with the data from the DEMETER satellite and the results of radiotomographic measurements. It is noted that the longitudinal currents induced in a perturbed ionosphere during the Sura operation were detected for the first time using SWARM satellites.