

## СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ, ИНДУЦИРУЕМЫХ В СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ПРИ ЕЕ МОДИФИКАЦИИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ

© 2021 г. В. Л. Фролов<sup>1,2,\*</sup>, Р. Ю. Лукьянова<sup>3</sup>, А. О. Рябов<sup>1</sup>, И. А. Болотин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*frolov@nirfi.unn.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020 г.

После доработки 29.11.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Проведен анализ экспериментальных данных, полученных в 2016–2019 гг. при измерении плазменных возмущений и электрических токов, которые индуцируются на ионосферных высотах при модификации  $F_2$ -области среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми нагревным стендом СУРА. Измерения проводились с помощью бортовой аппаратуры спутников серии *SWARM*. Определены условия генерации электрических токов и зависимость их характеристик от ионосферных условий. Результаты спутниковых измерений сравниваются с результатами экспериментов, выполненных в лабораторной плазме. Установлено, что развитие искусственных плазменных возмущений в верхней ионосфере Земли определяется термодиффузионными процессами с униполярными коэффициентами диффузии, которые сопровождаются возбуждением вихревых электрических токов короткого замыкания по фоновой плазме.

DOI: 10.31857/S0023420621040014

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Начатые в конце 60-х–начале 70-х гг. прошлого столетия активные эксперименты в ионосферной плазме по модификации ее  $F_2$ -слоя мощными КВ радиоволнами убедительно продемонстрировали, что вблизи высоты отражения мощной радиоволны обыкновенной ( $O$ ) поляризации (или волны накачки, ВН) при вертикальном или почти вертикальном ее падении на ионосферу развивается интенсивная искусственная ионосферная турбулентность (ИИТ) и наблюдается сильный разогрев электронов плазмы. [1–7]. Одной из важнейших компонент ИИТ являются неоднородности концентрации плазмы с размерами поперек линий геомагнитного поля  $l_{\perp}$  от долей метра до десятков километров. Их генерация наблюдается не только в центральной части возмущенной области ионосферы (ВО) вблизи высоты отражения ВН в  $F_2$ -области, где поглощается основная доля ее энергии и развивается наиболее интенсивная ИИТ, но и во всей толще ионосферы от высот ее  $E$ -слоя до высот внешней ионосферы. В горизонтальной плоскости размеры центральной части

ВО определяются шириной пучка мощных радиоволн. Измерения показали, что генерация неоднородностей концентрации плазмы обнаруживается и далеко за пределами этой области на расстояниях до 300 км от ее центра (см., например, [3–5, 7]), что намного превышает возможный снос плазмы за счет дрейфового ее движения за время проведения измерений. Особенно заметно это проявляется для неоднородностей концентрации с размерами поперек линий геомагнитного поля  $l_{\perp}$  больше нескольких километров.

Центральная часть ВО ионосферы обладает следующими важными свойствами. Во-первых, в условиях вечерней и ночной ионосферы сильный разогрев плазмы мощными радиоволнами на высотах  $F_2$ -слоя приводит к тому, что вблизи уровня отражения ВН наблюдается формирование области с пониженной концентрацией плазмы, обладающей свойствами фокусирующей линзы. Ее горизонтальные размеры составляют  $\sim 100$  км, вдоль геомагнитного поля она вытянута на расстояние до 200–300 км. Во-вторых, наиболее интенсивная ИИТ развивается в выделенной обла-

сти так называемого “магнитного зенита”, где на уровне взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой волна  $O$ -поляризации распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля; размер этой области по горизонтали составляет  $\sim 30$  км [2, 4, 5, 7]. Разогретая плазма выталкивается из области нагрева вдоль линий геомагнитного поля вверх и вниз по высоте. Вытесненная вверх плазма формирует на высотах выше 500 км дакт с повышенной плотностью плазмы [8, 9]. Такой характер перераспределения плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля подтверждается результатами численного моделирования [5, 10, 11]. Образование дактов с повышенной концентрацией плазмы на высотах внешней среднеширотной ионосферы хорошо регистрируется бортовой аппаратурой низкоорбитальных спутников [9], методом радиотомографии [3, 12] и при зондировании ионосферы сигналами спутников навигационных систем (GPS/GLONASS) [13]. Внутри дакта обнаруживаются неоднородности плотности с размерами  $l_{\perp} \approx 10-10^3$  м и более крупные неоднородности с  $l_{\perp} \approx 10-20$  км [9].

Из сказанного выше ясно, что искусственные возмущения плотности плазмы имеют сложную пространственную структуру и обнаруживаются как в центральной части ВО ионосферы, так и далеко за ее пределами. В зависимости от масштаба плазменных неоднородностей и их местоположения вариации плотности в них составляют величину от долей процента до десятков процентов по отношению к концентрации окружающей фоновой плазмы. Изучение механизмов их образования, включая транспорт плазменных возмущений вдоль и поперек силовых линий геомагнитного поля, является актуальной задачей сегодняшнего дня. При этом принципиальным моментом здесь является выяснение скорости образования и характера релаксации таких неоднородностей, зависимости характеристик этих процессов от ионосферных условий и режима нагрева ионосферной плазмы. Все это важно знать для определения особенностей механизмов их генерации, влияния этих неоднородностей на характеристики распространения радиоволн различных диапазонов частот от ОНЧ до СВЧ и на свойства ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Для получения данных об эволюции плазменных неоднородностей различных масштабов используются различные радиофизические методы зондирования ионосферы [14, 15]. С их помощью изучаются условия образования неоднородностей в различных геофизических условиях, на различных широтах и ионосферных высотах, характер их развития и релаксации, их спектральные характе-

ристики и пр. Однако, несмотря на огромный полученный здесь экспериментальный материал, эти данные нельзя считать полными, т.к. генерация, эволюция и релаксация неоднородностей сопровождается возбуждением в ВО ионосферы электрических токов, характеристики которых в настоящее время практически не изучены. Считается, что в нагревных экспериментах такие токи образуются при генерации и релаксации возмущений концентрации магнитоактивной плазмы [16, 17], за счет ухода сверхтепловых электронов из ВО ионосферы во внешнюю ионосферу [18], за счет действия сил стрикционного и теплового давления в модифицированной мощными радиоволнами плазме [19]. Имеющиеся в литературе оценки дают величину плотности этих токов от 0.05 до 1.0  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Наличие таких токов может оказывать существенное влияние на механизмы генерации, эволюции и релаксации искусственных ионосферных неоднородностей концентрации плазмы и ИИТ, в целом, и определять характеристики наблюдаемых явлений. Это обуславливает значимость экспериментов по прямому измерению электрических токов на ионосферных высотах, индуцируемых при модификации магнитоактивной ионосферной плазмы мощными радиоволнами.

Важным аспектом этих исследований является также то, что пространственная структура системы электрических токов, возбуждаемых при локальном нагреве магнитоактивной плазмы, подробно измерялась в лабораторных плазменных установках [20–22]. Это дает возможность провести сравнение результатов натуральных и лабораторных экспериментов и определить, в каких условиях и по каким параметрам эти методы исследований могут дополнять друг друга, обеспечивая более полное наше понимание свойств процессов переноса в магнитоактивной плазме.

В 2016–2019 гг. на стенде СУРА была проведена серия экспериментов, координированных с пролетами низкоорбитальных (высота орбит  $\sim 500$  км) космических аппаратов серии *SWARM*, бортовая аппаратура которых включает в себя анализатор плазмы и высокочувствительный векторный магнитометр. Измерения индуцируемых нагревом плазмы вариаций магнитного поля позволяют определить величину и пространственные характеристики электрических токов, которые пересекает орбита спутника. В настоящей работе представлен анализ полученных в этих экспериментах данных, касающихся свойств плазменных возмущений и электрических токов, которые возбуждаются на ионосферных высотах при модификации  $F_2$ -области среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами, излучаемыми среднеширотным нагревным стендом СУРА (НИРФИ ННГУ,

Нижний Новгород, Россия). Результаты измерений свойств плазменных возмущений частично были представлены в работе [23], первые результаты измерений индуцированных нагревом продольных электрических токов рассматривались в работе [24].

Во второй части работы приведены условия проведения измерений и характеристики используемого экспериментального оборудования. Анализ результатов выполненных измерений составляет содержание третьей ее части. В четвертой части приведено сравнение результатов измерений характеристик электрических токов, выполненных в ионосферной и лабораторной плазмах. В заключении сформулированы полученные результаты и отмечены возможные направления развития проводимых исследований.

## 2. ОРГАНИЗАЦИЯ КООРДИНИРОВАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Аппаратура

**2.1.1. Спутники SWARM.** Группировка из трех идентичных КА серии SWARM Европейского космического агентства была выведена на орбиту 22.XI.2013. Спутники имеют низкие круговые орбиты, лежащие в меридиональной плоскости. При этом два из них (*Alfa* и *Charley*, далее S-A и S-C) летят на высоте ~450 км близко друг к другу на расстоянии  $\leq 200$  км, наклонение орбиты  $87.4^\circ$ . Третий КА (*Beta*, далее S-B) летит в другой меридиональной плоскости на высоте ~510 км, наклонение орбиты  $88^\circ$ . Следует подчеркнуть, что именно в области высот 400–500 км имеет место переход от центральной части ВО ионосферы, где наблюдается генерация интенсивной ИИТ, сильный разогрев плазмы и уменьшение ее концентрации, к области переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу [4, 5, 7, 10, 23]. За сутки спутники делают 14–15 оборотов вокруг Земли, оказываясь в разных секторах местного времени. Постепенно смещаясь по долготе, орбиты спутников за 7–10 мес. покрывают все долготные сектора земного шара.

Все три КА SWARM оснащены идентичной бортовой измерительной аппаратурой. Основным ее модулем является комплекс для магнитных измерений, состоящий из высокочувствительных скалярного (ASM) и векторного (VFM) магнитометров для определения общей напряженности геомагнитного поля и ортогональных составляющих вектора поля с точностью до 0.01 и 0.1 нТл соответственно. Эти магнитометры позволяют проводить измерения для широкого круга задач, включая мониторинг главного магнитного

поля Земли, литосферного поля и вариации внешнего магнитного поля, которое создается электрическими токами, текущими между магнитосферой и ионосферой вдоль силовых линий геомагнитного поля (продольными токами).

Вертикальная составляющая продольного тока, перпендикулярная траектории пролета спутника, может быть определена по величине создаваемой этим током горизонтальной компоненты магнитной индукции, исходя из закона Ампера:  $\mu_0 J = \partial B / \partial l$ . Здесь  $J$  – плотность тока,  $\mu_0$  – магнитная постоянная вакуума,  $l$  – расстояние вдоль орбиты КА,  $B$  – вариация магнитной индукции (ее измеренное значение, из которого вычтено модельное значение внутреннего магнитного поля Земли). При пересечении вытянутых вдоль широты токовых слоев или токов кругового сечения достаточно хорошим приближением является использование только одной из горизонтальных компонент магнитной индукции: той, которая перпендикулярна траектории полета спутника; в нашем случае это  $B_{EAST}$ . Секундные значения плотности тока, рассчитанные по измерениям каждого из трех спутников, являются одним из стандартных продуктов, представленных в базе данных SWARM [25].

Кроме магнитометрической аппаратуры КА SWARM оснащены двумя ленгмюровскими зондами для измерения каждые 0.5 с плотности и температуры электронов в окружающей плазме, а также электрического потенциала корпуса спутника. Более подробное описание аппаратуры КА SWARM можно найти в [25, 26]. Данные измерений с помощью КА SWARM доступны на сайте <https://vires.services/>.

**2.1.2. Нагревный стенд СУРА.** Используемый в наших экспериментах для модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами нагревный стенд СУРА расположен вблизи р/п Васильсурск, в 120 км к востоку от г. Нижнего Новгорода (координаты стенда:  $\varphi_0 = 56.15^\circ$  с.ш.,  $\lambda_0 = 46.1^\circ$  в.д.) [27]. Эффективная мощность излучения стенда в режиме когерентного излучения всех трех его модулей с максимальной мощностью составляет  $P_{эфф} \approx 80$  МВт на частоте излучения  $f_{ВН} \approx 4.3$  МГц, увеличиваясь с ростом  $f_{ВН}$  до ~180 МВт для  $f_{ВН} \approx 6.5$  МГц. Во всех рассматриваемых в настоящей работе экспериментах стенд излучал мощные радиоволны  $O$ -поляризации; использовался наклон диаграммы направленности излучения ВН на  $12^\circ$  на юг, чтобы усилить генерацию ИИТ за счет эффекта “магнитного зенита” [2, 4, 5, 28]. Если позволяли критические частоты  $f_{0F_2}$  и программа работы стенда, измерения проводились всякий раз, когда какой-нибудь из КА пролетал через возму-

щенную магнитную силовую трубку, опирающуюся на центральную часть ВО, или рядом с трубкой. Излучение ВН в большинстве случаев началось за 15 мин до времени пролета КА через возмущенную ионосферу. В тех сеансах, когда временная программа излучения ВН была иной, в их описании приводятся дополнительные необходимые сведения. Как показали выполненные ранее эксперименты и модельные расчеты, времени ~15 мин достаточно для практически полного развития ИИТ в ионосфере в вечерние и ночные часы и заполнения магнитной силовой трубки искусственными плазменными возмущениями, по крайней мере, до высот ~700 км [4, 9].

Контроль за изменением критической частоты  $F_2$ -слоя ионосферы для  $O$ -моды распространения ВН ( $f_{0F_2}$ ) и за появлением спорадического слоя  $E_s$  осуществлялся с помощью имеющегося на стенде СУРА цифрового ионозонда CADY. Отметим, что съем ионограмм во время работы стенда по техническим условиям был невозможен. Получаемые ионограммы позволяли также определять уровень взаимодействия ВН с плазмой по степени их возмущенности.

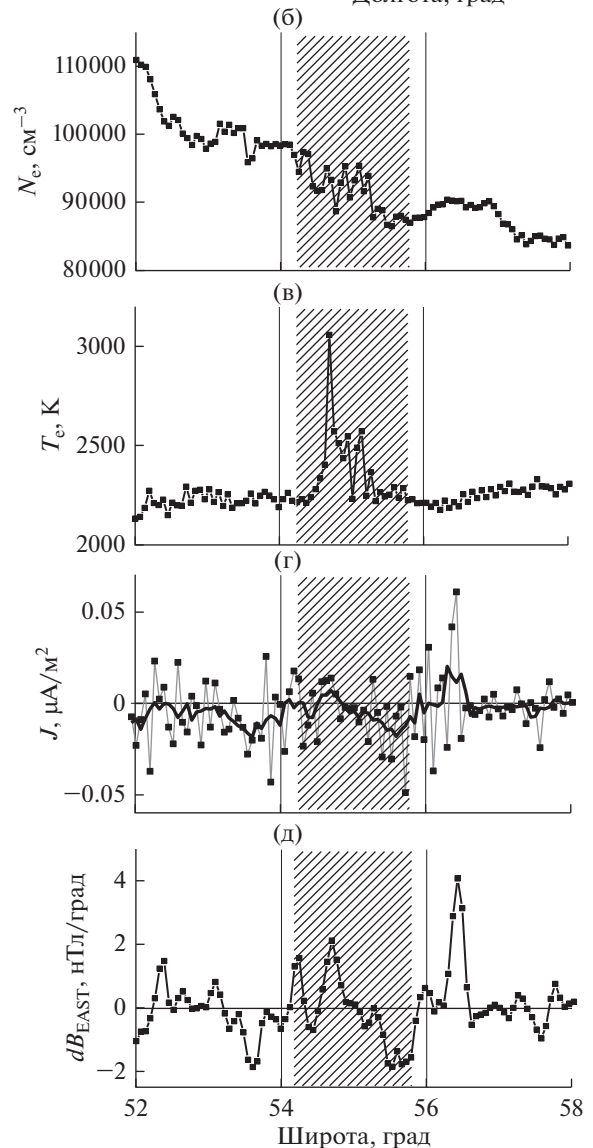
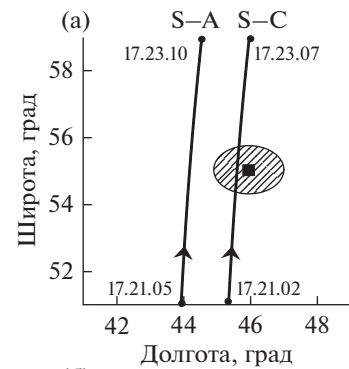
## 2.2. Параметры экспериментов

Всего в 2016–2019 гг. было выполнено около 70 сеансов нагрева ионосферы по программе СУРА–SWARM при различных геофизических условиях. Частично полученные результаты были проанализированы в работах [23, 24], в которых были сформулированы необходимые требования для эффективного возбуждения возмущений концентрации и температуры электронов плазмы на высотах  $h \approx 450$ –500 км. В частности, было установлено, что генерация искусственных плазменных возмущений обнаружимого уровня, который обычно составлял от нескольких десятых долей процента до процента измеряемой величины электронной концентрации ( $N_e$ ), регистрировалась только при работе стенда в вечерние и ночные часы в условиях, когда частота мощной радиоволны не превышала 6 МГц, была несколько ниже критической частоты  $f_{0F_2}$ , а орбита КА проходила на расстоянии меньше 50 км от центра возмущенной магнитной силовой трубки. Также, в большинстве случаев генерация искусственных плазменных возмущений наблюдалась, когда эффективная мощность излучения ВН была не меньше 40 МВт, хотя в особо благоприятных условиях появление возмущений регистрировалось и при  $P_{эфф} \approx 20$  МВт. Высокий уровень взаимодействия мощной радиоволны с плазмой в проводимых измерениях подтверждался тем, что

на ионограммах вертикального зондирования для расположенного на стенде СУРА ионозонда регистрировалось возбуждение сильного или очень сильного  $F$ -рассеяния ( $F_{spread}$ ), когда уширение ветвей ионограммы по частоте соответственно составляло 0.3–0.5 МГц или превышало 0.5 МГц, и вместе с этим наблюдалось подавление на ионограммах ветки  $O$ -моды из-за развития эффекта аномального ослабления зондирующих ионосферу радиоволн [1, 4, 5, 29] и ослабления волн обеих поляризацій из-за их рассеяния в свою моду на неоднородностях с  $l_{\perp} \approx 0.1$ –1 км [4, 30]. Кроме того, было подтверждено, что эффект “магнитного зенита” оказывает сильное влияние на свойства и уровень развития искусственных плазменных возмущений. Вызванные нагревом ионосферы вариации концентрации и температуры плазмы обнаруживались на расстояниях до 200 км вдоль орбиты спутника (приблизительно вдоль направления север–юг), что в 2–3 раза превышает горизонтальные размеры центральной части ВО ионосферы. При этом на высотах 450–500 км наиболее интенсивными являются неоднородности концентрации плазмы с  $l_{\perp} \approx 15$  км. Важно, что в измерениях на высотах орбит КА SWARM не было обнаружено формирования дактов с увеличенной плотностью плазмы и размерами  $l_{\perp} \approx 100$  км, которые по результатам измерений на спутниках DEMETER и DMSP хорошо регистрировались на высотах  $h \geq 600$  км [8, 9]. В экспериментах СУРА–SWARM появление плазменных возмущений во внешней ионосфере не обнаруживалось, когда высота отражения ВН была меньше 200 км, хотя при этом могло наблюдаться развитие достаточно интенсивного  $F_{spread}$  на ионограммах вертикального зондирования ВО ионосферы. Следует отметить, что основные результаты в выполненных экспериментах были получены в 2016 и 2017 гг. Более низкие критические частоты в 2018 и 2019 гг., в годы минимума солнечной активности, позволили провести лишь очень ограниченное число измерений в условиях  $f_{0F_2} > f_{ВН}$ , причем многие из них проводились в неоптимальных условиях, когда, например, частота ВН была близка к  $f_{0F_2}$  или измерения проводились в дневной (освещенной Солнцем) ионосфере. Для стенда СУРА минимальное значение частоты ВН равно 4300 кГц.

За время 4-х летнего периода исследований было всего около десятка случаев, когда были выполнены необходимые условия для возбуждения и регистрации сильных плазменных возмущений во внешней ионосфере Земли при ее модификации мощными КВ радиоволнами, в которых параллельно с этим также наблюдалась генерация продольных токов в ВО ионосфере; для четырех

**Рис. 1.** (а) Ионосферная проекция траекторий КА S-A и S-C в области 52°–58° с.ш., 41°–49° в.д. и проекция ВО диаметром ~90 км (заштрихованный овал); сеанс 27.VIII.2016. Обозначено время (в формате hh.mm.ss) пересечения широтных границ области. Черным квадратом на высоте орбиты спутника показано положение центра диаграммы направленности излучения станда СУРА при ее наклоне на 12° на юг. (б) Электронная концентрация  $N_e$ ; (в) температура электронов  $T_e$  (прямыми тонкими линиями показаны фоновые изменения параметров); (г) плотность продольных токов с частотой 1 Гц и сглаженная по трем точкам (положительные значения соответствуют току, текущему вниз); (д) вариация градиента восточной компоненты индукции магнитного поля  $B_{EAST}$ . Заштрихованной полосой выделена область широт внутри границы возмущенной магнитной силовой трубки.



наиболее значимых из них характеристики возбуждаемых возмущений плотности и температуры электронов плазмы подробно анализировались в работе [23]. Поэтому ниже по каждому рассматриваемому сеансу мы ограничимся только кратким описанием основных характеристик искусственных плазменных возмущений, к которым будут добавлены данные измерений вариаций магнитного поля и вычисленные по ним плотности продольных токов.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1. Сеанс 27.VIII.2016

В этом эксперименте нагрев производился в условиях вечерней, но еще освещенной Солнцем ионосфере. Вблизи ВО по направлению с юга на север пролетал тандем близко летящих КА S-A и S-C. Траектория КА S-C проходила вблизи оси возмущенной магнитной силовой трубки (в 18 км к западу от ее центра, время наибольшего сближения с центром трубки  $T^* = 17.22.06$  UT), а траектория S-A – приблизительно в 115 км к западу от центра возмущенной трубки (рис. 1а). ВН излучалась на частоте  $f_{ВН} = 4300$  кГц под углом 12° от вертикали на юг с эффективной мощностью излучения  $P_{эфф} = 55$  МВт. За время сеанса нагрева величина  $f_{0F_2}$  постепенно уменьшалась с 5.1 до 4.9 МГц, высота отражения ВН составляла  $h \approx 230$  км. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях при суммарном суточном значении  $K_p$ -индекса  $\sum K_p = 9$  и величине индекса  $AE$  меньше 50 нТ. Во время нагрева ионосферы наблюдалось развитие очень сильного  $F_{spread}$ , что свидетельствует об интенсивной генерации в ВО ионосферы неоднородностей концентрации плазмы с масштабами  $l_{\perp}$  от нескольких сотен метров до нескольких километров. На ионограммах регистрировался полупрозрачный спорадический слой  $E_s$  с критической частотой  $f_{0F_2}$  до 4.5 МГц,

влияние которого могло приводить к уменьшению проходящей в верхнюю ионосферу (в  $F_2$ -область) мощности ВН.

На рис. 1б–1д для КА S-C, траектория которого проходит вблизи центра возмущенной магнитной

силовой трубки, для области широт  $52^\circ$ – $58^\circ$  с.ш. представлены результаты измерений концентрации и температуры электронов плазмы, плотности продольных электрических токов, а также значения геометрической производной (градиента пространственного изменения) восточной компоненты индукции магнитного поля вдоль траектории движения спутника. Штриховкой на панелях (б)–(д) отмечено положение центральной части ВО ионосферы. Первые три параметра взяты непосредственно из базы данных *SWARM*, а производная рассчитывалась по данным измерений векторного магнитометра, которые также содержатся в базе данных *SWARM*. Фактически оба параметра, представленные на панелях (г) и (д), отражают интенсивность вертикальной компоненты тока, измеренной вдоль траектории спутника. На панели (г) здесь и на следующих рисунках приведены две кривые: тонкая линия отвечает измерениям продольных токов с частотой 1 Гц (т.е. геометрическое расстояние между соседними точками вдоль орбиты КА составляет около 7.6 км), а жирная — результатам измерений, сглаженным по трем точкам. Следуя стандартному алгоритму обработки данных *SWARM*, плотность тока рассчитывается как односторонняя производная вариации зональной компоненты магнитного поля после вычета значения внутреннего магнитного поля Земли по модели CHAOS. В отличие от этого метода производная, представленная на рис. 1г, — центральная, рассчитанная по трем последовательным значениям полной магнитной компоненты без вычета модельного поля. Во многих случаях такой расчет позволяет получить менее зашумленный магнитный сигнал, по которому можно более точно определить плотность продольного тока. Все представленные величины измерялись с частотой 1 Гц, т.е. геометрическое расстояние между соседними точками вдоль орбиты КА составляет около 7.6 км. Заметим, что именно этот сеанс рассматривался в [24] в качестве примера, иллюстрирующего генерацию продольных электрических токов, индуцируемых в ВО ионосферы.

На рис. 1б, 1в можно видеть, что аппаратура КА S-C на почти 100-километровом отрезке его орбиты регистрировала вызванные нагревом ионосферы вариации концентрации плазмы  $N_e$  (величиной до 4%), общее повышение  $T_e$  (в среднем на 15%) и ее сильные вариации. В этом сеансе область с искусственными возмущениями сдвинута на  $\sim 30$  км на юг относительно рассчитанного центра диаграммы направленности пучка мощных радиоволн, демонстрируя влияние эффекта “магнитного зенита”, когда при наклоне диаграммы направленности излучения стелды на  $12^\circ$  на юг ИИТ имеет свою максимальную интенсив-

ность на ее южном крае [4, 5, 7, 28]. В рассматриваемом случае именно в этой области регистрируется максимальное кратковременное увеличение  $T_e$  до 3000 К. Наиболее интенсивные флуктуации концентрации плазмы внутри возмущенной магнитной силовой трубки имели пространственный масштаб  $l_\perp \approx 10$ – $15$  км, соответствуя ранее полученным в работах [7, 9] результатам. В этом сеансе для КА S-C было зарегистрировано присутствие области с увеличенной концентрацией плазмы на широтах  $56^\circ$ – $57^\circ$  с.ш., которая расположена в 100–200 км севернее центра возмущенной трубки. Возможно, эта структура может иметь здесь и естественное происхождение. Нельзя также исключать, что она связана с существованием области с увеличенной плотностью плазмы, которая окружает область с пониженной концентрацией, что ранее многократно наблюдалось в радиотомографических измерениях [3]. Механизм ее образования сегодня не ясен. Ниже приводится и иная интерпретация появления такой области с учетом других полученных в наших измерениях данных.

КА S-A пролетал практически одновременно с S-C (спутники пересекают одну и ту же широту с разницей в 3 с) в  $\sim 115$  км к западу от центра возмущенной магнитной силовой трубки, т.е. за пределами области с сильными плазменными возмущениями, индуцированными нагревом ионосферы мощными радиоволнами. Его приборы, в отличие от S-C, не зарегистрировали каких-либо видимых изменений в  $N_e$  и  $T_e$ .

Обратимся к анализу структуры продольных электрических токов. На рис. 1г можно идентифицировать втекающий в ионосферу ток (с положительными значениями его величины) в южной части ВО и вытекающий ток (с отрицательными значениями его величины) — в северной части ВО. Плотность тока в обоих случаях составляет  $0.01$ – $0.02$   $\mu\text{A}/\text{m}^2$ . Значения градиента магнитной индукции  $B_{\text{EAST}}$  представлены на рис. 1д. Они демонстрируют перемежающиеся области положительных и отрицательных градиентов  $B_{\text{EAST}}$ ; амплитуда этих изменений составляет около 4 нТл. Такая структура магнитных вариаций показывает, что вдоль траектории спутника регистрируется несколько продольных токов: для наиболее выделяющихся из них два текут вверх ( $\partial B/\partial l > 0$  на широтах  $\sim 54.5^\circ$  и  $\sim 56.5^\circ$ ) и два — вниз ( $\partial B/\partial l < 0$  на широтах  $\sim 55.5^\circ$  и  $\sim 53.5^\circ$ ). Характерный пространственный масштаб изменения направления тока составляет около 100 км. При этом внутри возмущенной магнитной силовой трубки в области “магнитного зенита” ток положительный (течет вниз), что соответствует выносу электронов из

области их сильного разогрева вверх во внешнюю ионосферу; севернее и южнее этой области электроны движутся в обратном направлении (ток течет вверх, отрицательные значения токов). Видно, что эта пространственная структура электрического тока сдвинута к югу относительно центра возмущенной магнитной силовой трубки примерно на 40 км, что, как отмечалось выше, является следствием влияния эффекта “магнитного зенита”. Заметим, что максимальная величина втекающего тока (максимальный вынос электронов вверх) соответствует положению наиболее сильного увеличения температуры электронов внутри возмущенной трубки.

Второй максимум плотности втекающего тока величиной  $\sim 0.013 \mu\text{A}/\text{m}^2$  регистрируется на широте  $56.3^\circ$ . До и после него на широтах  $55.7^\circ$  и на  $56.9^\circ$  регистрируются вытекающие токи. Эта система токов наблюдается в области локального увеличения концентрации плазмы, расположенного к северу от возмущенной магнитной силовой трубки, без какого-либо видимого изменения здесь температуры электронов.

Вариации индукции магнитного поля, измеренные магнитометрами КА S-A, пролетавшего в 115 км к западу от центра возмущенной магнитной силовой трубки, показывают гораздо более слабые (до 0.2 нТл) вариации с характерным пространственным масштабом изменения знака градиента  $\sim 65$  км. Поскольку сильные токи регистрируются КА S-C на расстоянии до  $\sim 100$  км от центра возмущенной магнитной силовой трубки в меридиональном направлении, но они не регистрируются КА S-A на таком же расстоянии западнее ее центра, то можно заключить, что область с возбуждаемыми продольными токами должна быть несколько вытянута вдоль геомагнитного меридиана.

### 3.2. Сеанс 23.V.2017

В этом эксперименте также использовались летящие в тандеме спутники. КА S-C в момент максимального сближения с осью возмущенной магнитной силовой трубки в  $T^* = 17.11.40$  UT пролетал в вечерней (но еще в освещенной Солнцем) ионосфере на высоте 450 км в направлении с юга на север в 40 км к западу от центра трубки близко к краю диаграммы направленности пучка мощных радиоволн (рис. 2а). ВН 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 достаточно спокойных геомагнитных условиях ( $\Sigma K_p = 15^-$ ,  $AE \approx 250$  нТ) по-

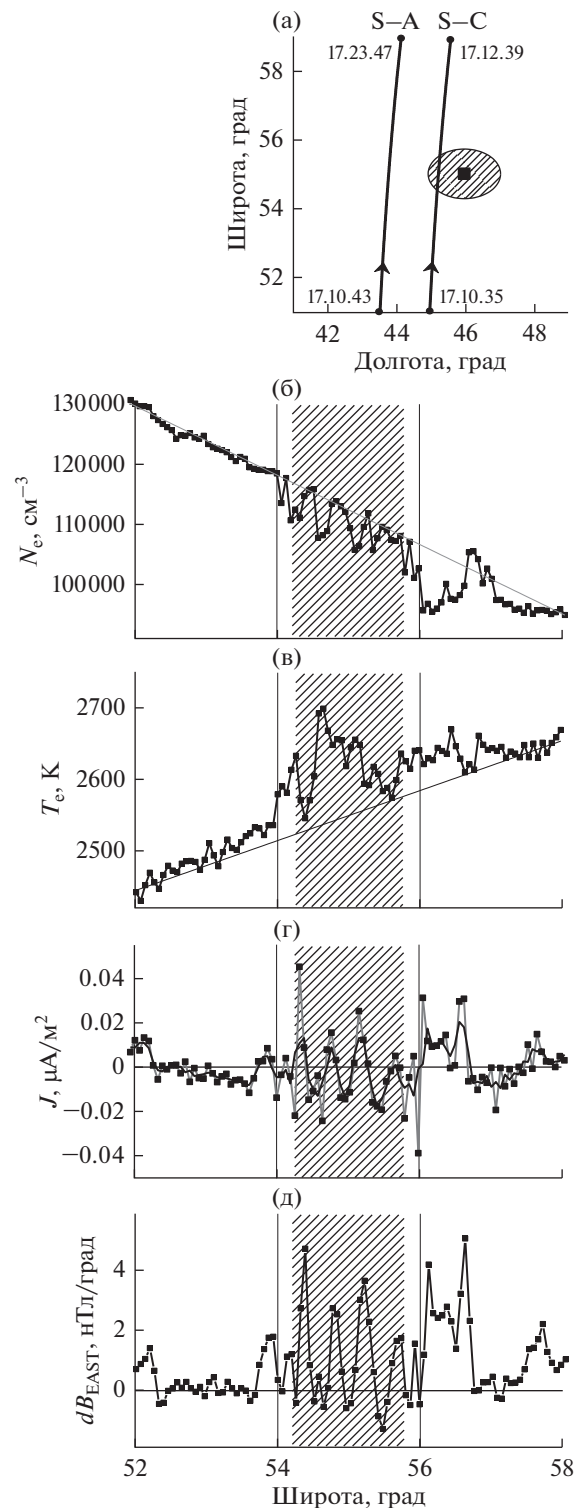


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для сеанса 23.V.2017.

сле геомагнитного возмущения среднего уровня с  $K_p \approx 3-4$ , которое началось вечером 19.V.2017. Во время нагрева ионосферы наблюдалось развитие диффузности среднего уровня на ионограммах вертикального зондирования. Особенностью этого



эксперимента было то, что он проводился в присутствии полупрозрачного спорадического слоя  $E_s$  с частотой экранирования  $\sim 3$  МГц и критической частотой  $f_{0E_s}$  до 7 МГц. Присутствие такого плотного слоя  $E_s$  приводило к уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН, что отразилось в ослаблении интенсивности  $F_{\text{spread}}$  по сравнению с рассмотренным выше сеансом 27.VIII.2016. При таких характеристиках спорадического слоя возможна полная экранировка верхней ионосферы в локальных его областях с достаточно высокими частотами экранирования  $f_{0E_s}$ , что приводит к развитию сильно неоднородной (пэтчевой) структуры ВО на уровне  $F_2$ -слоя ионосферы.

На рис. 2б, 2в для сеанса 23.V.2017 представлены результаты измерений параметров плазмы. По измерениям  $N_e$  на интервале времени  $T = 17.11.23 - 17.11.48$  UT, в области  $54^\circ - 55.5^\circ$  с.ш. (т.е. на расстояниях вдоль орбиты спутника до 110 км к югу и до 60 км к северу от оси возмущенной магнитной силовой трубки) регистрируются несколько выделяющихся областей с пониженной концентрации плазмы (до 7%) с характерным пространственным масштабом  $\sim 30$  км. Видно, что эти области соответствуют областям с увеличенной температурой  $T_e$ . Такая структура локальных уменьшений плотности плазмы, как отмечалось выше, связана с пространственной структурой непрозрачности спорадического  $E$ -слоя, которая проецируется на верхнюю ионосферу, приводя к локальности разогрева электронной компоненты плазмы и уменьшению ее плотности в этих областях. В этом случае пространственный масштаб вариаций плотности плазмы в слое  $E_s$  должен составлять  $\sim 15$  км. Увеличение среднего значения  $T_e$  в  $F_2$ -слое в этом сеансе составляет  $\sim 2\%$ . Регистрируются также быстрые вариации  $T_e$  величиной 1–2%, имеющие длительность около 2 с, что отвечает пространственному масштабу  $l_{\perp} \approx 15$  км. Центр области с максимальными плазменными возмущениями смещен приблизительно на 25 км к югу от центра возмущенной магнитной силовой трубки, что определяется влиянием эффекта “магнитного зенита”.

Из данных, представленных на рис. 2б, 2в, можно видеть, что на интервале времени от 17.11.50 до 17.12.12 UT (интервал широт  $56^\circ - 57^\circ$  с.ш., что соответствует расстоянию 100–240 км к северу от центра возмущенной магнитной силовой трубки) регистрируется появление второй области с выделяющимися вариациями плотности и температуры плазмы. Можно предположить, что частое появление плазменных возмущений на этих широтах является результатом развития

ИИТ в области бокового лепестка диаграммы направленности излучения мощных радиоволн. Как показали измерения [31], при наклоне диаграммы направленности излучения стелды на  $12^\circ$  на юг, эффективная мощность излучения в этот боковой лепесток может достигать 10 МВт, что является достаточным для возбуждения плазменных возмущений заметного уровня. Возможно также, что формирование такой выделенной области генерации ИИТ вне главного лепестка диаграммы направленности излучающей антенны стелды в определенных условиях может усиливаться в результате фокусировки мощных радиоволн на искусственных крупномасштабных неоднородностях, как это, например, наблюдалось в работе [32].

В этом сеансе КА S-A пролетал практически в то же самое время в  $\sim 140$  км к западу от центра возмущенной магнитной силовой трубки, далеко за пределами области с сильными плазменными возмущениями, определяемой развитием турбулентности в центральной части ВО ионосферы. Его приборы не зарегистрировали каких-либо видимых изменений  $N_e$  и  $T_e$ , связанных с нагревом ионосферы мощными радиоволнами.

На рис. 2г, 2д представлены соответственно плотность продольного тока и изменение градиента восточной компоненты индукции магнитного поля. По этим данным можно видеть, что положительная величина производной  $\partial V_{\text{EAST}}/\partial l$ , соответствующая втекающему в ионосферу току (или выносу электронов во внешнюю ионосферу), соответствует положению областей с уменьшенной плотностью плазмы. Важно отметить, что в этом сеансе вдоль орбиты спутника в области регистрации неоднородностей с уменьшенной концентрацией плазмы наблюдается последовательное чередование четырех втекающих и трех вытекающих токов. По полученным данным величина плотности тока в них составляет  $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , что примерно совпадает с величинами, полученными в сеансе 27.VIII.2016. Полученные данные позволяют заключить, что в этом сеансе генерация каждой из неоднородностей концентрации плазмы с  $l_{\perp} \approx 30$  км приводит к образованию своей системы втекающих и вытекающих токов. Из этого следует, что нельзя использовать усреднение результатов измерений за интервал времени, превышающий время пролета спутника через такую неоднородность концентрации плазмы. В рассматриваемом случае это время составляет около 4 с.

В рассматриваемом сеансе для КА S-A величина вызванных нагревом ионосферы мощными радиоволнами вариаций плотности тока и магнит-



ной индукции была мала и находилась на уровне их фоновых флуктуаций.

### 3.3. Сеанс 25.IV.2016

В этом эксперименте возмущенную магнитную силовую трубку пересекала траектория КА S-B (этот спутник летит изолированно на высоте 510 км). Он пролетал в условиях ночной (неосвещенной Солнцем) ионосферы в  $T^* = 19.16.55$  UT в направлении с севера на юг практически через центр возмущенной магнитной силовой трубки (рис. 3а). ВН излучалась на частоте  $f_{ВН} = 4300$  кГц при  $f_{0F_2} = 4.6$  МГц; высота ее отражения составляла  $\sim 240$  км. Эксперимент проводился в достаточно спокойных геомагнитных условиях при несколько увеличенном уровне авроральной активности с  $\Sigma K_p = 10$  и  $AE \approx 200$  нТ; предшествующее измерениям последнее усиление геомагнитной возмущенности до уровня с  $K_p \approx 3-4$  регистрировалось вечером 22.IV. Особенностью этого сеанса является низкая эффективная мощность излучения ВН,  $P_{эфф} \approx 20$  МВт. Однако в ночных условиях и при повышенном уровне возмущенности ионосферы даже при такой низкой  $P_{эфф}$  наблюдалось развитие очень сильной диффузности на ионограммах, что может быть связано с влиянием естественных механизмов генерации неоднородностей концентрации плазмы, усиливающих развитие ИИТ.

На рис. 3б–3д представлены параметры ионосферных возмущений, зарегистрированные приборами КА S-B. На южном крае ВО на широте  $54.6^\circ$  можно видеть очень локальное уменьшение концентрации плазмы (панель б) и увеличение ее температуры (панель в), оба – величиной 2–4%. Небольшие вариации  $T_e$  заметны также на северном крае ВО. Характерный размер флуктуаций  $T_e$  вдоль орбиты спутника составлял 15–30 км. Область с возмущениями сдвинута приблизительно на 35 км на юг от центра диаграммы направленности пучка мощных радиоволн, демонстрируя, как и в предыдущих сеансах, влияние эффекта “магнитного зенита”. Именно в этой области в 19.17.01 UT регистрируется максимальные кратковременные ( $\sim 2$  с, что соответствует размеру области вдоль орбиты спутника  $\sim 15$  км) увеличение  $T_e$  и уменьшение  $N_e$ , которые совпадают по времени с вариациями градиента  $V_{EAST}$  (панель д). Эти мелкомасштабные изменения, которые представляют собой вариации внешнего магнитного поля, обусловлены возбуждаемыми в ВО продольными токами, которые пересекает спутник. В южной части ВО расположен ток, втекающий в ионосферу, что соответствует выносу электронов наверх и

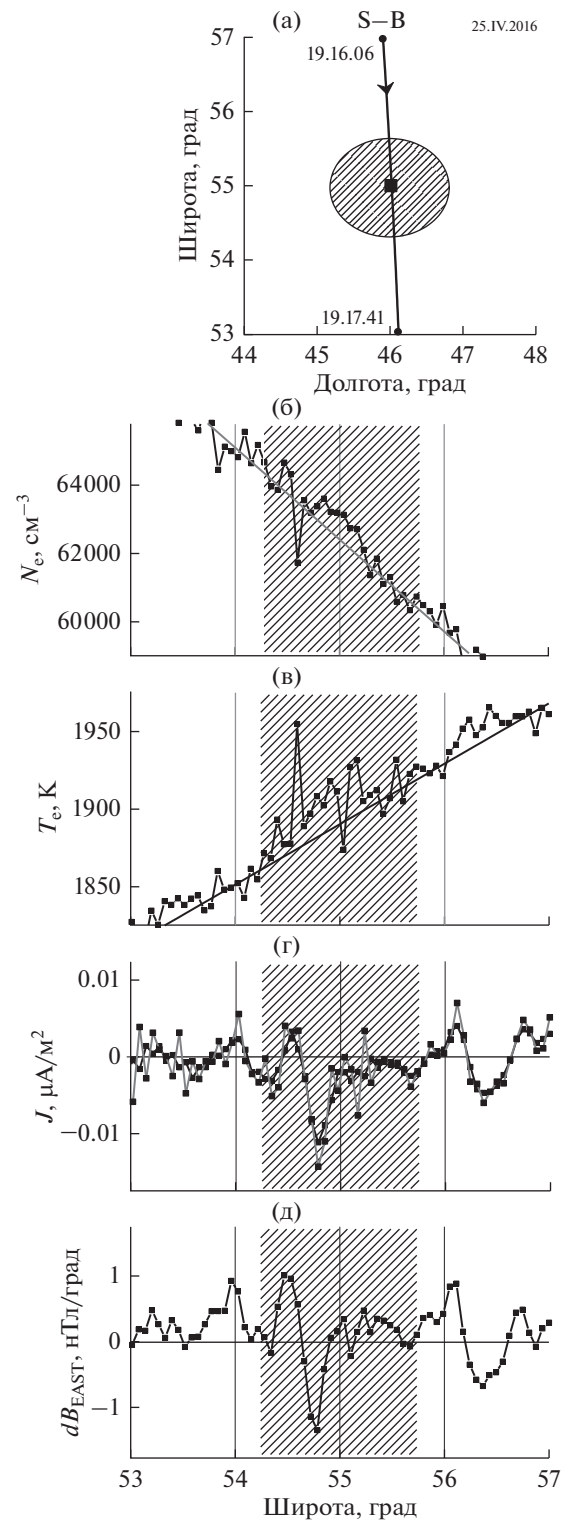


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для сеанса 25.IV.2016.

совпадает с областью уменьшения  $N_e$ , в то время как по краям этой области регистрируются вытекающие токи, соответствующие движению электронов вниз. Плотность тока, отвечающая выносу электронов вверх, составляет  $\sim 0.005 \mu\text{A}/\text{m}^2$ .

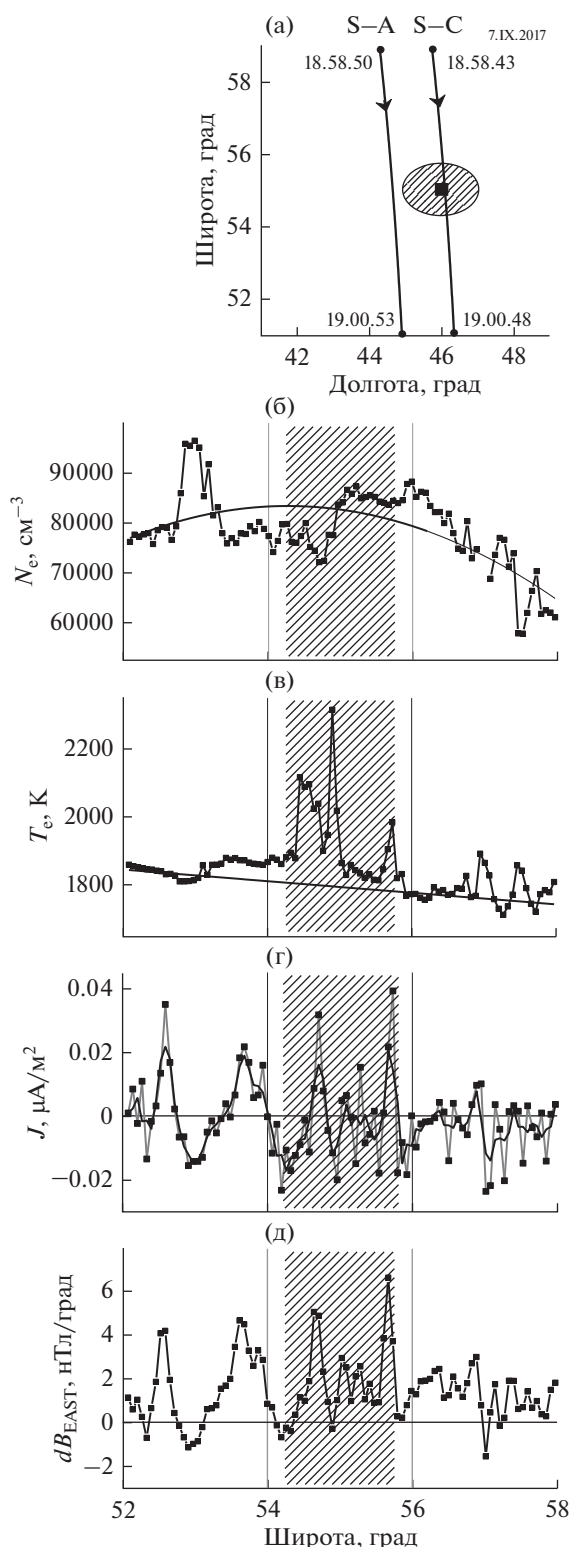


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но для сеанса 7.IX.2017.

Плотность вытекающего тока (электроны движутся вниз) на южном крае возмущенной магнитной силовой трубки достигает  $\sim 0.01 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Относительно небольшой (по сравнению с сеан-

сами, описанными выше) уровень искусственных возмущений концентрации и температуры плазмы и индуцируемых при этом токов можно отнести за счет низкой эффективной мощности излучения ВН.

Как и в предыдущих сеансах, к северу от ВО в диапазоне широт  $56.0^\circ\text{--}56.5^\circ$  наблюдается локальное увеличение флуктуаций  $N_e$  и  $T_e$ , а также небольшие вариации градиента  $B_{\text{EAST}}$  и плотности продольного тока величиной  $\sim 0.005 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Регулярное появление вариаций  $B_{\text{EAST}}$  в этой области ионосферы, как отмечалось выше, может быть связано с модификацией ионосферы через излучение бокового лепестка диаграммы направленности передающей антенны стенда.

### 3.4. Сеанс 7.IX.2017

КА S-C пролетал в условиях ночной ионосферы ( $T^* = 18.59.48 \text{ UT}$ ) на высоте 450 км в направлении с севера на юг практически через центр возмущенной магнитной силовой трубки (рис. 4а). ВН излучалась на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4300 \text{ кГц}$  при  $f_{0F_2} = 4.4 \text{ МГц}$  с эффективной мощностью излучения  $P_{\text{эфф}} = 50 \text{ МВт}$ ; высота отражения ВН составляла  $h \approx 260 \text{ км}$ . Эксперимент проводился в начальной фазе развития геомагнитной суббури с  $K_p$  до 8 ( $\Sigma K_p = 29^-$ ,  $AE \approx 300 \text{ нТ}$ ). Во время нагрева ионосферы наблюдалось развитие очень сильной диффузности на ионограммах вертикального зондирования, что связано с высоким уровнем естественной геомагнитной возмущенности. Особенностью эксперимента было то, что он проводился в условиях, когда  $f_{\text{ВН}} \approx f_{0F_2}$ . При этом, как показывает практика проведения нагревных экспериментов, возбуждение плазменных возмущений во внешней ионосфере не является оптимальным из-за сильного просачивания энергии ВН во внешнюю ионосферу. Это касается, например, формирования дактов плотности плазмы [9].

На рис. 4б–4д представлены результаты измерений КА S-C в сеансе 7.IX.2017. Сразу после 19.00 UT, когда спутник находился вблизи южного края магнитной силовой трубки, наблюдались сильные изменения характера регистрируемых сигналов: резко пропало связанное с нагревом плазмы увеличение температуры  $T_e$  и исчезли вариации концентрации  $N_e$  (рис. 4б, 4в). Можно предположить, что в этой области частота ВН была во время измерений выше критической частоты  $f_{0F_2}$ , что привело к срыву генерации здесь ИИТ. Отмечается, что в этом сеансе максимум увеличения  $T_e$  оказался смещенным на 40–90 км к югу от центра диаграммы направленности ан-

тенны стенда. Такое большое смещение может иметь место, когда  $f_{\text{ВН}} \approx f_{0F_2}$ .

Для обоих спутников в интервале широт  $54^\circ$ – $56.5^\circ$  с.ш. наблюдаются сильные вариации концентрации плазмы, причем для КА S-A, который летел в 150 км к западу от центра возмущенной трубки, они даже больше привязаны ко времени пролета спутника рядом с возмущенной магнитной силовой трубкой, показывая, в среднем, уменьшение концентрации плазмы на 24% с сильными вариациями южнее  $55^\circ$  с.ш. и с локальным увеличением здесь  $N_e$ . Для КА S-C в рассматриваемой области широт имеет место увеличение  $N_e$  на 13% на  $55^\circ$ – $56^\circ$  с.ш., или севернее центра возмущенной трубки. Южнее центра можно видеть флуктуации концентрации плазмы величиной  $\sim 7\%$  с масштабом  $l_\perp \approx 30$  км. Поскольку их уровень по данным обоих спутников, вообще говоря, соответствует уровню вне возмущенной трубки, трудно однозначно отнести их к искусственным.

Из данных, представленных на рис. 4г, 4д, видно, что наиболее сильные вариации плотности тока и градиента магнитного поля  $B_{\text{EAST}}$  с амплитудой 2 нТл наблюдаются около широты  $54^\circ$ , которая соответствует южному краю диаграммы направленности излучения стенда, уже вне области регистрации каких-либо видимых изменений  $T_e$ . Немного южнее этой области на широте  $53.7^\circ$  обнаруживается втекающий ток плотностью до  $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$  (область выноса электронов наверх). Также, на южном крае возмущенной трубки регистрируется вытекающий ток плотностью до  $0.015 \mu\text{A}/\text{m}^2$  и втекающий ток ближе к ее центру на широте около  $55^\circ$ . При этом, первый ток можно соотнести с областью максимума увеличения температуры  $T_e$  на широте  $\sim 54.5^\circ$ , а второй (втекающий ток) находится около максимума  $T_e$ , расположенного вблизи центра возмущенной трубки на широте  $\sim 54.9^\circ$ . Все это наблюдается на фоне флуктуаций продольных токов естественного происхождения с амплитудой до  $0.01 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , что сильно затрудняет выделение на их фоне индуцированных нагревом токов. Малую интенсивность индуцированных нагревом ионосферы токов можно связать с низкой эффективностью взаимодействия ВН с ионосферной плазмой в условиях, когда  $f_{\text{ВН}} \cong f_{0F_2}$ . Сравнение выполненных двумя спутниками измерений показывает, что поперечный (относительно геомагнитного меридиана) размер области с возбужденными токами здесь не превышает 150 км, подтверждая ранее полученные результаты.

Как можно заключить из рассмотренного примера, существование как втекающих, так и выте-

кающих токов возможна и в отсутствии регистрируемых спутником возмущений концентрации плазмы внутри нагретой магнитной силовой трубки, в данном примере – при наличии областей с сильным разогревом плазмы мощной радиоволной.

### 3.5. Сеанс 30.VIII.2016

Траектории пролетов КА S-A и S-C представлены на рис. 5а. Ближайший к области нагрева КА S-C пролетал на высоте 450 км с севера на юг в 20 км к востоку от центра возмущенной магнитной силовой трубки в вечерние часы в еще освещенной Солнцем ионосфере ( $T^* = 17.03.24$  UT); КА S-A в это же время пролетал в 80 км к западу от центра трубки. Модификация ионосферы проводилась на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4720$  кГц при критической частоте  $f_{0F_2} \approx 5.6$  МГц, эффективная мощность излучения составляла  $P_{\text{эфф}} = 95$  МВт, высота отражения мощной радиоволны была около 240 км. Эксперимент проводился на стадии начала развития геомагнитных возмущений среднего уровня ( $\Sigma K_p = 24^+$ ; во время проведения измерений индекс  $K_p$  был  $\sim 4$ ,  $AE \approx 500$  нТ).

Спутниковые измерения представлены на рис. 5б–5д. В области от центра возмущенной трубки до ее южного края наблюдается формирование максимума концентрации плазмы (панель б) с увеличением до 3% относительно ее фонового значения без какого-либо изменения температуры  $T_e$  в это время (панель в). Однако, когда спутник пересекал трубку от центра до ее северного края, наоборот, не наблюдается каких-либо значительных вариаций концентрации плазмы, (за исключением максимума концентрации на северном крае трубки), но регистрируется увеличение  $T_e$  на 1–2%, не захватывающее области увеличения  $N_e$ .

Вдоль орбиты КА S-A наблюдались вариации концентрации плазмы величиной 1–2% без значимых изменений  $T_e$ . В этих измерениях регистрируются области с повышенной концентрацией электронов, что не типично для результатов ранее рассмотренных нагревных экспериментов, причем не наблюдается какой-либо их корреляции с вариациями температуры электронов.

Результаты измерений индуцируемых нагревом ионосферной плазмы плотности токов, выполненные бортовой аппаратурой КА S-C, приведены на рис. 5г, 5д, из которых можно сделать следующие выводы об их величине и пространственной структуре. Видно, что в южной части трубки – в области, где была зарегистрирована область с увеличенной концентрацией плазмы,

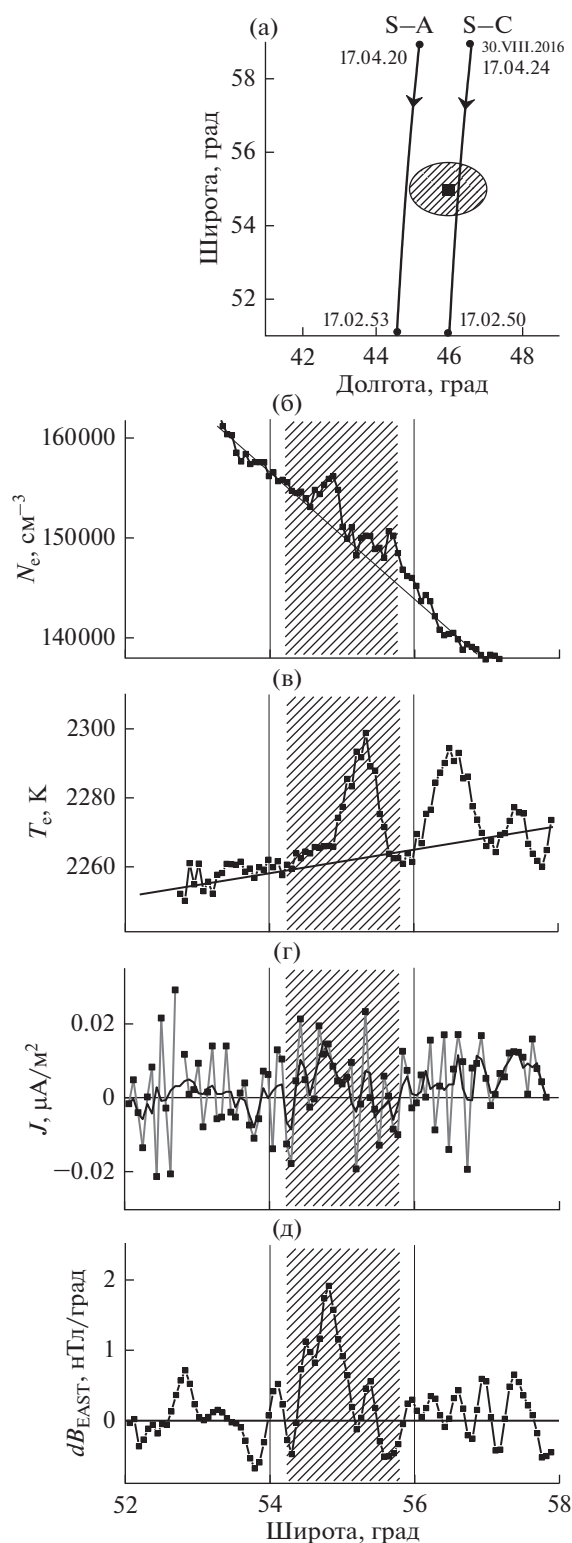


Рис. 5. То же, что на рис. 1, но для сеанса 30.VIII.2016.

наблюдается положительный (втекающий в ионосферу) ток плотностью до  $0.015 \mu\text{A}/\text{m}^2$  с максимумом на широте  $54.8^\circ$ . Этот ток соответствует выносу электронов из центральной части ВО

ионосферы вверх во внешнюю ионосферу. На широтах  $53.8^\circ$  и  $55.8^\circ$ , или на  $\sim 110$  км севернее и  $\sim 110$  км южнее этой области, регистрируются отрицательные токи плотностью до  $0.01 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , отвечающие наоборот движению электронов вниз из верхней ионосферы. Форма вариации  $B_{\text{EAST}}$  (последовательное увеличение и уменьшение  $B_{\text{EAST}}$  вдоль траектории пролета в области нагрева) подтверждает пересечение спутником втекающего и вытекающего продольных токов.

Отличительные особенности этого эксперимента от рассмотренных ранее связаны с тем, что измерения проводились в условиях развивающейся магнитной суббури, когда при индексе  $AE \approx 500$  нТ авроральные возмущения опускаются до широты стенда СУРА, сильно изменяя как условия взаимодействия мощной радиоволны с ионосферной плазмой, так и возможность регистрации искусственных плазменных возмущений [33]. Не исключено, что в этих измерениях регистрировались токи естественного происхождения. Как и раньше, уменьшение плотности плазмы в области  $56^\circ - 57^\circ$  с.ш. с увеличением здесь  $T_e$  можно отнести за счет модификации ионосферы в области бокового лепестка диаграммы направленности излучения антенны стенда.

### 3.6. Сеанс 27.V.2017

КА S-B пролетал в условиях ночной ионосферы ( $T^* = 21.40.34$  UT) на высоте 510 км в направлении с юга на север в 30 км к востоку от центра возмущенной магнитной силовой трубки (рис. 6а). Модификация ионосферы проводилась с 20.00.00 UT до 21.27.00 UT на  $f_{\text{ВН}} = 4740$  кГц в режиме [3 мин – излучение, 3 мин – пауза], эффективная мощность излучения ВН составляла  $P_{\text{эфф}} = 85$  МВт, высота ее отражения была  $\sim 280$  км. Эксперимент проводился во время начала развития геомагнитных возмущений, но еще в достаточно спокойных геомагнитных условиях ( $\Sigma K_p = 13^+$ ,  $AE \approx 200$  нТ). Особенностью этого сеанса являлось то, что во время измерений значение критической частоты  $f_{0F_2}$  плавно уменьшалось от 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. Отмечалось, что даже при  $f_{0F_2} \approx 4.5$  МГц во время нагрева ионосферы еще продолжало наблюдаться развитие сильной диффузности на ионограммах. Однако ее уровень резко ослаб, когда значение  $f_{0F_2}$  упало ниже 4.5 МГц. Возможность генерации интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей при частоте ВН, превышающей частоту  $f_{0F_2}$  на величину до  $\sim 200$  кГц, неоднократно отмечалась ранее (см., например, [34, 35]). Этот эф-



фekt связан с тем, что даже в этих условиях частота верхнегибридного резонанса (в нашем случае  $f_{\text{ВГР}} \approx 4.56$  МГц) остается меньше  $f_{0F_2}$  и, хотя с меньшей эффективностью, продолжается развитие тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости. Особенно это проявляется при уже сильно развитой ИИТ. Исходя из этого, можно считать, что после 21.00.00 UT модификация ионосферы фактически проводилась в условиях нагрева “на просвет” без генерации искусственных ионосферных неоднородностей. Последнее включение ВН в этом сеансе измерений было с 21.24.00 до 21.27.00 UT, т.е. еще за 14 мин до пролета спутника и заведомо уже в режиме нагрева “на просвет”. Если считать, что генерация ИИТ и искусственных неоднородностей концентрации плазмы закончилась где-то после 21.00 UT, когда величина  $f_{0F_2}$  стала ниже 4.5 МГц, то в обычных условиях за время 30–40 мин неоднородности вплоть до километровых масштабов должны были бы уже в значительной степени релаксировать. Кроме того, существующий на ионосферных высотах горизонтальный дрейф плазмы ночью со скоростью 30–100 м/с даже в спокойных геомагнитных условиях, должен был привести к выносу индуцированных нагревом ионосферы возмущений плотности из центральной части ВО на расстояние 50–180 км, как это наблюдалось, например, в экспериментах [36]. Все вышесказанное указывает на то, что аппаратура спутника не должна была регистрировать в ранее возмущенной магнитной силовой трубке сколь-нибудь значительных искусственных возмущений. Однако это оказалось не так.

На рис. 6б, 6в представлены результаты измерений  $N_e$  и  $T_e$  в интервале широт  $53^\circ$ – $57^\circ$  с.ш. Для этого сеанса были характерны большие фоновые градиенты параметров ионосферной плазмы: на промежутке между  $54^\circ$  и  $56^\circ$  величина  $N_e$  уменьшилась с 9000 до 7000  $\text{см}^{-3}$  при росте  $T_e$  от 1400 до 1500 К. Для того, чтобы выделить на этом фоне мелкомасштабные флуктуации, линейные тренды при обработке данных были вычтены. На рис. 6б, 6в можно видеть, что в области широт  $54.5^\circ$ – $55.5^\circ$  наблюдаются чередующиеся уменьшения и увеличения  $N_e$  величиной до 3–7%, которые расположены внутри возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на центральную часть ВО ионосферы с сильно развитой ИИТ в условиях ее модификации мощной радиоволной. Размер вариаций плотности плазмы вдоль орбиты спутника в этой структуре составляет около 15 км для областей с пониженной плотностью и  $\sim 25$  км для областей с повышенной плотностью плазмы. Коррелированное уменьшение плотности плаз-

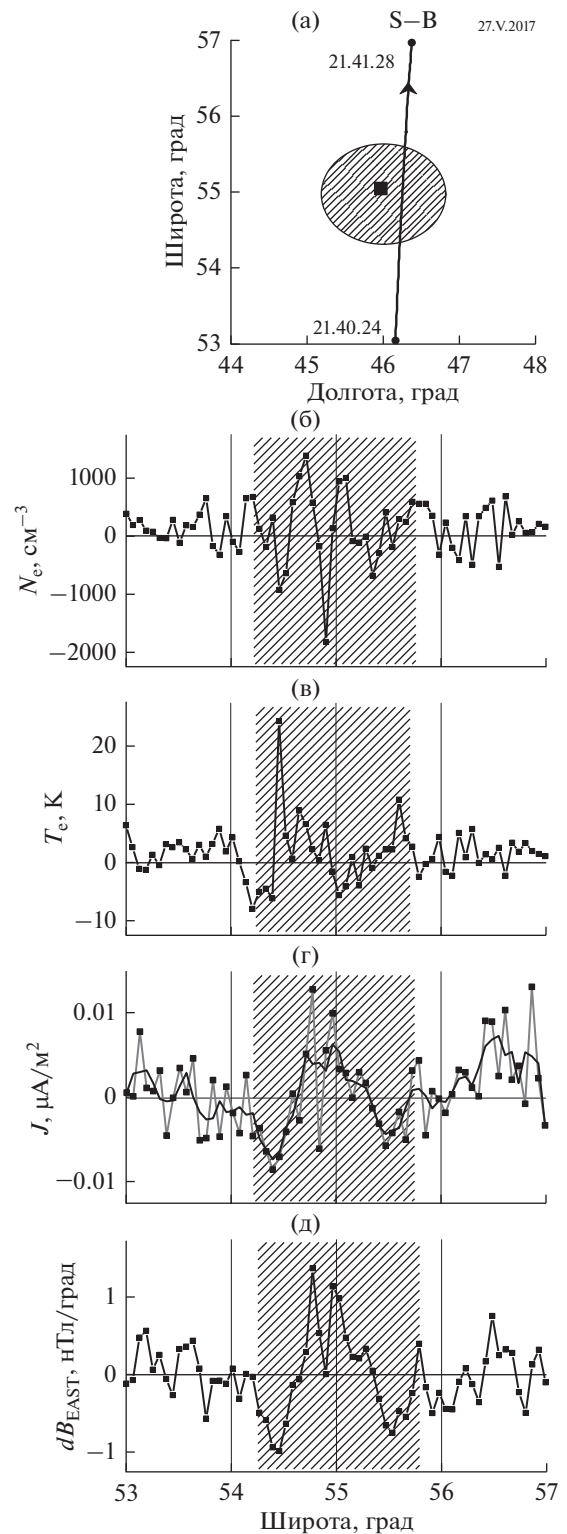


Рис. 6. То же, что на рис. 1, но для сеанса 27.V.2017.

мы и увеличение температуры электронов было зарегистрировано только на южном крае трубки. Остальные вариации  $N_e$  не имеют своего соответствующего отклика в вариациях  $T_e$ .

Рисунок бг, бд показывает, что около 21.40.53 UT близко к центру возмущенной трубки (в области наиболее сильной неоднородности с дефицитом концентрации плазмы, но лишь слабого увеличения температуры электронов) регистрировался втекающий ток, отвечающий выносу электронов вверх, в то время как по краям возмущенной трубки (измерения в 21.40.46 UT и 21.41.02 UT) регистрировались вытекающие токи. Величины плотности всех этих токов были  $\sim 0.005 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Положение втекающего тока вблизи южной границы трубки соответствует области с наиболее высокой температурой  $T_e$ . Как нетрудно видеть, в рассматриваемом случае области со значительно повышенной температурой и пониженной концентрацией могут не совпадать. Остается неясным: почему через  $\sim 30$  мин после окончания эффективного воздействия мощной радиоволны на ионосферную плазму, когда должна наблюдаться стадия релаксации плазменных возмущений, в центре возмущенной магнитной силовой трубки продолжают регистрироваться втекающий ток (как на стадии развития неоднородности), который соответствует выносу электронов вверх, так и сильные неоднородности плотности плазмы? Нельзя исключать, что в ночных условиях проведения измерений, когда они к тому же проводятся при повышенном уровне геомагнитной активности, после выключения ВН поддержание неоднородностей концентрации плазмы осуществляется уже за счет естественного механизма их образования, как это имело место, например, в экспериментах [37].

В качестве другой причины, оказывающей влияние на поддержание высокого уровня неоднородностей плотностей плазмы, может рассматриваться высыпание энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированное нагревом ионосферы мощным КВ радиоизлучением [33]. Однако эта гипотеза нуждается в экспериментальной проверке и теоретическом обосновании.

### 3.7. Результаты других измерений

Представленные в разделах 3.1–3.6 результаты экспериментальных исследований демонстрируют влияние различных факторов на генерацию и свойства продольных электрических токов, возбуждаемых при модификации среднеширотного  $F_2$ -слоя ионосферы мощными КВ радиоволнами. Помимо этих имеются данные и других сеансов измерений, которые подтверждают или дополняют сделанные выше выводы. Так измерения, проводимые в условиях очень сильных геомагнитных возмущений (как, например, для 2.IX.2016, когда

индекс  $K_p$  достигал значений 5–6 при  $AE \approx 800$ –1000 нТ), не позволили получить сколь-нибудь значимые результаты по характеристикам искусственных плазменных возмущений и индуцированных нагревом ионосферным токам из-за высокого уровня естественной возмущенности ионосферы на широте стенда СУРА. Не удалось обнаружить генерацию продольных токов, когда измерения проводились в условиях освещенной ионосферы в поздние утренние и полуденные часы, когда генерация искусственных плазменных возмущений ионозондом либо вообще не регистрировалась, либо они имели слабую интенсивность. Следует дополнительно отметить, что эти измерения проводились, когда высота отражения ВН была 180–190 км, т.е. ниже 200 км, что является неоптимальным для генерации интенсивной искусственных плазменных возмущений во внешней ионосфере [9]. Кроме того, в ряде случаев измерения проводились при частоте ВН лишь немного ниже критической частоты  $f_{oF_2}$ , что также не отвечало оптимальным условиям генерации возмущений.

Дополнительно к данным, представленным в разделах 3.1–3.6, были получены и другие примеры, когда регистрация на высоте  $h \approx 450$  и 500 км крупномасштабной неоднородности с пониженной концентрацией плазмы не сопровождалась ростом в этой области температуры электронов, и наоборот, область с увеличенной  $T_e$  не совпадала с областью с пониженной плотностью плазмы. Тем не менее, во внешней ионосфере при этом регистрировалась генерация продольных электрических токов.

### 3.8. Сводка результатов исследований условий генерации и свойств электрических токов, индуцируемых при нагреве ионосферы мощными радиоволнами

Анализ результатов выполненных на среднеширотном стенде СУРА исследований позволяет сделать следующие выводы.

1) При модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации на высотах внешней ионосферы ( $\sim 500$  км) наблюдается образование определенной пространственной структуры продольных электрических токов. Преимущественно это происходит в условиях вечерней и ночной ионосферы при достаточно высоких мощностях ВН (как правило, при  $P_{\text{эфф}} \geq 50$  МВт), когда ее частота была ниже критической частоты  $F_2$ -слоя. В этом случае на ионограммах вертикального зондирования регистрируются развитие как сильного или очень

сильного  $F$ -рассеяния, так и подавление сигналов на частотах вблизи частоты ВН на обеих модах распространения вследствие развития эффектов их аномального поглощения и рассеяния в свою моду, что является свидетельством развития интенсивной ИИТ при взаимодействии мощной радиоволны  $O$ -поляризации с плазмой верхней ионосферы Земли. Отметим, что выполнение вышеперечисленных условий является также необходимым для развития интенсивных плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы и появления высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли.

Однако даже при выполнении этих условий, но при сильной геомагнитной возмущенности, индуцированные нагревом ионосферы продольные электрические токи не регистрировались аппаратурой спутника, поскольку в таких условиях граница аврорального овала опускается до широты станда СУРА, что приводит к невозможности выделения искусственных токов на фоне более сильных их естественных составляющих. Кроме того, рост геомагнитной активности вызывает увеличение регулярного поглощения радиоволн в нижних слоях ионосферы, уменьшая транспортируемую в верхнюю ионосферу мощность ВН и, следовательно, интенсивность возбуждаемой турбулентности. На генерацию электрических токов также сильное влияние может оказать присутствие спорадического слоя  $E_s$ , когда он ослабляет интенсивность прошедшей в верхнюю ионосферу мощной радиоволны и может даже экранировать ее полностью по всей ВО или в локальных ее областях.

Измеренная величина плотности втекающего в ионосферу тока, который связывается с выносом электронов из сильно нагретой центральной части ВО ионосферы, составляет в среднем около  $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$  при эффективной мощности излучения ВН  $P_{\text{эфф}} \approx 50 \text{ МВт}$  и оптимальных условиях модификации верхней ионосферы; в неоптимальных условиях величина плотности продольного тока была в 2–4 раза меньше, опускаясь почти до уровня его обнаружения или даже ниже.

Результаты выполненных экспериментов позволяют заключить, что эффект “магнитного зенита” при модификации  $F_2$ -области ионосферы оказывает сильное влияние на эффективность как генерации ИИТ, так и системы электрических токов.

Для выяснения механизма генерации продольных токов важным является получение ответа на вопрос, как соотносятся пространственные структуры вариаций электронной концентрации и температуры плазмы с вариациями плотности

продольных электрических токов. Казалось бы, что этот ответ содержится в представленных в разделе 3.2 измерениях, когда череда прозрачных и непрозрачных участков спорадического слоя  $E_s$  приводила к формированию соответствующей “мозаичной” структуры ВО в верхней ионосфере с областями с уменьшенной концентрацией плазмы, в которых наблюдается увеличение температуры  $T_e$ . Как видно из рис. 2, положение областей с уменьшенными значениями  $N_e$  и увеличенной температурой  $T_e$  совпадает с положением областей с втекающими токами или с выносом электронов из центральной части ВО вверх вдоль силовых линий геомагнитного поля. Подобная структура возмущений плотности и температуры плазмы отвечает структуре продольных токов, измеренных в лабораторных экспериментах [20–22], обсуждение результатов которых представлено в следующем разделе работы. Однако в нагревных ионосферных экспериментах такая корреляция положения плазменных возмущений и токов имела место далеко не всегда. Как было продемонстрировано в разделе 3, область втекающего тока может соответствовать области сильного разогрева плазмы, но при этом может не регистрироваться обычно наблюдающееся уменьшение ее плотности. И наоборот, положение втекающего тока может совпадать с областью изменения концентрации плазмы в отсутствии видимых изменений ее температуры. Все это может указывать на то, что измеряемые аппаратурой спутников вариации плотности и температуры плазмы на высотах 450 и 510 км не всегда находятся в соответствии друг с другом. Поэтому они могут и не являться теми плазменными возмущениями, развитие которых определяет генерацию электрических токов.

Как было отмечено во введении, область высот 450–500 км является промежуточной, где происходит изменение механизмов формирования плазменных возмущений. На этих высотах уже не проявляются в полной мере свойства центральной части ВО: например, не регистрируется сильное понижение плотности плазмы за счет ее разогрева вблизи высоты отражения ВН, но еще могут наблюдаться сильные вариации температуры электронов  $T_e$ , присущие центральной части ВО. В то же время, исследуемая в данной работе область находится ниже высот  $\sim 600$  км, где при модификации  $F_2$ -области наблюдается формирование дактов с большой избыточной плотностью плазмы, но с достаточно слабыми вариациями  $T_e$ . Как показано в [23], вариации плотности плазмы в этой промежуточной области (на высотах орбит КА SWARM) не отражают того, что наблюдается



выше и ниже ее. Поэтому в зависимости от того, как далеко по высоте орбита спутника проходит относительно центральной части ВО, могут наблюдаться различные соотношения между индуцируемыми нагревом плазменными возмущениями и связанными с этим электрическими токами. В одних случаях они могут отражать в большей степени вклад области ионосферы с дефицитом плотности плазмы, располагающейся вблизи высоты отражения ВН, тогда как в других — вклад области внешней ионосферы с дефицитом плотности плазмы и генерируемых на этих высотах неоднородностей.

Особый интерес представляют результаты измерений, когда спутник пролетал в условиях выключенной уже в течение 13 мин ВН (см. раздел 3.6). Более того, еще за 30 мин до его пролета через возмущенную магнитную силовую трубку критическая частота  $f_{0F_2}$  упала ниже частоты 4.5 МГц при  $f_{\text{ВН}} = 4740$  кГц и по ионограммам было отмечено сильное уменьшение эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Поэтому следовало бы считать, что в этом сеансе измерения проводились, фактически, на стадии релаксации ИИТ. Однако аппаратура спутника зарегистрировала, как и в случае измерений во время нагрева ионосферы (на стадии развития ИИТ), втекающий ток, хотя и небольшой величины  $J \approx 0.005$   $\mu\text{А}/\text{м}^2$ . Причиной этого возможно является то, что в условиях проведения измерений в ночное время суток да еще при повышенном уровне геомагнитной активности поддержание неоднородностей концентрации плазмы, сгенерированных во время модификации ионосферы мощными радиоволнами, может продолжаться часами уже за счет естественных механизмов, как это наблюдалось в [37]. Здесь также еще предстоит выяснить роль стимулированного нагревом плазмы высыпания энергичных электронов на генерацию плазменных возмущений.

2) Выполненные эксперименты показали, что часто для рассматриваемых в работе измерений на расстоянии  $\sim 200$  км к северу от центра возмущенной магнитной силовой трубки обнаруживалась выделенная область с сильными флуктуациями концентрации и температуры плазмы, которые по своим характеристикам были очень похожи на искусственные. При этом в этой области регистрировалась своя система втекающих и вытекающих продольных электрических токов. Существование такой области может быть связано с воздействием на ионосферную плазму мощной радиоволной, излучаемой в первый северный боковой лепесток диаграммы направленности антенны станда. Как было определено в работе [31], он заметно усиливается при наклоне диаграммы

направленности на  $12^\circ$  на юг по сравнению с вертикальной диаграммой излучения станда. По своему уровню он на 8 дБ слабее главного лепестка, что соответствует эффективной мощности излучения в нем  $\sim 10$  МВт, достаточной для генерации ИИТ в вечерних и ночных условиях [1, 4]. Следует принимать во внимание, что воздействие на плазму в этих областях может усиливаться за счет дополнительной фокусировки мощной радиоволны на создаваемых при нагреве ионосферы градиентах плотности плазмы, как это наблюдалось в экспериментах [32].

3) При интерпретации результатов спутниковых измерений необходимо учитывать следующее. Как хорошо установлено (см., например [3, 4, 7, 9]), над стандом СУРА возмущения концентрации плазмы в центральной части ВО и на высотах внешней ионосферы имеют сложную пространственную структуру, захватывая большой объем ионосферы: от  $\sim 100$  до  $>1000$  км по высоте и до 500 км в горизонтальном направлении. При этом измерение характеристик плазменных возмущений бортовой аппаратурой спутника в большинстве случаев носит единичный характер и выполняется только вдоль его орбиты на ее высоте. Это резко ограничивает объем получаемой необходимой информации о свойствах плазменных возмущений в ВО ионосферы и уменьшает возможности соотносить их с результатами других измерений. Следует также иметь в виду, что пространственная структура электрических токов в ионосфере, которая формируется вкладом многих плазменных возмущений, располагающихся на разных высотах, должна, естественно, сильно отличаться от ее характеристик для случая уединенной неоднородности, обычно используемой для теоретических и модельных расчетов.

4) Генерация индуцированных нагревом ионосферы электрических токов не наблюдается в условиях, если: а) частота ВН была близка или выше критической частоты  $f_{0F_2}$ ; б) высота ее отражения была ниже 200 км, где свойства ионосферы начинают резко изменяться из-за быстрого возрастающего влияния нейтралов на свойства плазмы и на взаимодействие мощной радиоволны с ней; в) эффективная мощность излучения ВН была низкой ( $\leq 20$  МВт), когда нет полного развития всех компонент ИИТ; г) эксперименты проводились в освещенной ионосфере с развитыми  $E$  и  $F_1$  слоями, когда наблюдается формирование дефокусирующей линзы на высотах 130–180 км, что с учетом еще и высокого регулярного поглощения радиоволн в нижней ионосфере приводит к сильному (до 20 дБ и больше) уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощ-

ности ВН; д) имела место сильная геомагнитная активность, когда граница авроральной ионосферы опускается до широты расположения стенда СУРА и изменяется характер взаимодействия мощной радиоволны с плазмой; при этом естественная турбулентность может превышать уровень искусственной, маскируя тем самым проявление нагревных эффектов.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ СООТВЕТСТВИЕ СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Рассмотрим кратко результаты экспериментов, выполненных в лабораторных плазменных установках ИПФ РАН (Нижний Новгород), в которых моделировалась генерация искусственных возмущений ионосферы. Первые результаты были получены на стенде “Ионосфера”, в которой реализовывались близкие к слою  $F_2$  параметры магнитоактивной плазмы [20]. Размещенные внутри плазменной камеры различные датчики позволяли отслеживать изменения плотности и температуры электронов плазмы как вдоль, так и поперек линий создаваемого к камере магнитного поля. В этих экспериментах с помощью помещенной в плазму рамочной антенны, на которую подавался импульс высокочастотного напряжения, происходил сильный локальный разогрев электронов плазмы с увеличением их температуры более чем в 3 раза. Возмущение температуры электронов распространялось вдоль магнитного поля в виде своеобразной тепловой волны. При этом происходило уменьшение плотности плазмы за фронтом тепловой волны (формировался канал с пониженной концентрацией плазмы) и увеличение плотности перед ее фронтом. Выполненные эксперименты и моделирование позволили установить, что термодиффузионное перераспределение концентрации плазмы происходит за счет диффузии электронов вдоль силовых линий магнитного поля, а ионов — поперек, т.е. за счет униполярной диффузии с возбуждением вихревых токов по фоновой плазме, когда электрический ток направлен вдоль магнитного поля к источнику нагрева, а по фоновой плазме — в обратном направлении [17]. Это сопровождается движением ионов поперек силовых линий магнитного поля из области разогрева плазмы, а вдали от нее — из фоновой плазмы к оси возмущенной силовой трубки, осуществляя “замыкание” цепи текущих в плазме электрических токов. На стадии релаксации возмущений (после выключения высокочастотного импульса нагрева плазмы) направление движения электронов и ионов меняется на противоположное, и происходит восстановление

концентрации плазмы до ее невозмущенного состояния с протеканием макроскопических вихревых токов.

На основе рассмотренных выше экспериментальных данных были выполнены теоретические исследования характера процессов термодиффузии плазменных образований конечных размеров [17, 38]. Полученные уравнения переноса плазменных возмущений в магнитоактивной плазме решались численными методами. Было показано, что в рассматриваемом случае “процессы неоднородной термодиффузии замагниченной плазмы сопровождаются формированием вихревых токов, протекающих по возмущенной и фоновой плазме и обеспечивающих квазинейтральность плазмы более быстрыми по сравнению с амбиполярными процессами переноса”. Эти выводы хорошо соответствуют результатам экспериментальных исследований. В работе [39] также было показано, что при этом характерные размеры возмущенной области концентрации плазмы существенно превосходят масштабы области ее температурного возмущения. Это объясняется тем фактом, что в области протекания токов по фоновой плазме происходит возмущение ее плотности.

В развитие рассмотренных выше экспериментальных исследований в последние годы в ИПФ РАН были проведены эксперименты по изучению термодиффузионных процессов в магнитоактивной плазме на стенде “Крот”, который по сравнению со стендом “Ионосфера” обладает существенно большими размерами плазменного столба как вдоль, так и поперек линий внешнего магнитного поля. Кроме того, он оснащен датчиками, измеряющими напряженность магнитного поля, по вариациям которого на основе закона Ампера можно определять токи в плазме. На стенде “Крот” также можно создавать плазму, по своим характеристикам близкую к условиям в слое  $F_2$  ионосферы. Описание технических характеристик стенда “Крот”, его экспериментальных возможностей и используемых методик измерений приведено в работах [21, 22].

Выполненные на стенде “Крот” эксперименты позволили детально изучить пространственную структуру и амплитуду электрических токов, индуцированных при нагреве плазмы с помощью рамочной антенны, на которую подается импульс высокочастотного напряжения. Прямыми измерениями показано, что внутри возмущенной магнитной силовой трубки движение электронов происходит вдоль магнитного поля в направлении от нагретой области, а по фоновой плазме — в обратном направлении. Замыкание этих токов происходит за счет движения ионов поперек ли-

ний магнитного поля в направлении от разогретой области вблизи нее и из фоновой плазмы к центру возмущенной трубки вдали от нее. Это подтверждает вывод об униполярном характере перераспределения магнитоактивной плазмы (переносе плазменных возмущений), что приводит к более быстрому развитию возмущений концентрации плазмы при ее локальном нагреве, чем это было бы в амбиполярном приближении. Также было установлено, что на стадии развития плазменных возмущений имеет место прямая связь между развитием неоднородности концентрации плазмы и системой параллельных электрических токов: они развиваются одновременно в одном и том же пространстве.

В работе [40] представлены результаты исследований на стенде “Крот” особенностей развития группы из двух или трех рядом расположенных неоднородностей, формирующихся в различных силовых трубках двумя или тремя источниками высокочастотного нагрева плазмы. Было установлено, что рядом расположенные неоднородности могут сильно влиять на характер их релаксации за счет изменения характера поперечной диффузии ионов, когда ионы фоновой плазмы должны обеспечивать ее перераспределение одновременно в нескольких рядом расположенных неоднородностях — режим, так называемой, контролируемой ионами униполярной диффузии. Такое влияние имеет место, если ионы слабо замagnetичены при сильно замagnetиченных электронах, как это имеет место в  $E$ -слое ионосферы. В этом случае характерное время релаксации структуры из нескольких неоднородностей увеличивается по сравнению со случаем уединенной неоднородности.

По сравнению с ионосферными экспериментами очевидна ограниченность полученных лабораторных результатов, связанная с малым числом индуцируемых нагревом неоднородностей концентрации плазмы и их расположением в линию.

Завершая данный раздел, отметим, что в работах [21, 22] рассматриваются возможности лабораторного моделирования на плазменных установках ИПФ РАН физических процессов в ионосфере и магнитосфере Земли в условиях нагрева ионосферы мощными КВ радиоволнами.

### ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В работе на ряде примеров из серии координированных экспериментов СУРА-*SWARM* было показано, что при модификации  $F_2$ -области среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации вместе с развитием ИИТ в

центральной части ВО (в первую очередь это относится к разогреву электронов плазмы и генерации искусственных ионосферных неоднородностей различных масштабов) на высотах 450–500 км внутри возмущенной магнитной силовой трубки (как правило, ближе к ее южному краю из-за влияния эффекта “магнитного зенита”) регистрируется возбуждение направленных вниз продольных электрических токов, отвечающих выносу электронов из области разогрева вдоль линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу. Одновременно с этим, на флангах ВО (по спутниковым наблюдениям южнее и севернее области втекающих токов) наблюдались токи противоположного направления, отвечающие обратному движению электронов вдоль силовых линий геомагнитного поля.

Возбуждение такой системы продольных токов наблюдалось ранее при расплывании локально нагретой области магнитоактивной плазмы в лабораторных плазменных установках. Это отвечает униполярному характеру термодиффузионного распространения плазменных возмущений с генерацией вихревых токов, продольные компоненты которых определяются движением электронов вдоль магнитного поля, а поперечные — движением ионов поперек него. При этом скорость процессов термодиффузии с униполярными коэффициентами во много раз превышает скорость расплывания плазменных возмущений в амбиполярном приближении. Как было видно из результатов лабораторных экспериментов, плазма выталкивается из области ее сильного разогрева вдоль силовых линий магнитного поля, формируя области с повышенной концентрацией. В ионосферных экспериментах это приводит к формированию дактов с избыточной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы.

Формирование области с дефицитом концентрации плазмы вблизи высоты отражения мощной радиоволны в  $F_2$ -слое ионосферы (фокусирующая линза) и дакта с увеличенной плотностью плазмы на высотах выше 500 км — хорошо известные в ионосферных экспериментах явления, нашедшие свою интерпретацию в работах [10, 11, 16, 17]. В рамках этой интерпретации разогрев электронов и вынос плазмы из области разогрева — жестко связанные термодиффузионные процессы. Однако при анализе полученных в ионосферных измерениях экспериментальных данных было показано, что их прямая связь проявляется далеко не всегда. Такое рассогласование может быть связано со сложной пространственной структурой вариаций концентрации плазмы в возмущенной магнитной силовой трубке и вокруг нее, что не отвечает идеализированному случаю уединенной

неоднородности, обычно используемому как в лабораторных экспериментах, так и в теоретических работах.

Схема термодиффузионных процессов с униполярными коэффициентами с генерацией вихревых токов, которая наблюдается при эволюции плазменных возмущений, возбуждаемых в результате генерации ИИТ при развитии взаимодействия мощной радиоволны с магнитоактивной плазмой, может объяснить следующие наблюдаемые эффекты:

1) в ионосферных экспериментах по изучению переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля измеренная скорость переноса после включения ВН достигала тепловой скорости электронов, что находится в согласии с механизмом униполярной термодиффузии [41, 42];

2) генерация возмущений концентрации плазмы далеко за пределами границы пучка мощных радиоволн (на расстоянии до 200–300 км от его центра) можно связать с протекающими на таком удалении по фоновой плазме возвратными продольными токами, которые могут стимулировать развитие неоднородностей [43, 44];

3) ниже центральной части ВО ионосферы замыкание вихревых токов происходит по высокопроводящему  $E$ -слою ионосферы. Наличие индуцированных нагревом верхней ионосферы токов в  $E$ -области еще на стадии развития ИИТ в  $F_2$ -области может объяснить быстрое развитие неоднородностей концентрации плазмы одновременно в обеих ионосферных областях, как это наблюдалось, например, в [45].

В ионосферных экспериментах аппаратура спутника зарегистрировала области с сильным (до 3000 К) увеличением температуры электронов, плотность продольных электрических токов в которых составляла до  $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$  в оптимальных условиях генерации ИИТ. Следует отметить, что измеренные в экспериментах СУРА–*SWARM* значения индуцированных нагревом ионосферы продольных токов оказываются лишь в 3–5 раз меньше продольных токов в авроральной области ионосферы в отсутствие сильных геомагнитных возмущений [15], что указывает на высокую эффективность их генерации при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации.

Продольный электрический ток может быть также связан с уходом из ВО ионосферы электронов, ускоренных до сверхтепловых энергий в областях с интенсивной плазменной турбулентностью или сильного разогрева плазмы. Сделанные в работе [18] оценки по измерениям на высоко-

широтном стенде EISCAT-heating (Тромсе, северная Норвегия), когда наблюдалось экстремально сильное искусственное оптическое свечение, дают величину плотности тока ускоренных электронов с энергиями до 11 эВ, равную  $0.06 \mu\text{A}/\text{m}^2$ . Учитывая, что наиболее интенсивное оптическое свечение, наблюдаемое на стенде СУРА в линии кислорода  $6300 \text{ \AA}$ , больше чем на порядок слабее зарегистрированного на стенде EISCAT-heating, ток ускоренных электронов над стендом СУРА не должен превышать величины  $0.003 \mu\text{A}/\text{m}^2$ , что намного ниже тока, зарегистрированного в наших экспериментах с помощью детекторов КА *SWARM*, и находится ниже порога обнаружения для этих спутников.

Подводя итоги выполненным на стенде СУРА экспериментам с использованием для диагностики плазменных возмущений аппаратуры низкоорбитальной группировки КА *SWARM*, следует заключить, что впервые были измерены величина и пространственная структура продольных токов, возбуждаемых при нагреве  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации, и определена их зависимость от характеристик радиоволны и от ионосферных условий. Были выявлены условия возбуждения продольных токов, которые, в целом, соответствуют условиям возбуждения интенсивной ИИТ и сильному разогреву электронов ионосферной плазмы, и определены условия отсутствия их генерации. Были определены особенности измерения продольных токов в активных ионосферных экспериментах.

В развитие выполненных экспериментов на стенде СУРА крайне желательно было бы провести эксперименты на стенде EISCAT-heating, выполнив измерения характеристик электрических токов с помощью КА серии *SWARM* одновременно с измерениями температуры электронов, вариаций плотности плазмы и выноса ионов из области нагрева с помощью радара некогерентного рассеяния. Такие измерения позволили бы снять ряд вопросов в интерпретации наблюдаемых явлений и провести необходимые модельные расчеты.

Авторы благодарят сотрудников стенда СУРА, а также команду космической миссии *SWARM* Европейского космического агентства за помощь в организации и проведении экспериментов и получения данных спутниковых измерений. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00166. Сравнение результатов ионосферных и лабораторных исследований (раздел 4) было выполнено при поддержке РНФ, грант № 21-12-00385.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерухимов Л.М., Метелев С.А., Мясников Е.Н. и др. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 30. № 2. С. 208–225.
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145–1177.
3. 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.
4. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Нижний Новгород: Изд. ННГУ, 2017.
5. Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A. et al. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space // Space Sci. Rev. 2018. V. 214. № 118.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
6. Frolov V.L., Erukhimov L.M., Metelev S.A., Sergeev E.N. Temporal behavior of artificial small-scale ionospheric irregularities: Review of experimental results // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59. № 18. P. 2317–2333.
7. Фролов В.Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1. № 2. С. 22–45.  
<https://doi.org/10.12737/10383>
8. Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E. et al. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A10307.  
<https://doi.org/10.1029/2012JA017563>
9. Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А. и др. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации  $F_2$ -области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 3. С. 198–222.
10. Milikh G.M., Demekhov A., Vartanyan A. et al. A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L10102.  
<https://doi.org/10.1029/2012GL051718>
11. Белов А.С. Исследование пространственной структуры и динамика развития возмущений околоземной плазмы при воздействии мощного коротковолнового радиоизлучения // ЖЭТФ. 2015. Т. 148. Вып. 4. С. 758–765.
12. Фролов В.Л., Болотин И.А., Рябов А.О. и др. Высотные характеристики дактов плотности плазмы // XXVI Всероссийская открытая научная конференция “Распространение радиоволн”. Казань. 2019. Т. 2. С. 100–103.
13. Фролов В.Л., Комраков Г.П., Глухов Я.В. и др. Пространственная структура крупномасштабных возмущений плотности плазмы, возбуждаемых при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 2. С. 91–98.
14. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
15. Kelley M.C. The Earth’ Ionosphere. CA: Academic San Diego, 1989.
16. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Движение и расплывания неоднородностей в плазме // УФН. 1967. Т. 91. № 4. С. 609–643.
17. Рожанский В.А., Цендин Л.Д. Столкновительный перенос в частично ионизированной плазме. М.: Энергоиздат, 1988.
18. Kosch M.J., Vickers H., Ogawa Y. et al. First observation of the anomalous electric field in the topside ionosphere by ionospheric modification over EISCAT // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41. № 21. P. 7427–7435.  
<https://doi.org/10.1002/2014GL061679>
19. Kuo S., Cheng W.-T., Snyder A. et al. Contracting O/X-mode heater effects on O-mode sounding echo and the generation of magnetic pulsations // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L01101.  
<https://doi.org/10.1029/2009GL041471>
20. Голубятников Г.Ю., Егоров С.В., Костров А.В. и др. Исследование пространственной динамики нагрева и термодиффузии плазмы // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 4. С. 482–486.
21. Костров А.В., Назаров В.В., Стародубцев М.В. Лабораторное моделирование физических процессов в ионосфере при воздействии мощного радиоизлучения. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 8. С. 731–746.
22. Aidakina, N., Gushchin, M., Zudin I. et al. Density irregularities, currents, and magnetic fields generated by pulsed local rf heating of a magnetoplasma: Disturbances in rf antenna vicinity. // Physics of Plasmas. 2018. V. 25. P122104.  
<https://doi.org/10.1063/1.5054819>
23. Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Белов А.С. и др. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450–500 км при работе стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61. № 5. С. 359–373.
24. Lukianova R., Frolov V., Ryabov A. First SWARM observations of the artificial ionospheric plasma disturbances and field-aligned currents induced by the SURA power HF heating // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 12731–12738.  
<https://doi.org/10.1029/2019GL085833>
25. Olsen N., Friis-Christensen E., Floberghagen R. et al. The SWARM satellite constellation application and research facility (SCARF) and SWARM data product // Earth, Planets and Space. 2013. V. 65. № 11. P. 1189–1200.  
<https://doi.org/10.5047/eps.2013.07.001>
26. Friis-Christensen E., Lühr H., Knudsen D., Haagmans R. SWARM – An Earth observation mission investigating

- geospace // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. № 1. P. 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.10.008>
27. *Беликович В.В., Грач С.М., Караушин А.Н. и др.* Стенд СУРА: исследование атмосферы и космического пространства // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2007. Т. 50. № 7. С. 545–576.
28. *Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С.* Эффект магнитного зенита // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2005. Т. 48. № 9. С. 772–787.
29. *Allen E.M., Thome G.D., Rao P.V.* HF phased array observations of heater-induced spread-F // *Radio Sci.* 1974. V. 9. № 11. P. 905–916.
30. *Ерухимов Л.М., Комраков Г.П., Фролов В.Л.* О спектре мелкомасштабной части искусственной ионосферной турбулентности // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1980. Т. 20. № 6. С. 1112–1114.
31. *Zhang X., Frolov V., Shen X. et al.* The electromagnetic emissions and plasma modulations at middle latitudes related to SURA-CSES experiments in 2018 // *Radio Sci.* 2020. V. 55. e2019RS007040. <https://doi.org/10.1029/2019RS007040>
32. *Pedersen T., Gustavsson B., Mishin E. et al.* Optical ring formation and ionization production in high-power HF heating experiments at HAARP // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L18107. <https://doi.org/10.1029/2009GL040047>
33. *Фролов В.Л., Акчурина А.Д., Болотин И.А. и др.* Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2019. Т. 62. № 9. С. 641–663.
34. *Leyser T.B., Thide B., Derblom H. et al.* Dependence of stimulated electromagnetic emission on the ionosphere and pump wave // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95. № A10. P. 17233–17244.
35. *Frolov V.L., Chugurina V.V., Komrakov G.P. et al.* Study of large-scale irregularities generated in the ionospheric F region by high-power HF waves // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2000. V. 43. № 6. P. 497–519.
36. *Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Гетманцев Г.Г. и др.* Дифракция радиоизлучения дискретного источника Кассиопея-А на искусственных ионосферных неоднородностях // *Изв. вузов. Радиофизика.* 1976. Т. 19. № 12. С. 1902–1905.
37. *Utlaut W.F., Violette E.J.* A summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modification // *Radio Sci.* 1974. V. 9. № 11. P. 895–903.
38. *Курина Л.Е.* О термодиффузионных эффектах при нагреве электронов замагниченной плазмы полем ВЧ электромагнитного источника // *Физика плазмы.* 1998. Т. 24. № 10. С. 937–941.
39. *Воскобойников С.Н., Гурвич И.Ю., Рожанский В.А.* Неоднородная термодиффузия в магнитном поле // *Физика плазмы.* 1989. Т. 15. № 7. С. 828–837.
40. *Aidakina N., Gushchin M., Zudin I. et al.* Laboratory study of interaction of magnetoplasma irregularities produced by several radio-frequency heating sources // *Physics of Plasmas.* 2018. V. 25. P072114. <https://doi.org/10.1063/1.5012554>
41. *Фролов В.Л., Сергеев Е.Н., Штуббе П.* Исследование процессов переноса в верхней ионосфере Земли с помощью искусственной ионосферной турбулентности, создаваемой пучком мощных КВ радиоволн // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2002. Т. 45. № 2. С. 121–143.
42. *Фролов В.Л., Комраков Г.П., Недзвецкий Д.И. и др.* Об эффектах, наблюдаемых при воздействии мощными короткими радиоимпульсами на верхнюю ионосферу Земли // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2006. Т. 49. № 8. С. 643–663.
43. *Гельберг М.Г.* Образование мелкомасштабных неоднородностей в верхней ионосфере высоких широт // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 1984. Т. 24. № 6. С. 911–915.
44. *Мишин Е.В., Трухан А.А., Хазанов Г.В.* Плазменные эффекты сверхтепловых электронов в ионосфере. М.: Наука, 1990.
45. *Фролов В.Л., Беликович В.В., Бахметьева Н.В., Ушаков А.А.* Генерация искусственных ионосферных неоднородностей на высотах 130–170 км // XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Ростов-на-Дону. 2008. Т. 2. С. 134–137.