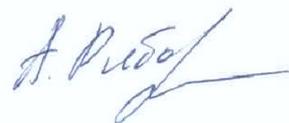


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского»

На правах рукописи



Рябов Александр Олегович

**Свойства искусственных возмущений верхней ионосферы Земли,  
возбуждаемых при нагреве F<sub>2</sub>-слоя мощными КВ радиоволнами  
(по результатам спутниковых исследований)**

Специальность 1.3.4. – Радиофизика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель,  
доктор физико-математических наук  
Фролов Владимир Леонтьевич

Нижний Новгород – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ И МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.....	12
1.1. Нагревный стенд «Сура».....	13
1.2. Искусственные спутники Земли группировки SWARM .....	17
1.3. Искусственный спутник Земли DEMETER.....	19
ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ НА ВЫСОТАХ 450 – 500 КМ ПРИ РАБОТЕ СТЕНДА «СУРА». .....	22
2.1. Организация экспериментов .....	23
2.2. Стимуляции вариаций характеристик плазменных возмущений на высотах 450 – 500 км .....	24
2.3. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере.....	37
2.3.1. Теоретические представления о связи между температурой электронов и потенциалом спутника.....	38
2.3.2. Экспериментальное исследование связи между температурой электронов и потенциалом спутника.....	39
2.4. Регистрация продольных токов, индуцированных нагревом стенда «Сура», на высотах 450 – 500 км .....	49
2.5. Заключение по второй главе .....	59
ГЛАВА 3. ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ МОДИФИКАЦИЕЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ.....	63

3.1. Организация измерений.....	65
3.2. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли над стендом «Сура» .....	68
3.2.1. Регистрация высыпаний энергичных электронов в естественных условиях.....	68
3.2.2. Регистрация высыпаний энергичных электронов в условиях нагрева ионосферы мощными радиоволнами .....	72
3.2.3. Основные выводы по экспериментальным данным .....	84
3.3. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли в магнитосопряженной относительно стенда «Сура» области ионосферы .....	85
3.3.1. Регистрация высыпаний энергичных электронов в естественных условиях .....	86
3.3.2. Регистрация высыпаний энергичных электронов в условиях стимуляции ионосферы мощными КВ радиоволнами стенда «Сура».....	89
3.3.3. Основные выводы по экспериментальным данным .....	95
3.4. Заключение по третьей главе .....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	99
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	102
Список работ, опубликованных автором по теме диссертации .....	102
Список используемых источников.....	107

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования и степень её разработанности**

Изучение модификации верхней ионосферы является важной задачей современной физики, актуальность которой постоянно растет в связи с увеличением техногенной электромагнитной нагрузки на околоземную плазму. Несмотря на активные исследования, истинная роль подобных возмущений в физике околоземной плазмы до сих пор остается не до конца изученной. Поэтому неясны и возможные последствия таких нагрузок с точки зрения охраны окружающей среды. Кроме того, ионосфера является средой, через которую осуществляется связь и вещание в коротковолновом (КВ) и ультракоротковолновом (УКВ) диапазонах. Как результат, нестационарность ионосферы, вызванная её модификацией, является фактором, который может приводить к ухудшению качества передаваемой информации и надежности каналов связи. Таким образом, диагностика ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения остается очень важной в вопросах развития систем наземной и спутниковой связи, а также космической безопасности.

Исследование взаимодействия мощного коротковолнового радиоизлучения с ионосферой Земли является одной из важнейших задач современной физики, позволяющей исследовать особенности возбуждения турбулентности магнитоактивной плазмы мощным высокочастотным электромагнитным полем. Целью данных исследований является развернутое изучение поведения волн и частиц в околоземной плазме, а также моделирование естественных процессов в ионосфере и магнитосфере при различных внешних условиях.

Открытие Люксембург-Горьковского эффекта в 1933 году было первым зафиксированным изменением свойств ионосферы в поле мощных радиоволн. Проявления нелинейных эффектов при распространении мощных радиоволн в ионосфере Земли были детально рассмотрены в обзоре [1]; в дальнейшем

результаты выполненных в этом направлении исследований были суммированы в монографиях [2, 3]. Исследование данного явления привело к развитию теорий взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой [4, 5], которые впоследствии были подтверждены в наблюдениях и послужили источником важных сведений о свойствах ионосферы [6-9]. Проведённые исследования стимулировали строительство специализированных мощных радиопередающих устройств (нагревных стендов) для модификации ионосферы (первый стенд начал работу в 1961 году в НИИ радио (Москва) [10, 11]; эффективная мощность волны накачки в импульсном режиме достигала 1000 МВт). В рамках исследований, посвященных данной тематике было обнаружено, что воздействие мощным КВ радиоизлучением на ионосферу Земли приводит к развитию целого комплекса явлений, результатом которых является генерация искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). Результаты выполненных исследований свойств ИИТ суммированы в монографии [12], в статьях в специальных выпусках журналов [13-20] и в обзорах [21-27]. По разным причинам в последние годы нагревные эксперименты активно проводятся только на трех стендах: «Сура» (средние широты), HAARP и «Тромсё» (высокие широты). В данной диссертации будут представлены эксперименты по модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами, выполненные с использованием стенда «Сура» в период с 2005 по 2019 годы (подробное описание стенда будет представлено в главе 1).

Исследовательские коротковолновые стенды своим излучением турбулизуют облучаемую область ионосферы [22, 28-29]. Индуцируемые возмущения переносятся вдоль силовых линий геомагнитного поля и при определённых условиях возможно формирование искусственных волноводных каналов (дактов плотности) [30-31], вытянутых из ионосферы в магнитосферу и оказывающих существенное влияние на распространение низкочастотных электромагнитных излучений [32]. Известно также, что наземные стенды способны создавать подобные возмущения в значительном пространственном объеме [33]. В настоящее время достаточно широко обсуждаются эффекты

влияния излучений мощных связанных очень низкочастотных (ОНЧ) радиопередатчиков на высыпания заряженных частиц из радиационных поясов [34-35] и на генерацию широкого спектра квазиэлектростатических колебаний и волн в верхней ионосфере [36]. Однако остается неясной природа явлений, в результате которых возможно формирование крупномасштабных (глобальных) плазменно-волновых возмущений, оказывающих значительное влияние на локальные ионосферно-магнитосферные связи и характеристики передаваемых сигналов.

Важность решения задач, связанных с эффектами турбулизации плазмы в поле мощной электромагнитной волны, особенно актуально для таких дисциплин современной физики, как физика околоземного космического пространства, астрофизика, распространение радиоволн в плазмоподобных средах и физика низкотемпературной плазмы. Важно отметить, что мощности современных радиостанций достаточны, чтобы вызывать заметные изменения характеристик ионосферной плазмы. Можно сказать, что ионосфера постоянно находится в возбужденном состоянии, что необходимо учитывать при анализе происходящих в ней процессов.

В последние годы было проведено много успешных кампаний по исследованию явлений, наблюдающихся в верхней ионосфере. Эти исследования позволили более детально изучить особенности плазменных возмущений, индуцированных мощной радиоволной, и свойства ИИТ.

Существуют различные методы диагностики верхней ионосферы. Среди них следует отметить: метод вертикального зондирования сигналами ионосферных станций, метод пробных волн, ракурсное рассеяние радиоволн КВ и УКВ диапазонов, зондирование возмущённой области (ВО) ионосферы сигналами искусственных спутников Земли (ИСЗ), в том числе сигналами ИСЗ навигационных систем GPS/GLONASS, метод низкоорбитальной радиотомографии и другие.

Еще одним методом диагностики верхней ионосферы является использование бортовой аппаратуры ИСЗ для измерения характеристик верхней ионосферы Земли с их последующим анализом. Подобный метод является одним из наиболее актуальных, и ему посвящены многие работы [37-44]. В данной диссертации будут использованы результаты экспериментов по нагреву  $F_2$ -слоя ионосферы, полученные в рамках работы с группировкой спутников SWARM и со спутником DEMETER. Стоит отметить, что использование бортовой аппаратуры ИСЗ одинаково актуально как в случае измерения характеристик естественной ионосферы (невозмущённой воздействием со стороны наземных станций), так и в случае возмущённой ионосферы; это позволяет во многих случаях сравнивать естественные и искусственные причины тех или иных наблюдаемых явлений.

Данная диссертационная работа посвящена следующим темам:

- изучение условий искусственного формирования на высотах 450 – 500 км крупномасштабных неоднородностей (более 50 км), характеризующихся заметными изменениями плотности плазмы (на 2 и более процентов) и температуры плазмы (на 3 и более процентов).

- исследование искусственной стимуляции высыпаний высокоэнергичных электронов из радиационных поясов Земли в области, возмущённой станцией «Сура», и в магнитосопреженной к ней ионосфере.

### **Цели и задачи**

**Целью диссертационной работы** является экспериментальное исследование спутниковыми методами структуры и динамики верхней области ионосферы, модифицированной мощным КВ радиоизлучением наземного станда «Сура». В рамках достижения поставленной цели в настоящей работе решаются **следующие задачи**: исследование возбуждения искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН) в  $F_2$ -области ионосферы; исследование искусственной и естественной стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационных

поясов Земли; сравнение характеристик (энергии и потоков электронов) искусственных высыпаний в северном и южном полушариях.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы определяется полученными оригинальными результатами и заключается в следующем:

1) Впервые проведен детальный анализ исследований характеристик возмущений плотности и температуры плазмы, индуцируемых на высотах 450 – 500 км при работе стенда «Сура» и детектируемых бортовой аппаратурой спутников SWARM. Зафиксированы случаи возбуждения искусственных ионосферных неоднородностей (ИИН), которые наблюдаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты спутника и определяются заметными изменениями и вариациями плотности и температуры электронов.

2) Впервые детально проанализированы причины корреляции между температурой электронов и потенциалом ИСЗ. Продемонстрировано, что данная корреляция наиболее заметна в случаях возбуждения ИИН (средний коэффициент корреляции  $\langle r \rangle = 0.63$ ), что превосходит случаи, когда не удалось добиться возбуждения ИИН заметной интенсивности, несмотря на работающий стенд «Сура» ( $\langle r \rangle = 0.37$ ), и случаи, когда стенд не работал ( $\langle r \rangle = 0.16$ ).

3) Представлены результаты экспериментов, в которых впервые была зафиксирована генерация продольных электрических токов на высотах 450 – 500 км. Проведённые расчеты показали, что максимальная плотность индуцированных в возмущённой ионосфере продольных токов составляет 0.01-0.02  $\mu\text{A}/\text{m}^2$ .

4) Впервые проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов (с энергиями  $E \approx 100$  кэВ) из радиационного пояса Земли при модификации среднеширотной  $F_2$ -области ионосферы мощными короткими радиоволнами с  $O$ -поляризацией в режиме их непрерывного излучения.

## **Теоретическая и практическая значимость**

В научном плане результаты, полученные в диссертации, дают основу для более глубокого понимания особенностей взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой, условий и механизмов формирования на высотах внешней ионосферы плазменных возмущений.

Решение поставленных в работе задач востребовано в физике околоземного космического пространства, распространении радиоволн в плазмоподобных средах, астрофизике, физике Солнца и др. Также полученные результаты могут быть использованы для постановки новых активных ионосферных экспериментов и для их более эффективного анализа.

Полученные в работе результаты могут представлять интерес для следующих научно-исследовательских учреждений: ИКИ РАН, ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН, ПГИ КНЦ РАН, ИПФ РАН, ИРЭ РАН, КФУ и др.

## **Методология и методы исследования**

Теоретические и экспериментальные исследования базируются на использовании методов физики околоземного космического пространства.

## **Личный вклад автора**

Личный вклад автора в представленных исследованиях заключается в том, что автор проводил обсуждаемые в диссертации эксперименты, обрабатывал, обсуждал и интерпретировал экспериментальные данные, готовил публикации.

## **Защищаемые положения:**

1. При модификации верхней ионосферы мощными КВ радиоволнами плазменные возмущения на высотах 450 – 500 км характеризуются изменениями и вариациями (до 7 %) концентрации электронов, а также изменениями и

вариациями (до 8 %) температуры электронов, что заметно превосходит уровень шумов (около 0.5 %). Условия генерации искусственных возмущений плотности и температуры электронов: частота волны накачки должна быть ниже критической частоты  $F_2$ -слоя, высота отражения волны накачки должна быть больше 200 км, орбита искусственного спутника должна проходить на расстоянии меньше 50 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки и эффективная мощность волны накачки должна быть не меньше 50 МВт. Расстояние, на котором наблюдаются искусственные ионосферные неоднородности, составляет до 200 км вдоль орбиты искусственного спутника Земли.

2. При модификации верхней ионосферы КВ радиоволнами удается добиться обнаружения генерации продольных электрических токов с величиной плотности тока до  $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$  на высотах 450 – 500 км. Внутри возмущённой силовой трубки регистрируется возбуждение направленных вниз продольных токов, отвечающих выносу электронов из области разогрева вдоль геомагнитного поля во внешнюю ионосферу. В то же время на границах возмущённой области наблюдаются токи противоположного направления, отвечающие обратному движению электронов вдоль силовых линий геомагнитного поля.

3. Во время экспериментов по модификации  $F_2$ -слоя ионосферы мощными короткими радиоволнами возможна результативная стимуляция высыпаний высокоэнергичных электронов при выполнении ряда условий: частота волны накачки должна быть ниже критической частоты  $F_2$ -области, эффективная мощность волны накачки должна быть не меньше 50 МВт, должен отсутствовать спорадический слой, должна быть высокая наполненность радиационного пояса энергичными электронами.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается научной обоснованностью проводимых экспериментов, большим объемом полученных данных, на основе которых делаются соответствующие выводы, повторяемостью результатов измерений, непротиворечивостью результатов, полученных при использовании различных методов измерений, и их теоретическим обоснованием.

## **Апробация результатов и публикации**

По теме диссертации опубликовано 37 работ, в которых представлены все выносимые на защиту результаты. Среди них 9 статей в рецензируемых изданиях: “Физика плазмы” [A1], “ЖЭТФ” [A2], “Известия вузов. Радиофизика” [A9, A15, A25, A32], “Geophysical Research Letters” [A20], “Космические исследования” [A23], “Radio Science” [A24]. 28 работ представляют собой опубликованные материалы докладов на конференциях [A3-A8, A10-A14, A16-A19, A21-A22, A26-A31, A33-A37]. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных мероприятиях, в том числе на конференции «Распространение радиоволн – 26» (1-6 июля 2019 г., Казань, Россия), конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» (12-16 февраля 2018 г., ИКИ РАН, Москва, Россия), конференции «Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике» (16-21 сентября 2019 г., Иркутск, Россия) и других.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№№ 12-02-00747-а, 17-05-00475-а, 19-52-15007, 20-05-00166-а), Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ (№№ 3.1844.2017/ПЧ, 0729-2020-0057).

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, включая 22 рисунка, 3 таблицы, список публикаций по теме диссертации из 37 наименований и список литературы из 122 наименований.

## ГЛАВА 1. ОПИСАНИЕ УСЛОВИЙ И МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первые исследования свойств плазменной турбулентности, индуцируемой во внешней ионосфере Земли при модификации  $F_2$ -области излучаемыми стендом «Сура» мощными радиоволнами  $O$ -поляризации, проводились в 1992–1993 гг. с использованием бортовой аппаратуры нескольких ИСЗ. Их результаты опубликованы в работах [45-49]. Эти исследования позволили установить:

1) при воздействии мощными радиоволнами на  $F_2$ -слой ионосферы наблюдалась генерация электромагнитных волн в ОНЧ и КНЧ диапазонах, которые распространялись в возмущённой магнитной силовой трубке диаметром 100–200 км, опирающейся на область с интенсивной ИИТ, возбуждаемой вблизи высоты отражения ВН;

2) регистрировалось заметное увеличение напряженности электрического поля плазменных шумов во внешней ионосфере в диапазоне 0.1–10 МГц;

3) имело место формирование или увеличение эффективности ОНЧ каналов, ответственных за распространение свистящих атмосфериков вдоль возмущённых силовых линий геомагнитного поля между их магнитосопряженными точками.

Следует, однако, отметить, что эти эксперименты носили единичный характер и, кроме того, эти ИСЗ не были оснащены всем необходимым оборудованием для полного изучения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцированных на высотах внешней ионосферы при работе стенда «Сура».

## 1.1. Нагревный стенд «Сура»

Стенд «Сура» является на сегодня единственной в мире действующей установкой, расположенной в средних широтах, где сильные естественные геомагнитные возмущения являются достаточно редкими событиями. Этим он отличается от стендов «Тромсё» (Сев. Норвегия) и HAARP (Аляска, США), расположенных в авроральных широтах, в которых сильные естественные возмущения в ионосфере и магнитосфере Земли могут значительно затруднять проведение экспериментов и усложнять интерпретацию наблюдаемых явлений. В таблице 1.1 приведены характеристики работающих сегодня нагревных стендов «Сура», «Тромсё» и HAARP.

Таблица 1.1

	«Сура»	«Тромсё»	HAARP
<b>Географические координаты</b>	56.15° с. ш., 46.1° в. д.	69.6° с. ш., 19.2° в. д.	62.4° с. ш., 145.1° з. д.
<b>Диапазон частот, МГц</b>	4.3-9.5	3.9-5.5; 5.5-8.0	2.8-8.0
<b>Генерируемая мощность, МВт</b>	0.75	1.0	3.6
<b>Усиление антенны, дБ</b>	19-24	22-25; 28-31	21-31
<b>Эффективная мощность излучения, МВт</b>	80-280	180-340; 630-1260	400-3600
<b>Поляризация</b>	О или Х	О или Х	О, Х или линейная
<b>Наклонение геомагнитного поля</b>	19°	12°	15°

Нагревный стенд «Сура» расположен в 120 км к востоку от г. Н. Новгород; его координаты: 56.15° с. ш., 46.1° в. д. [12]. Эксперименты на стенде «Сура»

были начаты в 1982 г. Стенд имеет трехмодульную структуру. Каждый модуль состоит из радиопередатчика ПКВ-250 типа «Вьюга», генерирующего ВЧ сигнал мощностью до 250 кВт, который нагружен на свою антенную решетку, состоящую из  $12 \times 4$  широкополосных скрещенных диполей и вытянутую в восточно-западном направлении. Стенд может излучать волны  $O$ - или  $X$ -поляризации в диапазоне частот от 4.3 до 9.5 МГц. Модули стенда могут работать независимо или объединяться в режиме когерентного излучения любыми двумя или всеми тремя модулями вместе. В последнем случае решетка состоит из 144 диполей, занимающих площадь  $300 \text{ м} \times 300 \text{ м}$ . Максимальная эффективная мощность излучения стенда при этом составляет  $P_{\text{эфф}} \approx 80 \text{ МВт}$  на частотах  $f_{\text{ВН}} \approx 4300 \text{ кГц}$  и  $\sim 280 \text{ МВт}$  на частотах  $f_{\text{ВН}} \approx 9300 \text{ кГц}$ , увеличиваясь с ростом  $f_{\text{ВН}}$ . Диаграмма направленности антенны стенда в плоскости магнитного меридиана может отклоняться от вертикали в пределах  $\pm 40^\circ$ . Для увеличения эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой за счет эффекта «магнитного зенита» [22] часто используется модификация ионосферы не вертикальным пучком мощных радиоволн, а наклоненным на  $12^\circ$  от вертикали на юг. В этом случае для стенда «Сура» наблюдается наиболее сильная турбулизация плазмы и усиление генерации ИИН всех масштабов. При таком наклоне координаты центра пятна засвеченной мощными радиоволнами ионосферы составляют на высоте 250 км  $\varphi = 55.7^\circ$  с. ш. и  $\lambda = 46^\circ$  в. д.; само пятно при  $f_{\text{ВН}} \approx 4300 \text{ кГц}$  имеет здесь диаметр  $\sim 60 \text{ км}$  по уровню  $0.5 P_{\text{max}}$  [12].

В выполняемых на стенде «Сура» экспериментах по программам «Сура» -SWARM и «Сура»-DEMETER излучение волны накачки начиналось, как правило, за 15 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.

Структурная схема и общий вид нагревного стенда «Сура» приведены на Рисунках 1.1 и 1.2 соответственно.

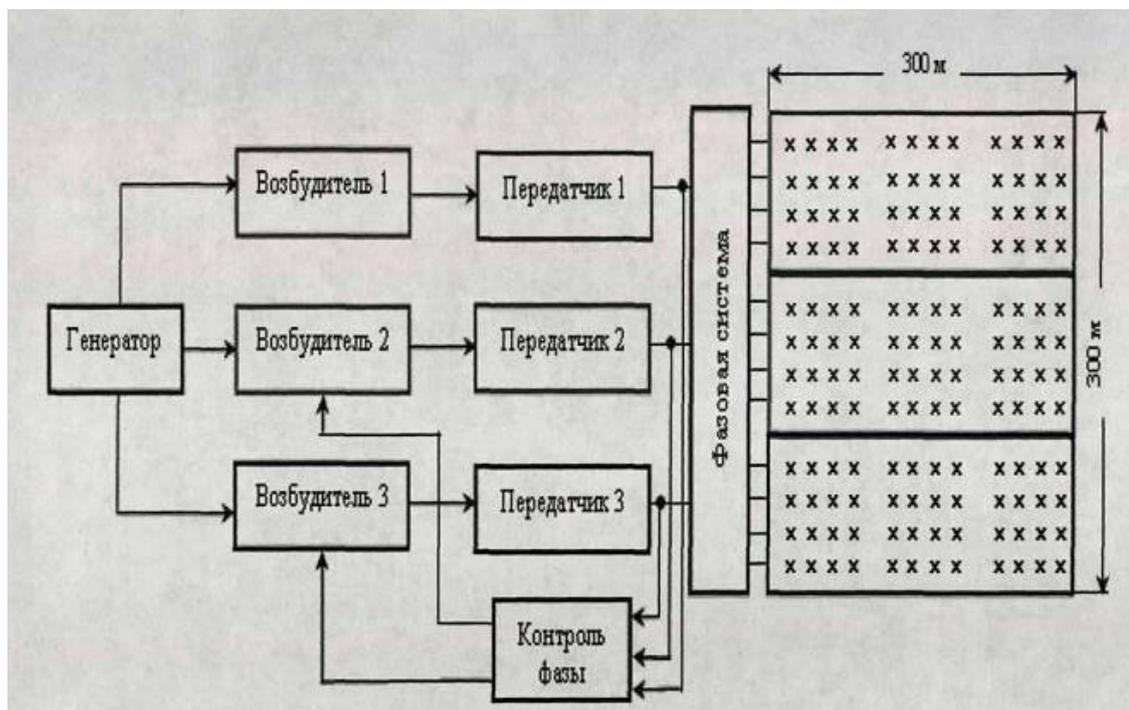


Рисунок 1.1 – Структурная схема нагревного стенда «Сура»



Рисунок 1.2 – Общий вид стенда «Сура»

К настоящему моменту проведено множество исследований явлений, возникающих при распространении в ионосфере мощных радиоволн. Эти работы позволили определить главные свойства возбуждаемой искусственной ионосферной турбулентности и разработать теоретические модели для генерации отдельных её компонент [50-52].

Проведённые эксперименты показали, что основная доля энергии волны накачки (ВН) вблизи уровня её отражения поглощается не за счет омических потерь (в результате столкновительного затухания), а за счет развития целого

комплекса нелинейных процессов. Наиболее быстрым из них, развивающимся за 1-5 мс после включения ВН, является стрикционная параметрическая неустойчивость (СПН) [53-54]. СПН носит характер индуцированного рассеяния электромагнитной волны в ленгмюровские (плазменные) волны и образованию непосредственно вблизи уровня отражения мощного радиоизлучения узкого слоя с высоким уровнем высокочастотной плазменной турбулентности. В этом слое за счет диссипации энергии плазменных волн происходит сильный разогрев электронов фоновой плазмы, модификация профиля плазмы и ускорение наиболее энергичных электронов до сверхтепловых энергий.

На втором этапе взаимодействия, спустя 0.5–1 с после включения ВН, наблюдается развитие тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [53, 55-56]. В её основе лежит генерация и локальная столкновительная диссипация собственных колебаний замагниченной плазмы в области верхнегибридного резонанса (ВГР). При этом возбуждение плазменных волн происходит за счет рассеяния падающей электромагнитной волны  $O$ -поляризации на мелкомасштабных неоднородностях плотности плазмы с  $l_{\perp} < \lambda_0 \approx 50$  м, ( $l_{\perp}$  - масштаб неоднородностей поперек геомагнитного поля,  $\lambda_0$  - длина волны накачки в вакууме).

На следующем этапе взаимодействия волны накачки с плазмой спустя 30 - 60 с после её включения, развиваются искусственные неоднородности километровых масштабов, возбуждение которых связывается с развитием тепловой самофокусировочной неустойчивости (СФН) электромагнитных волн в магнитоактивной плазме [23, 57, 58]. Суть СФН заключается в том, что при распространении мощной электромагнитной волны в плазме в той области пространства, где её амплитуда по какой-либо причине возросла, имеет место более интенсивный нагрев электронов. В  $F_2$ -слое ионосферы в результате выталкивания плазмы из прогретой области её концентрация локально уменьшается, что приводит к дополнительной фокусировке здесь лучей, т.е. к возрастанию интенсивности электрического поля. Это вызывает дальнейшее

усиление нагрева плазмы и т.д. Как итог – возникает разбиение пучка радиоволн на тонкие нити с характерным размером  $l_{\perp} \geq \lambda_0$ . Высокая теплопроводность и диффузия плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля определяет нелокальный характер развития неустойчивости и анизотропию неоднородностей.

В области отражения мощной радиоволны эффект самофокусировки резко усиливается. Это связано с уменьшением здесь диэлектрической проницаемости плазмы и увеличением электрического поля волны. Кроме того, в случае волны *O*-поляризации при превышении её мощности порога стрикционной или тепловой параметрических неустойчивостей здесь формируется дополнительный источник возмущения плазмы за счет эффективного её разогрева через плазменные волны, оказывающий существенное влияние на динамику процесса.

## 1.2. Искусственные спутники Земли группировки SWARM

Группировка европейских спутников серии SWARM (общий вид представлен на Рисунке 1.3), 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 200 км, наклонение орбиты  $87,4^{\circ}$ . Третий спутник (В) летает в другой меридиональной плоскости на высоте  $\sim 500$  км, наклонение орбиты  $88^{\circ}$ . Постепенно смещаясь по долготе, орбиты этих спутников за 7-10 месяцев полёта покрывают все долготные секторы Земного шара. Скорость спутников  $V_0 = 7.6$  км/с.

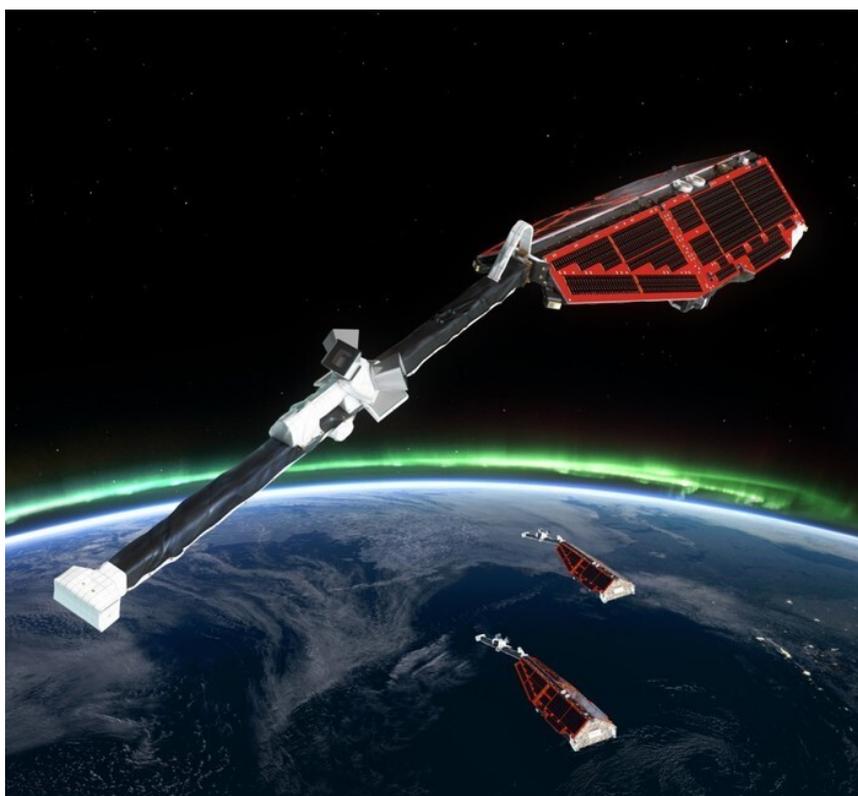


Рисунок 1.3 – Общий вид ИСЗ SWARM

Все три спутника SWARM оснащены идентичной аппаратурой. Одним из основных инструментов является модуль EFI для измерения электрического поля. Данный инструмент 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. Погрешность измерений зависит от времени пролета, геомагнитной активности и в экспериментах, представленных в этой диссертации, составляет  $\sim 0.5\%$ . Также спутники оборудованы комплексами для магнитных измерений: высокочувствительные векторный и скалярный магнетометры для измерения величины и направления полного магнитного поля и его вариаций с точностью до 0,1–0,5 нТл. Эти магнитометры 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). Более подробное описание аппаратуры спутников SWARM можно найти в работах [59-60]. Стоит отметить, что в отличие от ИСЗ

DEMETER (см. раздел 1.3), спутники SWARM не обладали прибором, позволяющим измерять энергию и потоки высокоэнергичных частиц в ионосфере.

Главными объектами исследований работы группировки SWARM являются:

1. Динамика ядра Земли, геодинамические процессы и взаимодействие ядра и мантии.

2. Литосферная намагниченность и её геологическая интерпретация.

3. Токи, протекающие в магнитосфере и ионосфере.

4. Идентификация циркуляции океана по его магнитной сигнатуре.

Спутники SWARM использовались в рамках экспериментов, выполняемых по программе «Сура»-SWARM (с 2016 года; см. глава 2). Данные бортовой аппаратуры спутников брались с сайта <https://vires.services>.

### **1.3. Искусственный спутник Земли DEMETER**

Спутник DEMETER (общий вид представлен на Рисунке 1.4) был запущен в июне 2004 г. на круговую солнце-синхронную полярную орбиту с наклоном  $98.3^\circ$  и высотой  $\sim 710$  км; в декабре 2005 г. высота его орбиты была понижена до  $\sim 660$  км. Скорость спутника составляла 7.6 км/с.



Рисунок 1.4 – Общий вид ИСЗ DEMETER

Над стендом «Сура» спутник пролетал в период 18:00–18:30 UT в условиях ночной ионосферы и около 07:30–08:00 UT в дневных условиях. Он обладал широким набором бортовой аппаратуры, которая обеспечивала измерения в непрерывном режиме основных плазменных параметров, электромагнитных полей и потоков энергичных электронов. В её состав входили и использовались в измерениях:

- зонд Ленгмюра (ISL) [39], предназначенный для измерения температуры и плотности электронов и плотности ионов (без разделения ионов на составляющие), а также потенциала спутника;
- анализатор плазмы (IAP) [37], предназначенный для измерения характеристик популяции тепловых ионов, включая измерения концентрации и температуры ионов  $H^+$ ,  $He^+$  и  $O^+$ , вектора скорости суммарного потока ионов;
- измеритель электрического поля (ICE) [38], позволяющий проводить измерения его напряженности в диапазоне частот 0–3.175 МГц;

- измеритель магнитного поля (IMSC) [40], позволяющий проводить измерения его напряженности в диапазоне частот 10 Гц – 20 кГц;
- детектор высокоэнергичных электронов (IDP) [41], предназначенный для измерения интенсивности потока электронов с энергиями от 70 кэВ до 2.5 МэВ.

Аппаратура спутника могла работать в режимах низкоскоростного (*survey mode*) и высокоскоростного (*burst mode*) съема данных. Заметим, что в режиме *burst mode* осуществлялось наиболее полное включение бортовой аппаратуры спутника с наибольшей скоростью оцифровки измеряемых параметров, а также проводилась регистрация всех 6 компонент электромагнитного поля в диапазоне до 1.2 кГц.

DEMETER предназначался для изучения ионосферных возмущений, вызванных антропогенной деятельностью, а также сейсмической и вулканической активностью. Спутник закончил свою исследовательскую миссию в конце 2010 года, во время которой было проведено множество оригинальных исследований [61-70, A1-A7].

Спутник DEMETER использовался в рамках экспериментов, выполняемых по программе «Сура»-DEMETER (2005-2010 годы; см. главы 2 и 3). Данные бортовой аппаратуры спутника брались с сайта <http://demeter.cnrs-orleans.fr>.

## ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ НА ВЫСОТАХ 450 – 500 КМ ПРИ РАБОТЕ СТЕНДА «СУРА»

Свойства плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы активно изучались в рамках выполненных экспериментов на стенде «Сура» с 2005 года с использованием специализированной аппаратуры спутников DEMETER и DMSP (высоты орбит ~ 660 км и ~ 840 км соответственно). Итогом исследований стало обнаружение формирования на этих высотах дактов с избыточной плотностью плазмы в магнитной силовой трубке, опирающейся на область с высокоразвитой искусственной ионосферной турбулентностью (ИИТ), генерируемой вблизи высоты отражения волны накачки (ВН) [30-31, 71-74]. Благодаря экспериментам удалось определить критерии возникновения дактов при модификации  $F_2$ -области ионосферы, определить их характеристики и показать, что генерация дактов в утренние, вечерние и ночные часы – обычное явление. Последний вывод может быть использован в экспериментах для решения задач, связанных с модификацией ионосферно-магнитосферных связей и взаимодействий.

Целью настоящей главы является анализ результатов выполненных в 2016 – 2017 гг. исследований характеристик возмущений плотности и температуры плазмы, индуцируемых на высотах 450 – 500 км при работе стенда «Сура» и детектируемых бортовой аппаратурой спутников SWARM. Следует подчеркнуть, что к настоящему времени имеется лишь ограниченный объем данных о свойствах плазменной турбулентности, регистрируемой на этих высотах (см. например, [75]), где имеет место переход от области с интенсивной генерацией ИИТ вблизи высоты отражения ВН к области переноса плазменных возмущений вдоль силовых линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу и формирования там дактов с повышенной плотностью плазмы. Как известно, формирование дактов определяется выносом плазмы из области её сильного разогрева [31, 73-74]. Поэтому знание характеристик плазменной турбулентности

в области высот  $\sim 500$  км необходимо для определения особенностей механизмов транспорта плазменных возмущений в возмущённой магнитной силовой трубке и для верификации модели формирования дактов с избыточной плотностью плазмы.

Основные результаты первой главы опубликованы в [A8-A24].

## **2.1. Организация экспериментов**

В представленных экспериментах модификация ионосферы осуществлялась с помощью нагревного стенда «Сура» (подробнее см. раздел 1.1). Характеристики плазменных возмущений фиксировались аппаратурой спутников SWARM (подробнее см. раздел 1.2). Схема проведения экспериментов представлена на Рисунке 2.1.

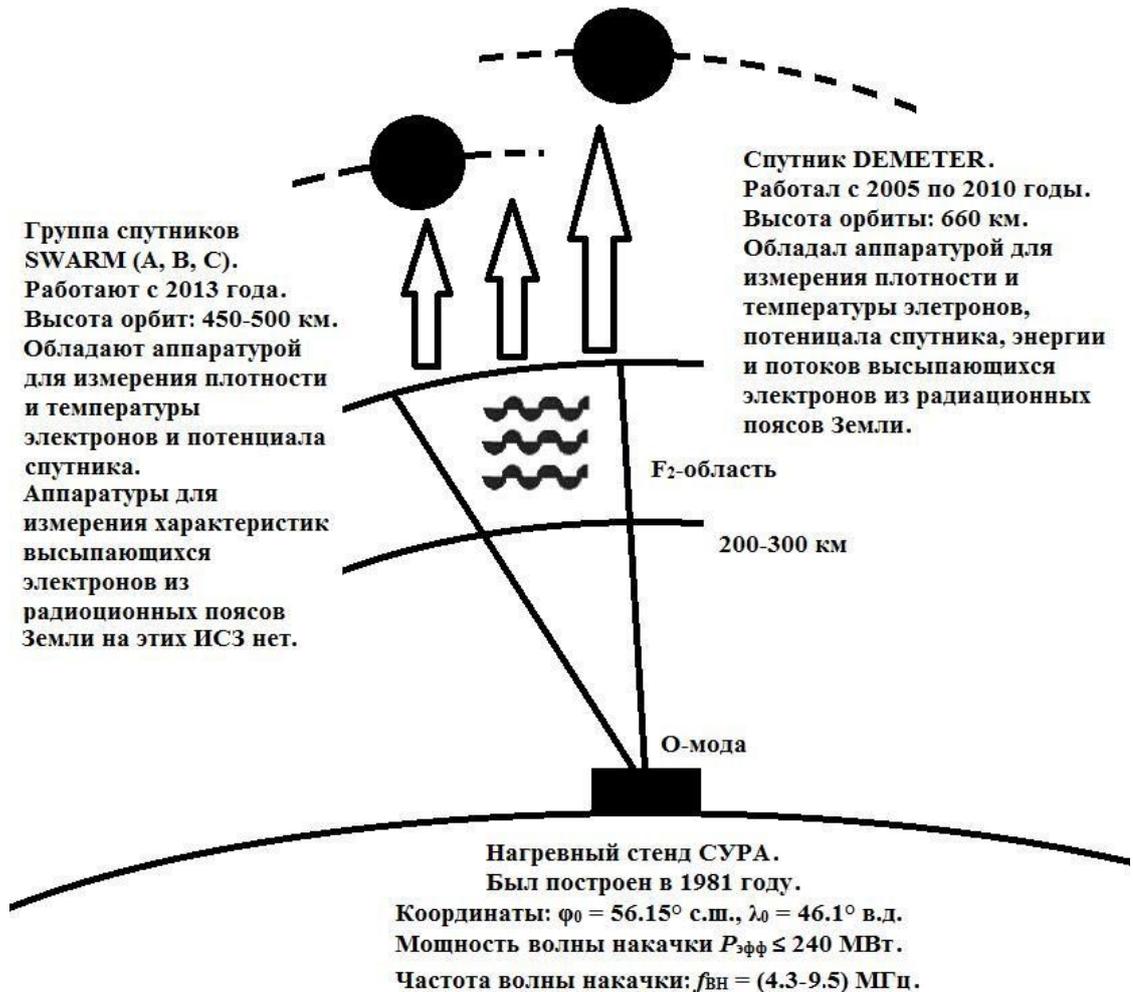


Рисунок 2.1 - Схема проведения экспериментов в рамках программ «Сура»-SWARM (слева) и «Сура»-DEMETER (справа)

В выполняемых на стенде «Сура» экспериментах излучение ВН начиналось, как правило, за ~ 15 мин до времени пролёта ИСЗ через возмущённую магнитную силовую трубку. Как показали выполненные ранее эксперименты, этого времени 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 [59, А8]

## 2.2. Стимуляции вариаций характеристик плазменных возмущений на высотах 450 – 500 км

В 2016 – 2017 гг. было выполнено более 50 сеансов нагрева ионосферы по программе «Сура»–SWARM при различных условиях их проведения [А9-А14].

Благодаря полученным данным удалось сформулировать необходимые требования для возбуждения возмущений плотности и температуры электронов на высотах  $h \approx 450 - 500$  км и определить основные их 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 5.5 МГц, была ниже критической частоты  $f_{0F2}$ , высота отражения ВН была больше 200 км, а орбита ИСЗ проходила на расстоянии меньше 50 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки. Здесь важно отметить, что в рассматриваемых опытах, под ночными сеансами подразумеваются сеансы, проведённые после захода Солнца на высотах верхней ионосферы; таким образом, в разные сезоны одно и то же время может соответствовать или вечернему, или ночному сеансу. В большинстве случаев генерация искусственных плазменных возмущений наблюдалась, когда эффективная мощность излучения ВН была не меньше 50 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 ( $F_{\text{spread}}$ ), когда уширение ветвей ионограммы по частоте составляло 0.3 – 0.5 МГц или превышало 0.5 МГц соответственно, а также наблюдалось подавление на ионограммах ветки  $O$ -моды из-за развития эффекта аномального ослабления зондирующих ионосферу радиоволн [12, 23]. Важно, что все эти условия для генерации плазменных возмущений на высотах  $\sim 500$  км повторяют условия для формирования дактов плотности плазмы на высотах внешней ионосферы (на высотах  $\sim 660$  км) [72].

Для демонстрации свойств наблюдаемых возмущений плотности и температуры плазмы и большой изменчивости их характеристик ниже приводятся результаты спутниковых измерений для четырёх сеансов нагрева ионосферы мощными КВ радиоволнами, значительно отличающихся друг от друга по своим

характеристикам. Здесь также представлены результаты измерений потенциала ИСЗ.

Сеанс 25 апреля 2016 г.

ИСЗ SWARM (B) пролетал в условиях ночной ионосферы ( $T^* = 19:16:55$  UT) на высоте 514 км в направлении с севера на юг практически через центр возмущённой магнитной силовой трубки ( $T^*$  – время максимального сближения ИСЗ с осью трубки). Модификация ионосферы началась за 16 мин до пролёта спутника через трубку. ВН излучалась на частоте  $f_{\text{ВН}} = 4300$  кГц при  $f_{0F2} = 4.6$  МГц и высоте её отражения  $h \approx 240$  км. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ( $\sum K_p = 10$ ). Эффективная мощность излучения была относительно низкой ( $P_{\text{эфф}} = 20$  МВт), но благодаря хорошему выполнению других условий, этот фактор не помешал развитию очень сильной диффузности на ионограммах.

На Рисунке 2.2 представлены результаты измерений концентрации электронов  $N_e$  (панель А), температуры электронов  $T_e$  (панель Б) и электрического потенциала корпуса спутника  $U_{\text{sc}}$  (панель В). По оси абсцисс отложено время пролёта спутника в UT ( $T_{\text{мск}} = T_{\text{UT}} + 3$  часа). Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 19:16:55$  UT. По результатам измерений концентрации  $N_e$  видно появление искусственных вариаций плотности плазмы на интервале времени с 19:16:59 до 19:17:08 UT величиной 1 – 3 % с максимальными их значениями в 19:17:02 UT. Эти измерения позволяют оценить размер области с искусственными вариациями плотности плазмы вдоль орбиты спутника как  $\sim 70$  км, что соответствует размеру области ионосферы, засвеченной пучком мощных радиоволн, причём центр области с максимальными возмущениями смещён на юг на  $\sim 50$  км от точки орбиты, соответствующей времени  $T^*$ , отражая влияние эффекта «магнитного зенита». Эффект «магнитного зенита» заключается в том, что при модификации  $F_2$ -области ионосферы наиболее сильные возмущения ионосферной плазмы наблюдаются, когда мощная радиоволна  $O$ -поляризации в области

взаимодействия ее с плазмой распространяется вдоль линий геомагнитного поля [12].

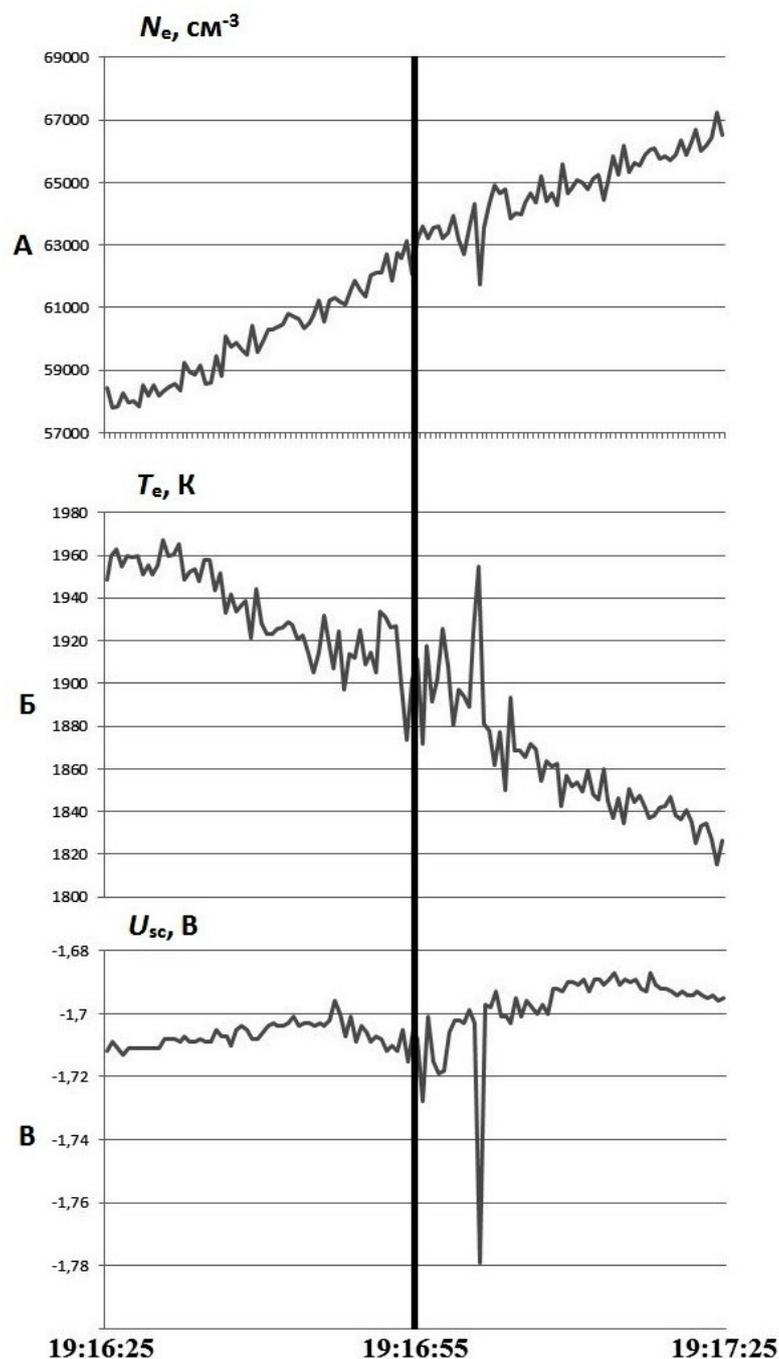


Рисунок 2.2 - Результаты измерений концентрации электронов  $N_e$  (панель А), температуры электронов  $T_e$  (панель Б), потенциала корпуса ИСЗ (панель В). По оси абсцисс отложено время пролёта спутника в UT ( $T_{\text{МСК}} = T_{\text{UT}} + 3$  часа). Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 19:16:55$  UT. 27 апреля 2016 г.

На большем интервале времени – с 19:16:46 до 19:17:10 UT (протяженность  $\sim 180$  км вдоль орбиты ИСЗ) – регистрируются искусственные вариации температуры электронов величиной 1– 2 % с максимальными их значениями

~ 3 % в 19:17:02 UT. На Рисунке 2.2 хорошо видно, что выделяющийся максимум значения  $T_e$  в 19:17:02 UT точно совпадает с минимумом значения  $N_e$  и с максимумом величины отрицательного потенциала корпуса спутника, как показано в [A9], дополнительно свидетельствует о наличии ИИН в возмущённой области. Важным результатом явилось и то, что отклик температуры электронов (в виде заметных вариаций) на данную стимуляцию оказывается более ранним, чем отклик плотности плазмы.

### Сеанс 27 августа 2016 г.

ИСЗ SWARM (C) в условиях вечерней, еще освещенной, 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 ИСЗ. ВН излучалась на частоте  $f_{ВН} = 4300$  кГц с эффективной мощностью излучения  $P_{эфф} = 55$  МВт. Во время сеанса величина  $f_{0F2}$  уменьшилась от 5.1 до 4.9 МГц, высота отражения ВН 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 ( $\sum K_p = 9$ ). Во время нагрева ионосферы наблюдалось развитие очень сильного  $F_{spread}$ .

На Рисунке 2.3 представлены результаты измерений  $N_e$  (панель А),  $T_e$  (панель Б) и  $U_{sc}$  (панель В). По оси абсцисс отложено время пролёта спутника в UT. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 17:22:06$  UT. По результатам измерений концентрации  $N_e$  видно появление искусственных вариаций плотности плазмы величиной 2 – 4 % на интервале времени 17:21:59 до 17:22:12 UT или на расстоянии ~ 120 км вдоль орбиты ИСЗ, причём центр этой 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 плотности плазмы; наоборот, здесь, скорее, можно отметить его уменьшение на величину ~ 2 %, что может свидетельствовать о том, что орбита спутника ещё

проходила через верхнюю часть области с пониженной плотностью плазмы. В то же время, на интервале времени 17:21:57 до 17:22:12 UT наблюдается явное увеличение среднего значения величины  $T_e$  на  $\sim 14\%$  и появление сильных искусственных её вариаций величиной  $\sim 8\%$  с максимальным их значением до  $36\%$  в  $T = 17:22:01$  UT. Более высокие значения уровней вариаций  $N_e$  и  $T_e$  в этом сеансе по сравнению с предыдущим сеансом, при всех прочих равных условиях, естественно связывать с более высокой мощностью излучения ВН и более высоким уровнем развития ИИТ.

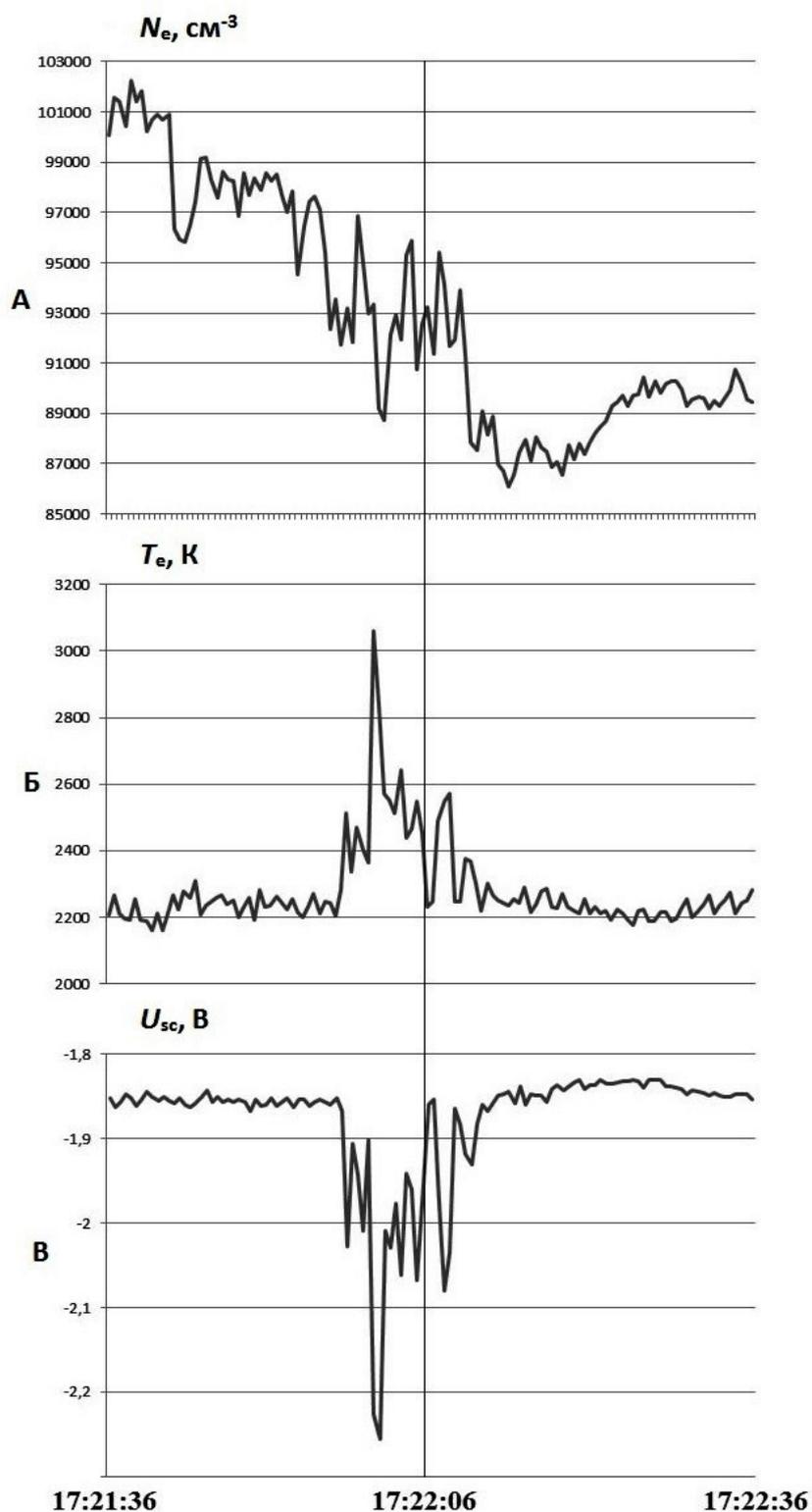


Рисунок 2.3 - см. Рисунок 2.2. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 17:22:06$  UT. 27 августа 2016 г.

Обращает на себя внимание чёткая корреляция поведения  $T_e$  и потенциала  $U_{sc}$  вплоть до деталей, когда увеличение температуры плазмы сопровождается увеличением отрицательного значения потенциала корпуса спутника (в

рассматриваемом случае до величины  $-2.3$  В). Согласно [22], при распределении энергии электронов по закону Больцмана потенциал металлического корпуса ИСЗ в первом приближении пропорционален величине  $KT_e$  ( $K$  – постоянная Больцмана); в этом случае вариации температуры  $T_e$  напрямую влияют на величину потенциала  $U_{sc}$ . Из Рисунка 2.3 видно, что канал измерения  $U_{sc}$  имеет гораздо меньшую зашумленность по сравнению с каналом измерения  $T_e$ , что в ряде случаев удобно использовать для определения наличия слабых искусственных вариаций  $T_e$ , исходя из регистрации вариаций величины  $U_{sc}$ . Более подробно связь между температурой электронов и потенциалом спутника будет рассмотрена в разделе 2.3 настоящей главы.

#### Сеанс 23 мая 2017 г.

ИСЗ SWARM (С) 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 ИСЗ. ВН излучалась на частоте  $f_{ВН} = 4300$  кГц при  $f_{0F2} = 4.6$  МГц с эффективной мощностью излучения  $P_{эфф} = 50$  МВт, высота отражения ВН составляла  $h \approx 235$  км. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ( $\sum K_p = 15^-$ ). Во время нагрева ионосферы наблюдалось развитие достаточно сильной диффузности на ионограммах. Особенностью этого сеанса являлось то, что эксперимент проводился в присутствии полупрозрачного спорадического слоя  $E_s$  с частотой экранирования  $\sim 3$  МГц и критической частотой  $f_{0Es}$  до 7 МГц. Столь мощный спорадический слой мог приводить не только к уменьшению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН, что выразилось в более слабом  $F_{spread}$  по сравнению с сеансом 27 августа 2016 г., выполненном в близких условиях, но и к полному экранированию верхней ионосферы в отдельных участках ВО ионосферы, как это наблюдалось в [76].

На Рисунке 2.4 представлены результаты измерений  $N_e$  (панель А),  $T_e$  (панель Б) и  $U_{sc}$  (панель В) во время сеанса за 23 мая 2017 г. По оси абсцисс отложено время пролёта спутника в UT. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 17:11:40$  UT. По результатам измерений концентрации  $N_e$  на интервале времени  $T = 17:11:23 - 17:11:48$  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  $\sim 200$  км вдоль орбиты ИСЗ), видно появление областей с сильно уменьшенными значениями  $N_e$  (до 7 %) с характерным пространственным масштабом  $\sim 45$  км. Такая структура вариаций плотности плазмы, как отмечалось выше, может быть связана с облачной структурой спорадического слоя  $E_s$ , которая проецируется на верхнюю ионосферу, следствием чего является локальность возбуждения ИИТ вблизи высоты отражения ВН и уменьшения плотности плазмы. При этом горизонтальный размер облаков непрозрачного  $E_s$  можно оценить как  $\sim 20$  км. Приблизительно в том же интервале времени наблюдалось увеличение среднего значения  $T_e$  на  $\sim 2$  % с вариациями её амплитуды 1 – 2 %, имеющие длительность  $\sim 1.8$  с (или с  $l \approx 14$  км). Увеличение значений  $T_e$ , как и раньше, сопровождается уменьшением потенциала ИСЗ. 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»).

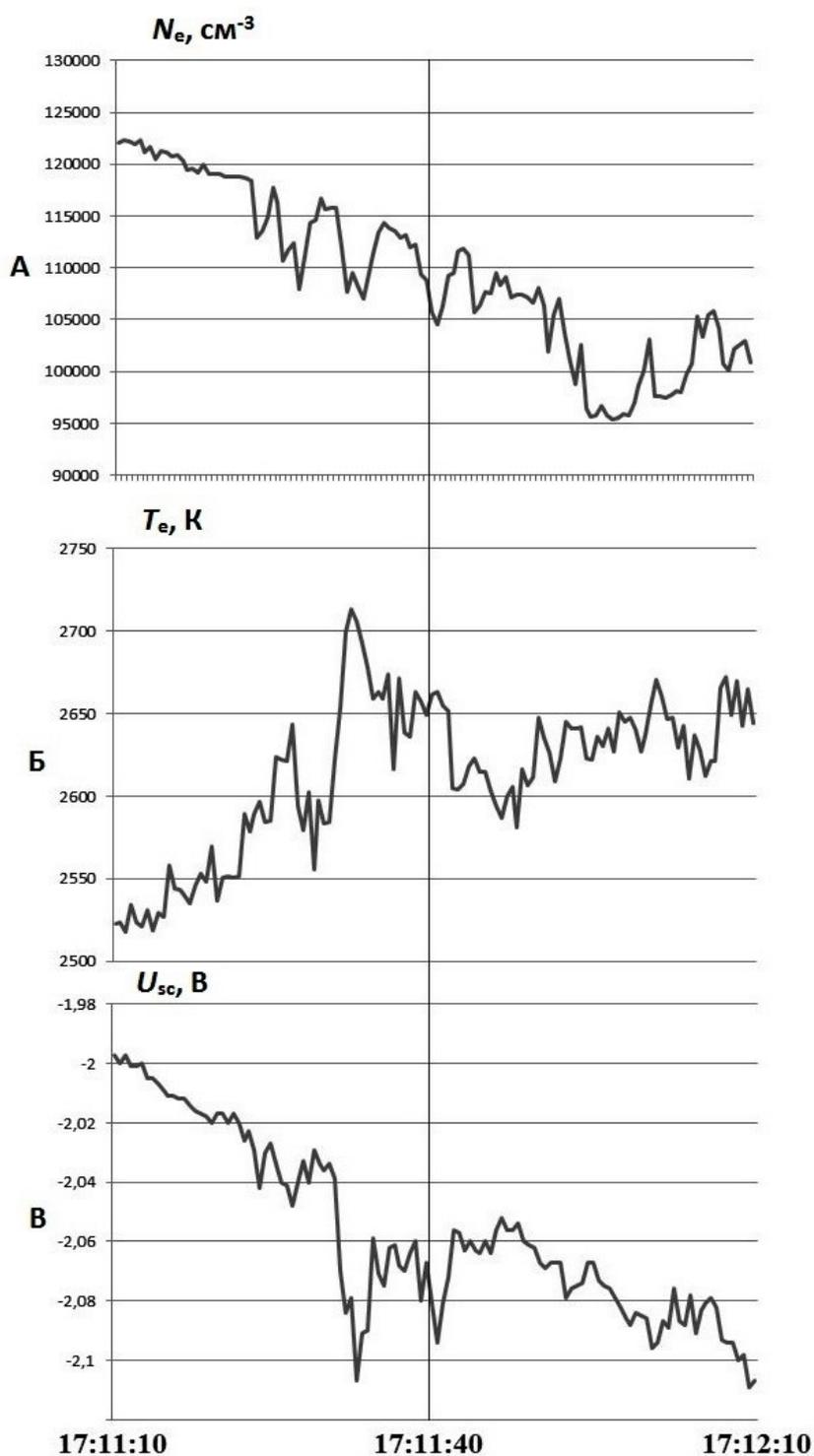


Рисунок 2.4 - см. Рисунок 2.2. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 17:11:40$  UT. 23 мая 2017 г.

Рассматриваемый сеанс в основном подтвердил результаты сеансов за 25 апреля 2016 г. и за 27 августа 2016 г. Кроме того, он продемонстрировал, что картины наблюдаемых в верхней ионосфере возмущений позволяют описать структуру спорадического слоя с помощью анализа концентрации и температуры

электронов. Здесь важно добавить, что для результативной стимуляции верхней ионосферы экранирующий спорадический слой является очень негативным фактором, так как волна накачки не проходит в верхние слои ионосферы.

Сеанс 27 мая 2017 г.

ИСЗ SWARM (B) пролетал в условиях ночной ионосферы ( $T^* = 21:40:54$  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 UT до 21:27:00 UT на  $f_{\text{ВН}} = 4740$  кГц в режиме [3 мин – излучение, 3 мин – пауза], в условиях, когда значение критической частоты  $f_{0\text{F}2}$  непрерывно уменьшалось: значение  $f_{0\text{F}2}$  упало 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 был с 21:24:00 до 21:27:00 UT, т.е. закончился почти за 14 мин до пролёта ИСЗ. При этом можно считать, что с 21:00:00 UT до 21:27:00 UT модификация ионосферы проводилась уже в условиях нагрева «на просвет» ( $f_{\text{ВН}} > f_{0\text{F}2}$ ). Эффективная мощность излучения ВН в этих экспериментах составляла  $P_{\text{эфф}} = 85$  МВт, высота её отражения была около 280 км. Эксперимент проводился в спокойных геомагнитных условиях ( $\Sigma K_p = 13^+$ ). Отмечалось, что ещё при  $f_{0\text{F}2} \approx 4.5$  МГц во время нагрева ионосферы продолжало наблюдаться развитие сильной диффузности на ионограммах; её уровень сильно ослаб, только когда значение  $f_{0\text{F}2}$  упало до 4.3 МГц.

Возможность генерации интенсивных искусственных ионосферных неоднородностей при частоте ВН, превышающей частоту  $f_{0\text{F}2}$  на величину до  $\sim 200$  кГц, неоднократно отмечалась ранее (см., например, [77-78]). Этот эффект связан с тем, что даже в этих условиях частота верхнегибридного резонанса ( $f_{\text{ВГР}} \approx 4.56$  МГц в нашем случае) остаётся меньше  $f_{0\text{F}2}$ . При этом, хотя и на меньшем уровне, продолжается развитие тепловой параметрической неустойчивости, особенно в условиях уже сильно развитой ИИТ.

На Рисунке 2.5 представлены результаты измерений  $N_e$  (панель А),  $T_e$  (панель Б) и  $U_{sc}$  (панель В) во время сеанса за 27 мая 2017 г. По оси абсцисс отложено время пролёта спутника в UT. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 21:40:54$  UT.

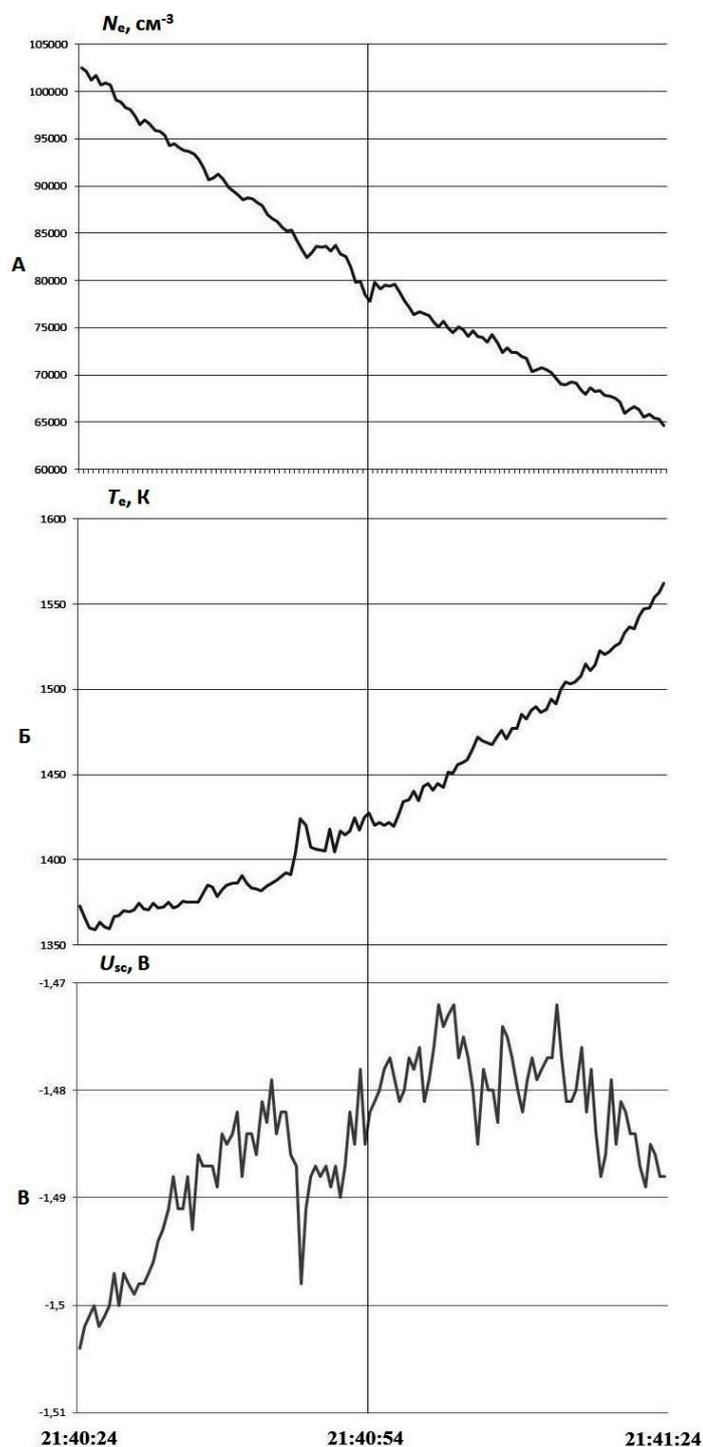


Рисунок 2.5 - см. Рисунок 2.2. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 21:40:54$  UT. 27 мая 2017 г.

По результатам измерений наблюдаются искусственные вариации плотности плазмы  $N_e$  величиной  $\sim 2\%$  и с размерами  $L \approx 30 - 40$  км на интервале времени  $T = 21:40:48 - 21:41:01$  UT, т.е. на расстояниях от 60 км к югу до 50 км к северу от центра возмущённой магнитной силовой трубки, или на расстоянии  $\sim 110$  км вдоль орбиты спутника. Центр вариаций немного сдвинут к югу от центра трубки. В этой же области наблюдаются слабое увеличение средней температуры электронов на величину  $\sim 1\%$  и вариации  $T_e$  до  $\sim 0.7\%$  с наиболее сильными вариациями в 30 км южнее центра возмущённой трубки (влияние эффекта «магнитного зенита»). Более четко вариации  $T_e$  проявляются здесь в канале регистрации потенциала корпуса спутника.

Полученные в этом сеансе измерений результаты показывают, что генерация плазменных возмущений на высотах  $\sim 500$  км имеет место и в условиях, когда частота ВН 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 ВН в 21:27:00 UT, заведомо превышает 14 мин; однако оно может составлять и  $\sim 40$  мин, если время прекращения их возбуждения отсчитывать от 21:00:00 UT, когда значение критической частоты  $f_{0F2}$  упало до 4.5 МГц и стало ниже частоты верхнегибридного резонанса для ВН в плазме  $f_{ВГР}$ .

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что на высотах 450 – 500 км наиболее интенсивными являются неоднородности плотности плазмы с размерами  $l \approx 10 - 15$  км в ортогональном к геомагнитному полю направлении и с амплитудой  $\delta N \approx 3\%$ . Заметим, что неоднородности почти таких же размеров обнаруживаются и внутри возмущённой области ионосферы вблизи максимума её  $F_2$ -слоя особенно в области «магнитного зенита» для ВН, где значение вариаций плотности плазмы в них может достигать 25% [79], и внутри дактов, где они, согласно [72], имеют амплитуду  $\delta N$  до 10%. Таким образом, генерация крупномасштабных ИИН с  $l \approx 10 - 15$  км обнаруживается в широком

интервале высот от высоты отражения ВН до высот внешней ионосферы (~ 660 км). При этом получается, что они имеют наименьшую интенсивность именно в промежуточной области на высотах ~ 500 км.

### **2.3. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере**

Как было отмечено в разделе 2.2, в рамках экспериментов по модификации  $F_2$ -области ионосферы воздействием наземного стенда «Сура» была зарегистрирована взаимосвязь между температурой электронов и потенциалом ИСЗ. Интересной особенностью являлась практически полная (до деталей) корреляция этих величин в областях с развитой ИИТ, когда с ростом  $T_e$  потенциал  $U_{sc}$  уменьшался. Данный раздел посвящен более детальному анализу связи между  $T_e$  и  $U_{sc}$  [A15-A19]. В рамках данного раздела использовались данные, полученные по программам «Сура»-DEMETER [72] и «Сура»-SWARM [A9-A14]. Под потенциалом ИСЗ в спутниковых измерениях понимается разность потенциалов, измеренная между ленгмюровским зондом и оболочкой спутника [80-81]. С потенциалом плазмы потенциал спутника  $U_{sc}$  связан соотношением  $U_{sc} = U_1 - U_2$ , где  $U_1$  – разность между потенциалом зонда и потенциалом плазмы в месте расположения зонда,  $U_2$  – разность между потенциалом плазмы и потенциалом спутника.

В последнее время к изучению потенциала спутника проявляется все больший научный интерес, хотя раньше потенциал спутника считался сугубо техническим параметром. Например, благодаря новой методике [39, 82-83] стало возможно определять концентрацию окружающей плазмы на основе измерений потенциала в магнитосфере на ISEE-1 и других спутниках, что дает новые ресурсы для исследований плазменных характеристик. Несмотря на принципиальные отличия в исследованиях магнитосферы и ионосферы, изучения

потенциала спутника имеет большие перспективы и в исследованиях ионосферной плазмы.

### 2.3.1. Теоретические представления о связи между температурой электронов и потенциалом спутника.

На поверхности спутника возможна нейтрализация ионов и поглощение электронов, но при этом сам спутник в общем случае заряжается, так как число попадающих на него электронов и ионов неодинаково. Число поглощающихся электронов и ионов существенно зависит от потенциала на поверхности спутника, формы и свойств поверхности и от состояния плазмы. В результате, спутник будет заряжаться до тех пор, пока число поглощающихся на его поверхности в единицу времени электронов и ионов не станет одинаковым. Иначе говоря, полный ток на спутник должен быть равным нулю; этим условием и определяется потенциал на поверхности спутника.

В случае ИСЗ ионы и электроны в основном захватываются передней частью поверхности спутника: ионы набегают спереди на спутник из-за большей скорости его движения ( $V_0 \gg v_i$  где  $V_0 \sim 8$  км/с – скорость движения спутника,  $v_i \sim 1$  км/с – скорость движения ионов), набегу же электронов сзади препятствует возникающая здесь область с высоким отрицательным потенциалом [84].

Как показано в [A16], для сферического тела (при условии, что скорость ИСЗ больше тепловой скорости ионов, т.е.  $V_0 \gg \sqrt{2kT_i/M}$ ) имеет место следующее выражение для потенциала:

$$U_{sc} = -\frac{KT_e}{e} \ln \left[ \sqrt{\frac{KT_e}{\pi m V_0^2} \frac{(1-R_e)}{(1-R_i)}} \right], \quad (2.1)$$

где  $K$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  и  $T_i$  – температуры электронов и ионов,  $m$  и  $M$  – массы электрона и иона,  $R_e$  и  $R_i$  – коэффициенты отражения электронов и ионов,  $e$  – заряд электрона.

Расчет выражения для потенциала спутника в общем случае затруднен его сложной формой. В то же время нет оснований считать, что сильно будут изменены качественные закономерности  $U_{sc} \sim T_e$  и  $U_{sc} \sim \ln[\sqrt{T_e}]$  [77].

Таким образом, потенциал спутника будет зависеть от температуры электронов и коэффициентов отражения электронов и ионов. К сожалению,  $R_e$  и  $R_i$  находятся в сложной динамике, их значения зависят от космической погоды и подвержены сильному влиянию нелинейных эффектов, из-за чего их расчет крайне затруднителен. По этой причине определить, в какой момент главным фактором, влияющим на потенциал спутника, является температура электронов, а в какой – коэффициенты отражения, теоретически очень сложно. Важно добавить, что спутники DEMETER и SWARM имеют сложную пространственную конфигурацию и не были оснащены аппаратурой, необходимой для прямого определения  $R_e$  и  $R_i$  [81].

Из сказанного выше ясно, что полученные выражения для потенциала тела имеют приближенный характер. Для точного расчета  $U_{sc}$  необходимо, кроме того, учитывать множество других процессов, приводящих к изменению тока на поверхности спутника, таких, как фотоэффект, термоэлектронная эмиссия, выбивание электронов и ионов с поверхности под влиянием корпускулярного излучения, из-за столкновения с нейтральными атомами среды и др. Все это накладывает ограничения на определение связи между  $U_{sc}$  и  $T_e$  посредством теоретических выкладок и предопределяет необходимость проведения реальных измерений.

### **2.3.2. Экспериментальное исследование связи между температурой электронов и потенциалом спутника**

В рамках анализа взаимосвязи между  $U_{sc}$  и  $T_e$  были проанализированы результаты 22 сеансов в рамках программы «Сура»-DEMETER, выполненные в период с апреля по сентябрь, а также 10 контрольных сеансов, когда стенд не излучал. Кроме того, анализируются результаты 16 сеансов измерений,

выполненных по программе «Сура»-SWARM. Условия проведения экспериментов подробно рассмотрены в [72, А9].

В 9 рассматриваемых сеансах по программе «Сура»-DEMETER наблюдалась генерация ИИН, характеризующихся ярко выраженным и стабильным изменением плотности и температуры электронов в области, возмущённой наземным передатчиком. Один из характерных случаев – сеанс за 27.05.2010 – представлен на Рисунке 2.6. В этом сеансе мощная радиоволна излучалась с 17:35 до 17:50 UT на частоте  $f_{ВН} = 4.785$  МГц ( $f_{0F2} \approx 5.3$  МГц) с мощностью  $P_{эфф} = 70$  МВт (наклон диаграммы направленности –  $12^\circ$  на юг; высота отражения – 250 км). Следовательно, модификация ионосферы осуществлялась в условиях, когда частота волны накачки была на 0.5 МГц ниже  $f_{0F2}$ . Измерения выполнялись в спокойных геомагнитных условиях:  $\Sigma K_p = 4$ . Минимальное расстояние между орбитой спутника и центром возмущённой магнитной силовой трубки составляло 27 км для  $T^* = 17:52:42$  UT. На верхней панели видно увеличение  $N_e$  на  $\sim 22$  %, которое свидетельствует о формировании дакта в возмущённой области; размер возмущённой области  $\sim 60$  км; вариации  $N_e \sim 17$  %. На второй панели представлена временная зависимость температуры электронов, и в той же области, что и для  $N_e$ , наблюдается увеличение  $T_e$  на  $\sim 8$  % [30]. Важно отметить, что крупномасштабные неоднородности, в свою очередь, могут включать в себя мелкомасштабные неоднородности, что сопровождается заметными вариациями плотности и температуры электронов [85].

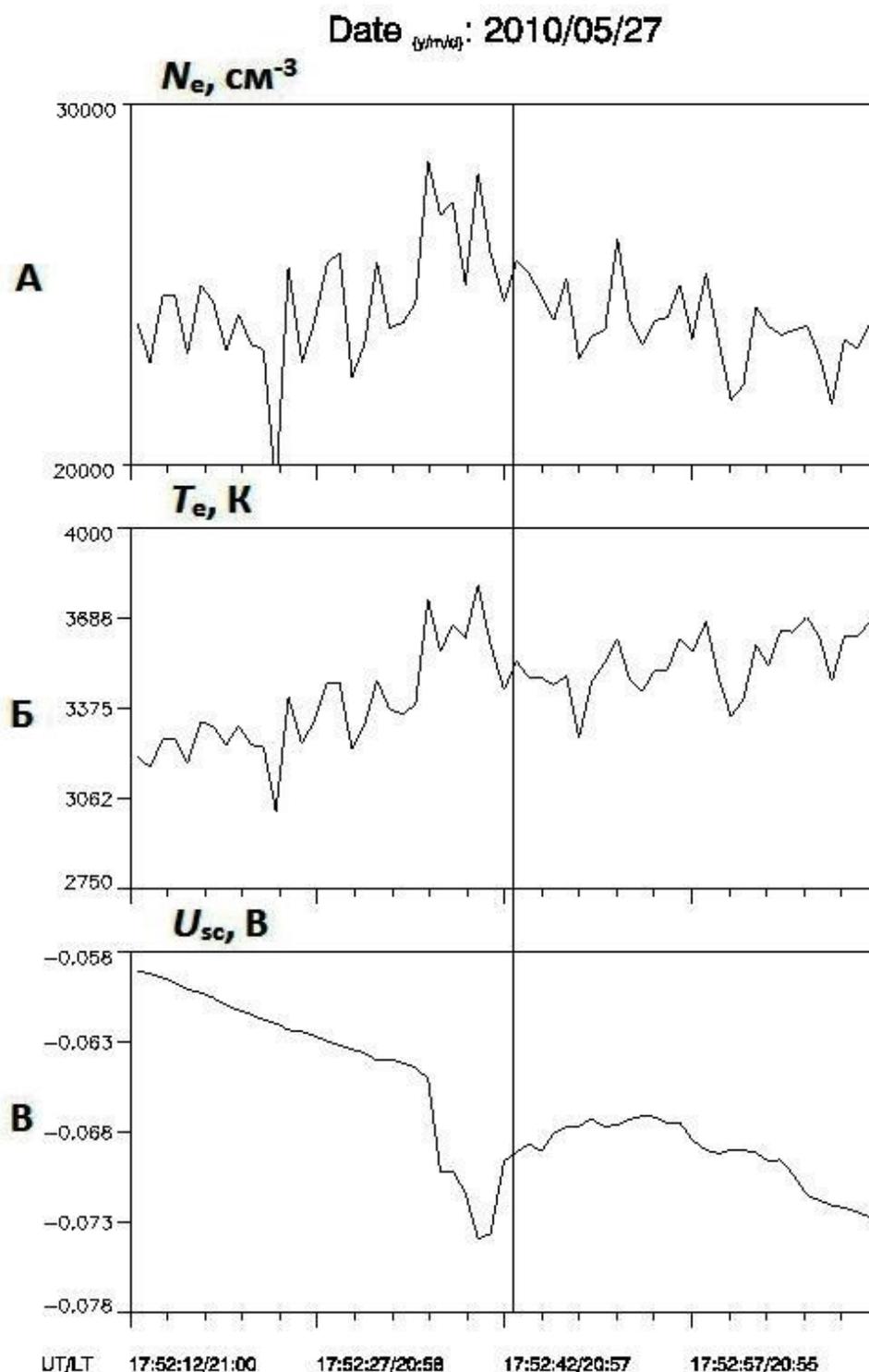


Рисунок 2.6 - Результаты измерений концентрации электронов  $N_e$  (панель А), температуры электронов  $T_e$  (панель Б) и потенциала корпуса ИСЗ  $U_{sc}$  (панель В). Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 17:52:42$  UT. 27 мая 2010 г.

Сеансы анализировались на предмет наличия взаимосвязи между  $T_e$  и  $-U_{sc}$ , причем наибольший интерес представляет их соответствие в возмущённой области ионосферы (ВО). Была посчитана корреляция между изменениями  $T_e$  и  $-U_{sc}$  для 9 рассматриваемых сеансов. Например, для сеанса за 27.05.2010

(Рисунок 2.6) коэффициент корреляции  $r = 0.61$ , а для сеанса за 30.04.2005 (Рисунок 2.7)  $r = 0.79$ . Средний коэффициент корреляции для 9 сеансов, когда была включена «Сура» и наблюдалась генерация ИИН, оказался равен  $\langle r \rangle = 0.63$ , что подтверждает существование взаимосвязи между электронной температурой и потенциалом спутника. В то же время стоит обратить внимание, что коэффициент корреляции далек от 1. Причины этого будут рассмотрены позже.

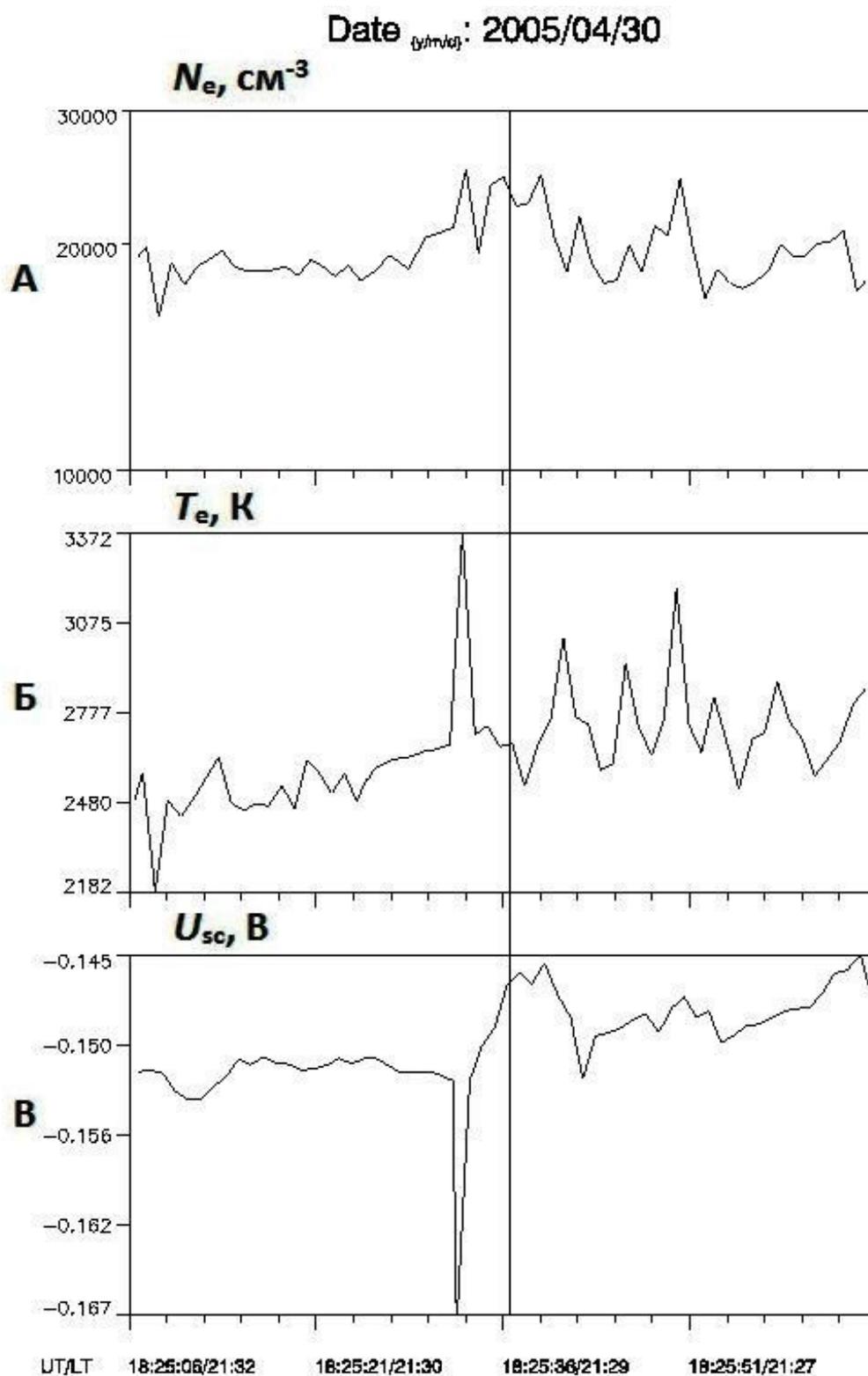


Рисунок 2.7 – см. Рисунок 2.6. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 18:25:37$  UT. 30 апреля 2005 г.

В 13 сеансах, проведённых по программе «Сура»-DEMETER, ИИН не регистрировались. На Рисунке 2.8 представлены результаты такого сеанса (24.08.2006;  $T^* = 18:22:26$  UT). Можно также отметить практически полное

отсутствие взаимосвязи  $T_e$  и  $-U_{sc}$ ; коэффициент корреляции для данного сеанса  $r = 0.03$ . Для 13 сеансов, когда «Сура» была включена, но заметные ИИН не регистрировались, средний коэффициент корреляции  $\langle r \rangle = 0.37$ . Таким образом, можно сделать вывод о том, что в тех случаях, когда наблюдались заметные искусственные ионосферные неоднородности взаимосвязь вариаций  $T_e$  и  $-U_{sc}$  оказалась заметно выше.

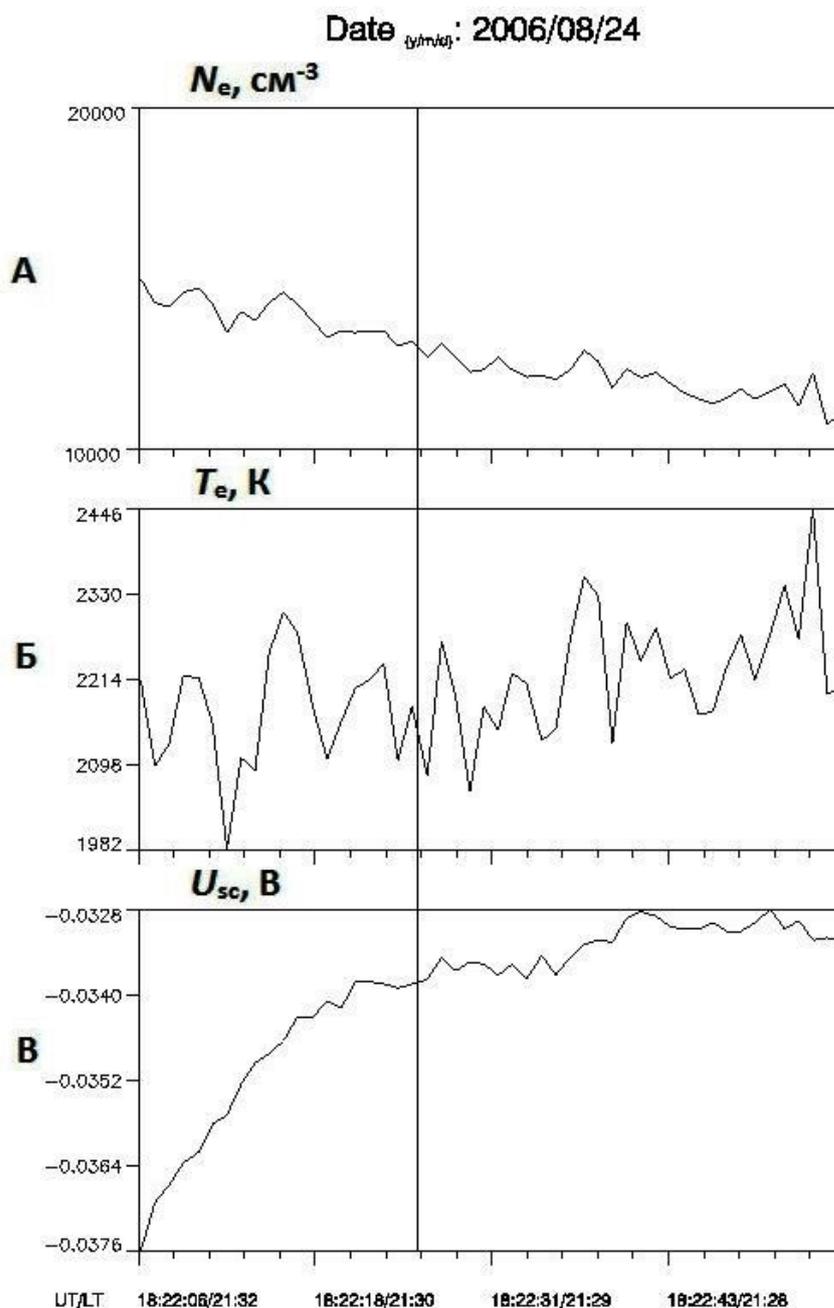


Рисунок 2.8 – см. Рисунок 2.6. Вертикальной линией отмечено время  $T^* = 18:22:27$  UT. 24 августа 2006 г.

Кроме сеансов, выполненных по программе «Сура»-DEMETER, были рассмотрены 10 сеансов пролетов ИСЗ при выключенном стенде для оценки фонового вклада в рассматриваемое явление. В случае контрольных сеансов средний коэффициент корреляции оказался заметно ниже –  $\langle r \rangle = 0.16$ , однако заметно выше нуля, что свидетельствует о том, что некоторая связь между электронной температурой и потенциалом спутника имеет место и в естественных условиях.

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

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что корреляция между  $T_e$  и  $-U_{sc}$  наиболее сильна в случае наличия ИИН. В противном же случае эта связь значительно меньше. Сводные результаты по итогам анализа данных программы «Сура»-DEMETER представлены в таблице 2.1, где СКО – среднее квадратичное отклонение.

Таблица 2.1

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

В рамках экспериментов «Сура»-SWARM [A9] тоже наблюдались сеансы с подобной взаимосвязью между  $T_e$  и  $-U_{sc}$ . Всего было проанализировано 9 сеансов по программе «Сура»-SWARM, когда наблюдались ИИН (и для этих случаев  $\langle r \rangle = 0.67$ ), и 7 сеансов, когда ИИН не наблюдались ( $\langle r \rangle = 0.33$ ) [A15]. Сводные

результаты по итогам анализа данных программы «Сура»-SWARM представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Наличие ИИН		Отсутствие ИИН	
Дата	$r$	Дата	$r$
24.05.2016	0.75	06.03.2017	0.07
27.08.2016	0.85	12.06.2017	0.35
30.08.2016	0.43	29.06.2017	0.38
02.09.2016	0.59	15.10.2017	0.42
07.10.2016	0.66	18.10.2017	0.36
23.05.2017	0.83	29.10.2017	0.51
27.05.2017	0.6	24.11.2018	0.22
07.06.2017	0.66		
07.09.2017	0.7		
<b><math>\langle r \rangle = 0.67</math>, СКО=0.13</b>		<b><math>\langle r \rangle = 0.33</math>, СКО=0.14</b>	

Итак, выводы, которые можно сделать из анализа сеансов программы «Сура»-SWARM (высота орбиты спутников – 450 – 500 км), согласуются с выводами, полученными выше при разборе сеансов по программе «Сура»-DEMETER (высота орбиты около 660 км): при наличии ИИН корреляция между  $T_e$  и  $-U_{sc}$  выше, чем при их отсутствии.

Причина того, что средний коэффициент корреляции  $\langle r \rangle$  оказывается наиболее высоким в первой группе испытаний состоит, вероятно, в следующем. Как было показано в [86], с ростом значений энергий падающих электронов,

коэффициенты отражения электронов и ионов, в общем случае, уменьшаются. В главе 3 данной диссертации будет подробно рассмотрено, что в области, возбужденной КВ радиоизлучением стенда «Сура», может происходить высыпание высокочастотных частиц, характеризующееся ростом энергии и потоков частиц, причем условия возникновения данных высыпаний практически полностью совпадают с условиями возбуждения ИИТ в данной области. Размер области высыпаний (до 1160 км) заметно шире размера области вариаций температуры (до 200 км), однако наибольшая интенсивность высыпаний происходит как раз в области ИИН. Таким образом, максимум высыпаний и, как результат, минимум коэффициентов отражения наблюдается в области вариации температуры. Физический смысл заключается в том, что из-за роста высыпаний высокоэнергетических частиц увеличивается число столкновений между электронами, и, как результат, «среднестатистический» электрон подлетает к оболочке ИСЗ с меньшей скоростью, из-за чего вероятность его поглощения заметно увеличивается. Таким образом, множитель  $\left[ \frac{(1-R_e)}{(1-R_i)} \right]$  из формулы (2.1) имеет наименьший разброс в области вариации температуры электронов в верхней ионосфере, стимулированной КВ радиоизлучением стенда «Сура». Отсюда и уменьшение роли этого множителя в определении значения потенциала спутника и, как следствие, увеличение роли температуры электронов. Важно подчеркнуть, что естественное увеличение температуры электронов не приводит к росту корреляции, если отсутствуют значительные высыпания высокоэнергетических частиц. Таким образом, именно повышенная турбулизация среды приводит к увеличению рассматриваемой взаимосвязи. Корреляция между  $T_e$  и  $-U_{sc}$  не достигает значения 1, потому что уровень турбулентности недостаточен для того, чтобы коэффициенты отражения электронов и ионов уменьшились до тех значений, чтобы множитель  $\left[ \frac{(1-R_e)}{(1-R_i)} \right]$  перестал влиять на значение потенциала спутника. К сожалению, стенд «Сура» в силу своих

ограничений по мощности не позволяет осуществлять такую турбулентность среды, при которой  $\langle r \rangle = 1$ .

Взаимосвязь между  $T_e$  и  $-U_{sc}$ , помимо фундаментального, имеет ещё и важное прикладное значение. В некоторых сеансах уровень шумов на графиках концентрации и температуры электронов слишком высок, что осложняет достоверное определение наличия искусственных ионосферных неоднородностей. В таких ситуациях способом верификации наблюдаемых явлений может служить появление вариаций в значениях потенциала спутника. Кроме того, в случае спутника DEMETER потенциал спутника измеряется с большим разрешением (1 измерение в 100 мс), чем концентрация и температура электронов (1 измерение в 1 с), что позволяет более точно определить размеры областей ИИН.

#### **2.4. Регистрация продольных токов, индуцированных нагревом стэнда «Сура», на высотах 450–500 км**

Для получения данных об эволюции плазменных неоднородностей различных масштабов используются различные радиофизические методы зондирования ионосферы [87-88]. С их помощью изучаются условия образования неоднородностей в различных геофизических условиях, на различных широтах и ионосферных высотах, характер их развития и релаксации, их спектральные характеристики и пр. Однако, несмотря на огромный полученный 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 [89-90], за счёт ухода сверхтепловых электронов из ВО ионосферы во внешнюю ионосферу [91], за счёт действия сил стрикционного и теплового давления в модифицированной мощными

радиоволнами плазме [92]. 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.

По программе «Сура»-SWARM в 2016 – 2019 гг. были выполнены измерения электрических токов, которые индуцируются на ионосферных высотах при модификации  $F_2$ -области среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами. Вертикальная составляющая продольного тока, перпендикулярная траектории пролёта спутника, определялась по величине создаваемой этим током горизонтальной компоненты магнитной индукции, исходя из закона Ампера (подробнее в [A23]). Проведённые эксперименты позволили зарегистрировать области с сильным (до 3000° K) увеличением температуры электронов, плотность продольных электрических токов в которых составляла до 0.02  $\mu\text{A}/\text{m}^2$  в оптимальных условиях генерации ИИТ [A20-A23].

В сеансе за 27 августа 2016 г. нагрев производился в условиях вечерней ионосферы. Вблизи ВО по направлению с юга на север пролетал тандем близко летящих спутников SWARM-A и SWARM-C. Траектория SWARM-A проходила вблизи оси возмущённой магнитной силовой трубки (18 км к западу от её центра, время наибольшего сближения с центром трубки  $T^* = 17:22:06$  UT), а траектория SWARM-C — приблизительно в 100 км к западу от центра возмущённой трубки (Рисунок 2.9, панель а). Подробное описание условий эксперимента приведено в разделе 2.2.

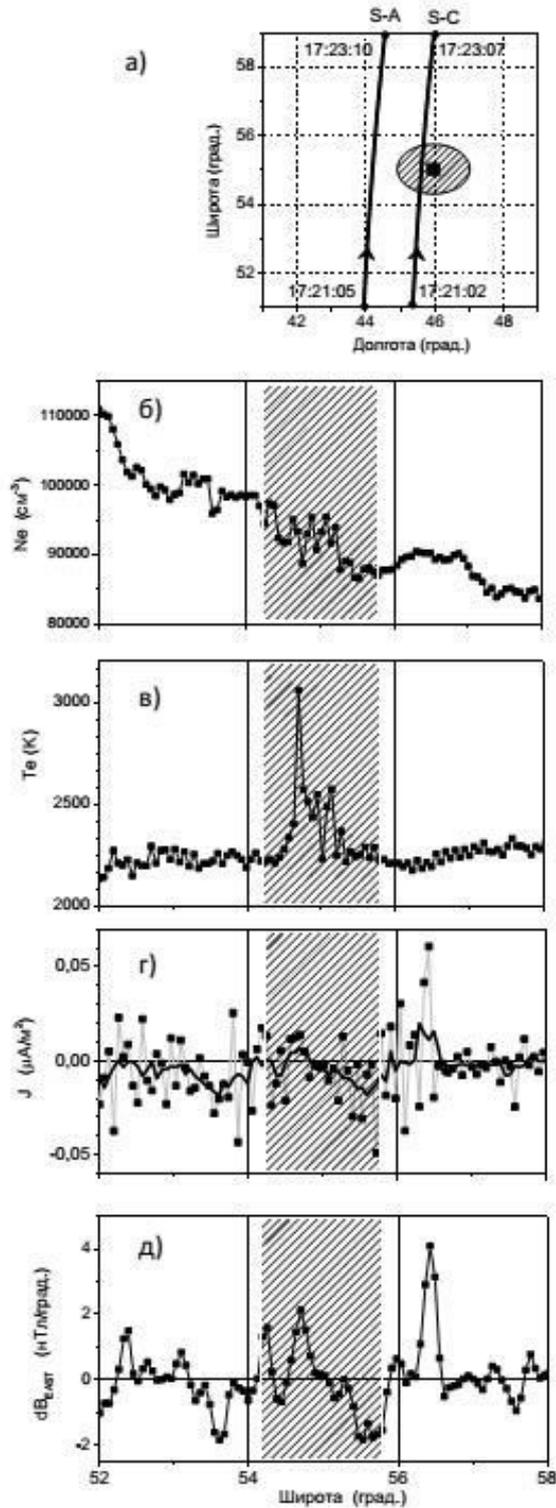


Рисунок 2.9 – (а) Траектории спутников SWARM-A и SWARM-C, (б) концентрация электронов  $N_e$ , (в) температура электронов  $T_e$ ; (г) плотность продольных токов с частотой 1 Гц и сглаженная по трём точкам (положительные значения соответствуют току, текущему вниз); (д) вариация градиента восточной компоненты индукции магнитного поля  $B_{\text{EAST}}$ . Заштрихованной полосой выделена область широт внутри границы возмущённой магнитной силовой трубки. 27 августа 2016 г.

На Рисунке 2.9 (панели б-д) для SWARM-C, траектория которого проходит вблизи центра возмущённой магнитной трубки, для области широт  $52 - 58^\circ$  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. Фактически оба параметра, представленные на панелях (г) и (д), отражают интенсивность вертикальной компоненты тока вдоль траектории спутника. Согласно 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 панели г Рисунка 2.9, — центральная, рассчитанная по трём последовательным значениям полной магнитной компоненты без вычета модельного поля. Во многих случаях такой расчёт 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.

На Рисунке 2.9 (панели б, в) можно видеть, что аппаратура SWARM-C на почти 100-километровом отрезке орбиты регистрировала вызванные нагревом ионосферы вариации концентрации плазмы  $N_e$  (величиной до 4 %), общее повышение  $T_e$  (в среднем на 15 %) и её 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 станда на  $12^\circ$  на юг ИИТ имеет свою максимальную интенсивность на её южном крае. В рассматриваемом случае именно в этой области регистрируется пик увеличения  $T_e$  на 35 % (до  $3000^\circ$  К).

Второй спутник, SWARM-A, пролетал практически одновременно со спутником SWARM-C (спутники пересекают одну и ту же широту с разницей в 3 с) в  $\sim 100$  км к западу от центра возмущённой магнитной силовой трубки, т.е. за пределами области с сильными плазменными возмущениями, индуцированными нагревом ионосферы мощными радиоволнами. Его приборы, в отличие от SWARM-C, не зарегистрировали каких-либо видимых изменений в  $N_e$  и  $T_e$ .

Обратимся к анализу структуры продольных электрических токов. На Рисунке 2.9 (панель г) можно идентифицировать втекающий в ионосферу ток (положительный) в южной части ВО и вытекающий (отрицательный) ток — 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 панели д Рисунка 2.9. Они демонстрируют перемежающиеся области положительных и отрицательных градиентов  $B_{\text{EAST}}$ ; амплитуда этих изменений составляет около 4 нТл. Такая структура магнитной вариации показывает, что траектория спутника регистрирует структуру из нескольких продольных токов: для наиболее выделяющихся из них два текут вверх ( $\partial B/\partial l > 0$  на  $\sim 54,5^\circ$  и  $\sim 56,5^\circ$ ) и два — вниз ( $\partial B/\partial l < 0$  на  $\sim 55,5^\circ$  и  $\sim 53,5^\circ$ ). Характерный пространственный масштаб изменения направления тока составляет около 100 км. При этом внутри возмущённой магнитной силовой трубки в области «магнитного зенита» ток положительный (т.е. течёт 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 течёт вверх, отрицательные значения токов). Видно, что эта пространственная структура электрического тока сдвинута к югу относительно центра возмущённой 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) соответствует положению наиболее сильного увеличения температуры электронов внутри возмущённой трубки.

Второй максимум плотности втекающего тока с плотностью  $0.013 \mu\text{A}/\text{m}^2$  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 возмущённой магнитной силовой трубки, без какого-либо видимого изменения здесь температуры электронов.

Вариации индукции магнитного поля, измеренные магнитометрами SWARM-A, пролетавшего в 100 км к западу от центра возмущённой 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 SWARM-C на расстоянии до  $\sim 100$  км от центра возмущённой магнитной силовой трубки в меридиональном направлении, но они не регистрируются КА SWARM-A на таком же расстоянии западнее её центра, то можно заключить, что область с возбуждаемыми продольными токами должна быть несколько вытянута вдоль геомагнитного меридиана.

На Рисунке 2.10 представлены результаты, полученные в рамках сеанса за 23 мая 2017 г. Спутник SWARM-C в момент максимального сближения с осью возмущённой магнитной трубки в  $T^* = 17:11:40$  UT пролетал в вечерней (но ещё в освещённой Солнцем) ионосфере на высоте 450 км в направлении с юга на север в 40 км к западу от центра возмущённой магнитной силовой трубки близко к краю диаграммы направленности пучка мощных радиоволн.

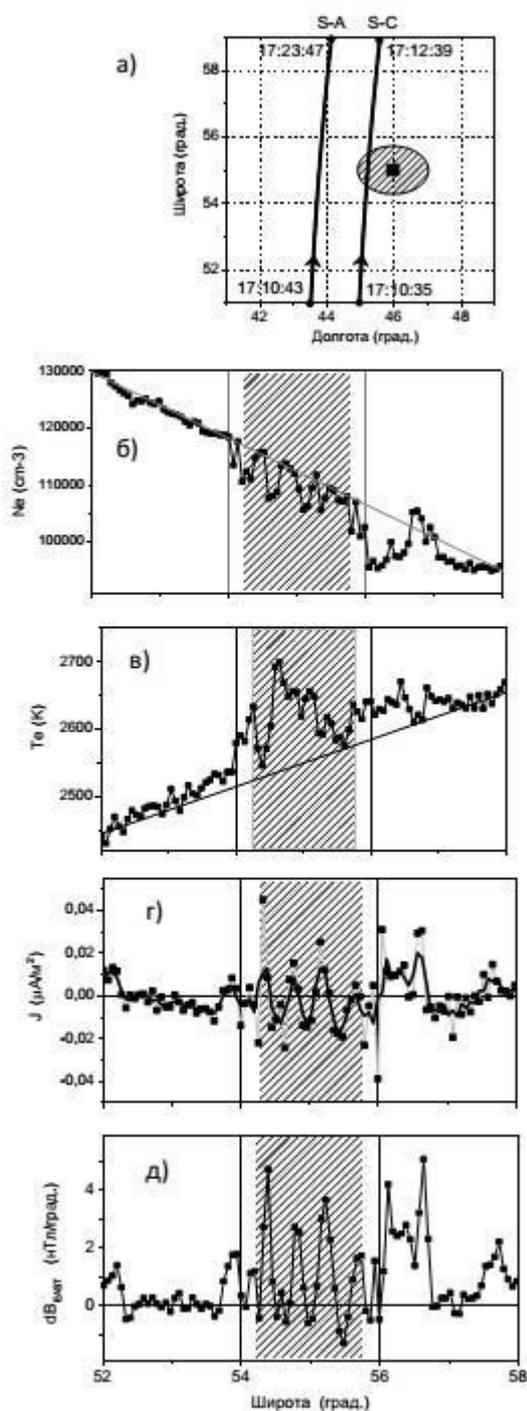


Рисунок 2.10 – см. Рисунок 2.9. 23 мая 2017 г.

На Рисунке 2.10 (панели б, в) для сеанса 23.05.2017 представлены результаты измерений параметров плазмы. По измерениям  $N_e$  на интервале времени  $T = 17:11:23 - 17:11:48$  UT, в области  $54 - 55.5^\circ$  с. ш. (т.е. на дальностях до 110 км к югу и до 60 км к северу от широты  $55^\circ$  с. ш., от оси плазменной трубки) регистрируются несколько выделяющихся областей с пониженной концентрацией плазмы (до 7 %) с характерным пространственным масштабом

~ 30 км. Видно, что эти области соответствуют областям с увеличенной температурой  $T_e$ . Подробное описание условий эксперимента приведено в разделе 2.2.

В этом сеансе спутник SWARM-A пролетал практически в то же самое время в 140 км к западу от центра возмущённой 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 Рисунке 2.10 (панели г, д) представлены соответственно плотность продольного тока и изменение градиента восточной компоненты индукции магнитного поля. По этим данным можно видеть, что положительная величина производной  $\partial B_{EAST}/\partial l$ , соответствующая втекающему в ионосферу току (или выносу электронов во внешнюю ионосферу), соответствует положению областей с уменьшенной плотностью плазмы. В этом сеансе наблюдается чередование четырёх втекающих и трёх вытекающих токов в пределах возмущённой магнитной силовой трубки, которые отражают присутствие нескольких неоднородностей с уменьшенной концентрацией плазмы. 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 августа 2016 г. Для SWARM-A величина вариаций плотности тока и магнитной индукции мала и находится на уровне его фоновых флуктуаций. 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, в частности, следует, что нельзя использовать усреднение результатов измерений за интервал времени, превышающий время пролёта спутника через такую неоднородность концентрации плазмы. В рассматриваемом случае это время составляет около 4 с.

Таким образом, проведённые в 2016-19 гг. по программе «Сура»-SWARM в 2016 – 2019 гг. эксперименты продемонстрировали, что при модификации  $F_2$ -области среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации вместе с развитием ИИТ в центральной части ВО на высотах 450 – 500 км внутри возмущённой магнитной силовой трубки 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 [93-94]. 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 поперёк 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 её 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 [73, 89-90, 95]. В рамках этой интерпретации разогрев электронов и вынос плазмы из области разогрева — жёстко 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 возмущённой магнитной силовой трубке и вокруг неё, что не отвечает идеализированному случаю уединённой 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 [96-97];

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 [98-99];

3) ниже центральной части ВО ионосферы замыкание вихревых токов происходит по высокопроводящему  $E$ -слою ионосферы. Наличие индуцированных нагревом верхней ионосферы токов в  $E$ -области ещё 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 [100].

В ионосферных экспериментах аппаратура спутника зарегистрировала области с сильным (до  $3000^\circ\text{K}$ ) 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 [88], что указывает на высокую эффективность их генерации при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами  $O$ -поляризации.

## 2.5. Заключение по второй главе

В данной главе представлены результаты спутниковых измерений свойств плазменных возмущений в области высот 450 – 500 км. В этом диапазоне высот наблюдается переход от области ионосферы вблизи высоты отражения ВН, в которой имеет место резонансное взаимодействие мощной радиоволны  $O$ -поляризации с плазмой  $F_2$ -области, генерация интенсивной ИИТ и сильный разогрев электронов, к области высот внешней ионосферы, где регистрируется формирование дактов с повышенной плотностью плазмы внутри возмущённой магнитной силовой трубки. Измерения плазменных возмущений проводились с использованием аппаратуры спутников серии SWARM. Модификация ионосферы осуществлялась радиоизлучением стенда «Сура» в вечерние часы в спокойных геомагнитных условиях, когда ВН излучалась в диапазоне частот 4.3 – 4.8 МГц с эффективной мощностью 20 – 100 МВт.

Выполненные измерения характеристик плазменных возмущений позволили установить следующее.

1) На высотах 450 – 500 км вариации плотности и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты ИСЗ, что в 1.5 – 3 раза превышает как горизонтальные размеры центральной части ВО ионосферы на уровне отражения ВН, где наблюдается развитие наиболее интенсивной ИИТ и наиболее сильный разогрев плазмы, так и размеры дактов, генерируемых на высотах ~ 660 км. Отмечается, что, как и в случае развития ИИТ, на генерацию искусственных плазменных возмущений, регистрируемых на высотах ~ 500 км, сильное влияние оказывает эффект «магнитного зенита».

2) В области высот 450 – 500 км наблюдается средний рост температуры электронов на величину 2 – 14 % и сильные флуктуации её значений (1 – 8 %). Сравнивая результаты измерений, полученных с помощью SWARM и DEMETER, можно заключить, что величина вариаций  $T_e$  с ростом высоты уменьшается.

3) На высотах 450 – 500 км с точностью до 1 % не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы с размерами ~ 100 км поперёк линий геомагнитного поля, характерных для дактов, которые регистрировались на высотах ~ 660 км в экспериментах с ИСЗ DEMETER. При этом было установлено, что должны выполняться одни и те же условия для появления плазменных возмущений на высотах ~ 500 км и формирования дактов плотности плазмы на высотах ~ 660 км.

4) На высотах 450 – 500 км наиболее интенсивными являются неоднородности плотности плазмы с размерами  $l_{\perp} \approx 15$  км в ортогональном к геомагнитному полю направлении и с амплитудой  $\delta N \approx 3$  %. Замечено, что неоднородности почти таких же размеров обнаруживаются как вблизи высоты отражения мощных радиоволн в  $F_2$ -слое, так и внутри дактов плотности плазмы [3, 26]. В такой пространственно неоднородной структуре возмущённой области

ионосферы имеет место разбиение потока энергии волны накачки на отдельные пучки волн и, как следствие, сильно неоднородный нагрев ионосферной плазмы.

5) При наличии ИИН имеют место высокие значения коэффициента корреляции между изменениями величины температуры электронов  $T_e$  и соответствующими изменениями отрицательного потенциала корпуса спутника  $U_{sc} - \langle r \rangle = 0.63-0.67$ . В случае отсутствия ИИН коэффициент корреляции падает до  $\sim 0.35$  (когда стенд работает) и  $\sim 0.2$  (когда стенд выключен). Причина данного результата, вероятно, в том, что в случае высокой турбулизации среды коэффициенты отражения электронов и ионов уменьшаются и перестают вносить существенный вклад в изменение потенциала спутника. Данные результаты были получены не только при использовании результатов экспериментов «Сура»-SWARM, но и при использовании результатов экспериментов «Сура»-DEMETER.

6) На высотах 450 – 500 км при модификации  $F_2$ -области среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами вместе с развитием ИИТ в центральной части ВО внутри возмущённой магнитной силовой трубки 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 наблюдались токи противоположного направления, отвечающие обратному движению электронов вдоль силовых линий геомагнитного поля. Данная картина отвечает униполярному характеру термодиффузионного распространения плазменных возмущений с генерацией вихревых токов, продольные компоненты которых определяются движением электронов вдоль магнитного поля, а поперечные — движением ионов поперёк него. Локализованные пики плотности наблюдаемых электрических продольных токов достигают  $0.01-0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$ .

Важно отметить, что спутники SWARM, обладающие большим набором технических возможностей для экспериментов, не являются единственными научными ИСЗ, работающими на этих орбитах. Интересным также

представляется использование китайского спутника CSES, работающего на высоте 500 км, и являющегося аналогом спутника DEMETER [A24], однако по причине пролетов над ВО в неподходящее время (в полдень или в полночь) эффективное использование данного спутника ограничено.

### **3. ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ МОДИФИКАЦИЕЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ**

Высыпания в атмосферу Земли энергичных электронов с энергиями  $E \leq 100$  кэВ вызывают дополнительную её ионизацию на высотах 70 – 130 км (на высотах  $D$  и  $E$  областей ионосферы) [87, 101]. В случае естественных событий, связанных с солнечной активностью, такой процесс дополнительной ионизации хорошо изучен. Он приводит к увеличению концентрации плазмы на высотах нижней ионосферы и к дополнительному поглощению здесь радиоволн СДВ–СВ–КВ диапазонов. В нагревных экспериментах существование искусственной ионизации было зарегистрировано в [102] с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния, расположенного в 960 км к юго-западу от стенда «Сура». Было установлено, что наиболее сильное увеличение концентрации электронов над г. Харьковом, достигающее значений 60 – 70 %, наблюдалось на высотах  $\sim 100$  км; на высотах 140 км увеличение концентрации электронов уже не наблюдалось. Заметим, что по техническим причинам плазменные возмущения не могли быть зарегистрированы радаром на высотах ниже 100 км. Время запаздывания появления возмущений концентрации составляло около 10 мин, они продолжали наблюдаться ещё 10 – 20 мин после выключения ВН. Это явление объяснялось стимулированными работой стенда «Сура» высыпаниями энергичных электронов с  $E \approx 100$  кэВ из радиационного пояса Земли. Согласно сделанным в [102] оценкам, плотность потока энергичных частиц должна составлять  $10^8 - 10^{10}$  эл/м<sup>2</sup>·с. Как показано в [103], такие высыпания регистрировались только в случаях, когда радиационный пояс Земли был заполнен энергичными электронами благодаря росту солнечной активности, и не регистрировались, если такая активность долгое время отсутствовала.

Первые результаты, прямо подтверждающие возможность стимуляции высыпаний энергичных электронов в среднеширотной ионосфере, были получены

на стенде «Сура» во время эксперимента, выполненного 12 мая 2008 г., в котором было обнаружено, что формирование дакта на высотах внешней ионосферы ( $h \approx 660$  км) приводило к усилению в несколько раз потока энергичных электронов с энергиями  $E \approx 100$  кэВ внутри дакта. На основе этих результатов в [104] было сделано заключение, что наблюдающиеся высыпания электронов обусловлены управляемым возбуждением магнитосферного мазера путём формирования мощным радиоизлучением наземного КВ передатчика искусственного волноводного канала — дакта с увеличенной плотностью плазмы [26, 30, 45]. Последующий анализ полученных за время миссии ИСЗ DEMETER экспериментальных данных показал присутствие высыпаний и во многих других случаях, что стимулировало более детальное изучение наблюдаемых явлений.

Эксперименты по стимуляции высыпаний энергичных электронов, проводились на стендах EISCAT-heater (Сев. Норвегия) [105] и HAARP (Аляска, США) [106], которые расположены в более северных, чем стенд «Сура», широтах, в областях с более высоким уровнем естественной авроральной активности, что оказывает сильное влияние на свойства взаимодействия ВН с плазмой, особенно в части модификации ионосферно-магнитосферных связей. В этих исследованиях было продемонстрировано, что ОНЧ волны, генерируемые в ионосфере в результате нелинейной демодуляции мощной радиоволны, взаимодействуя с энергичными электронами радиационных поясов Земли, способны изменять пичч-угловое распределение захваченных в них электронов, приводя к их высыпаниям в нижние слои атмосферы.

В этой главе представлены результаты исследований по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами *O*-поляризации, излучаемыми стендом «Сура» [A25-A31], и влияния этих электронов на нижние слои ионосферы. Кроме того, проанализированы свойства высыпаний энергичных электронов из радиационных поясов Земли в магнитосопряженную относительно стенда «Сура» область ионосферы (МСО)

[A32-A37]. Эти исследования основаны на выполненных в 2005 – 2010 гг. экспериментах по программе «Сура»-DEMETER. Отметим, что в представленных в [72] данных, касающихся свойств высыпаний энергичных электронов, принимались во внимания только сеансы, в которых регистрировалось формирование дактов плотности плазмы. Сегодня ограниченность такого подхода очевидна.

Основные результаты третьей главы опубликованы в [A25-A37].

### **3.1. Организация измерений**

Основные особенности проводимых экспериментов представлены в разделе 2.1. Специфика экспериментов, результаты которых приводятся в данной главе, заключается в особенности нагрева верхней ионосферы. В случае, когда целью было возмущение области над стендом «Сура», стенд обычно включался на ~ 15 мин за 13 мин до пролёта ИСЗ над стендом через возмущённую магнитную силовую трубку, опирающуюся на область с сильно развитой турбулентностью вблизи высоты отражения ВН. Такая длительность нагрева является достаточной для развития плазменных возмущений до практически стационарного уровня не только в области отражения ВН, но и на высотах внешней ионосферы. В случае, когда целью было изучение свойств плазменных возмущений в МСО, стенд обычно включался на 40-45 мин за 38-40 мин до пролета ИСЗ через МСО. Всего по программе «Сура»-DEMETER в 2005 – 2010 гг. было выполнено около 200 сеансов нагрева ионосферной плазмы. Отметим, что практически все измерения были выполнены в спокойных или очень спокойных геомагнитных условиях в годы затянувшегося минимума солнечной активности. Схема проведения эксперимента представлена на Рисунке 2.1.

Детектирование энергичных электронов осуществлялось с помощью спектрометра IDP, который проводил измерения энергии и потока энергичных электронов в диапазоне их энергий от 70 кэВ до 2.5 МэВ с временным

разрешением 1с при его включении в режиме *burst mode* [41]. Особенностью размещения этого прибора на корпусе ИСЗ являлось то, что он измерял потоки электронов, ориентированные близко к ортогональному относительно плоскости его орбиты направлению (с питч-углами, лежащими в области  $90^\circ \pm 16^\circ$  по отношению к направлению геомагнитного поля, что соответствовало, фактически, регистрации запертых в магнитной силовой трубке электронов с энергиями  $E \approx 100$  кэВ) и не регистрировал электроны, которые двигались в направлении, близком к направлению геомагнитного поля. Однако из-за низкой высоты ИСЗ ( $\sim 660$  км) значение таких питч-углов в экваториальной области магнитной силовой трубки лишь незначительно (на несколько градусов) превышал угол конуса потерь, что обеспечивало быстрый перевод большинства частиц при их взаимодействии с ОНЧ волнами в конус потерь.

На этом моменте необходимо остановится детальнее. В действительности спектрометр IDP преимущественно фиксирует характеристики высокочастотных электронов, «запертых» (также в русскоязычной литературе встречается термин «захваченные», в англоязычной литературе используется термин «trapped») в магнитной силовой трубке. При этом измеренное резкое увеличение потока «запертых» энергичных электронов при работе стенда «Сура», относится к «запертым» в геомагнитной силовой трубке энергичным электронам, которые через генерацию ИИТ изменяют своё питч-угловое распределение и выходят из радиационного пояса Земли, опускаясь до высот внешней ионосферы (500–1000 км). Из-за низкой высоты орбиты спутника на экваторе магнитной силовой трубки траектории этих электронов располагаются близко к границе конуса потерь. Такие энергичные электроны за несколько осцилляций между магнитными зеркалами трубки даже за счёт естественных механизмов, изменяющих их питч-угловое распределение, попадают в конус потерь и высыпаются на высоты нижней ионосферы и в приземную атмосферу Земли. Поэтому такие электроны при дальнейшем изложении материала мы будем относить к «высыпающимся», а сам процесс рассматривать как искусственные

«высыпания» энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации верхней ионосферы мощными КВ радиоволнами. Дополнительным основанием для этого могут служить полученные в [A25] экспериментальные данные по влиянию нагрева на поглощение низкочастотной части ветвей ионограмм и уменьшение интенсивности кратных отражений для расположенного около г. Казани ионозонда. Такое влияние связывается с увеличением поглощения радиоволн СВ и КВ диапазонов в нижней ионосфере (в её *D* и *E* слоях) под влиянием энергичных электронов, высыпающихся из радиационного пояса Земли, которое хорошо наблюдается и в естественных условиях.

Необходимо отметить, что при анализе полученных экспериментальных данных и представлении их в настоящей работе нами использовалось всемирное время UT, которое для периода проведения измерений было связано с московским летним временем как  $T_{UT} = T_{МСК} - 4$  часа. Заметим, что для стенда «Сура» астрономическое время для его местоположения больше  $T_{UT}$  приблизительно на 3 часа.

Работа с полученными экспериментальными данными включала в себя:

1) определение в различных геофизических условиях пространственных и спектральных характеристик естественных высыпаний энергичных электронов, когда стенд «Сура» не работал, с целью выработки критериев обнаружения на их фоне высыпаний искусственного характера;

2) определение свойств искусственных высыпаний энергичных электронов в присутствии индуцированных модификацией ионосферы дактов плотности плазмы;

3) определение свойств искусственных высыпаний, когда в силу различных причин аппаратурой ИСЗ дакты не регистрировались.

## 3.2. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли над стендом «Сура»

### 3.2.1. Регистрация высыпаний энергичных электронов в естественных условиях

Для анализа свойств высыпаний, наблюдающихся в естественных условиях, было проанализировано более 100 сеансов, на основании которых получены следующие выводы [A25]:

1) Во время авроральной активности невысокого уровня (с  $K_p \leq 2$  в течение нескольких предшествующих измерениям дней; при этом, в день измерений индекс  $AE$  не превышал значений 100 – 200 нТл) южная граница интенсивных высыпаний на долготе стенда «Сура» для времени  $T \approx 18:00$  UT не опускается ниже географической широты  $62 - 65^\circ$  с. ш. Южнее этой области высыпания либо вообще отсутствовали, либо они имели низкую интенсивность с энергией электронов в них  $E \approx 100$  кэВ при величине их потока  $F \leq 10$  эл/(с·см<sup>2</sup>·стер·кэВ) (далее будем записывать величину потока сокращённо как  $F \leq 10$ , опуская её размерность). Таким образом, широта границы с сильными естественными высыпаниями при невысоком уровне авроральной активности находится почти на  $10^\circ$  севернее широты центра возмущённой нагревом ионосферы магнитной силовой трубки на высоте орбиты ИСЗ (660 км), равной  $\Phi_{тр}^* = 54.6^\circ$  с. ш. для используемого в большинстве измерений наклона диаграммы направленности антенны стенда на угол  $12^\circ$  на юг и высоты отражения ВН  $h \approx 230 - 250$  км.

2) С ростом значений индекса  $AE$  южная граница области с сильными естественными высыпаниями опускается на более южные широты, и при  $AE \approx 300 - 800$  нТл она уже может достигать широты  $\Phi_{тр}^* \approx 54.6^\circ$  с. ш., опускаясь до широт  $46 - 52^\circ$  с. ш. для  $AE = 800 - 1200$  нТл.

3) Индекс  $AE$  имеет максимальные значения на стадии затухания геомагнитных возмущений, через 1 – 2 дня после регистрации максимальных значений индекса  $K_p$ , относящихся к фазе их развития. Этот вывод соответствует результатам других исследований.

4) Результаты измерений показали, что слабые высыпания электронов южнее границы зоны сильной авроральной активности (обозначим её как область «низкоширотной» компоненты естественных высыпаний), если они здесь регистрируются, занимают обычно для  $AE \leq 500$  нТл полосу широт  $\Phi = 50 - 62^\circ$  с. ш. вне зависимости от величины  $AE$ . Эта компонента высыпаний для энергий электронов  $E \approx 100 - 150$  кэВ характеризуется величиной потоков  $F \leq 10$ , причем величина  $F$  для неё, как правило, лишь слабо зависит от широты. В отдельных случаях такие высыпания наблюдались как локальные структуры, имеющие протяжённость  $3 - 5^\circ$  в полосе широт  $46 - 54^\circ$  с. ш.. Из сказанного выше ясно, что «низкоширотная» компонента слабых высыпаний может обнаруживаться на широте стенда «Сура» даже при низком уровне геомагнитной активности. Однако если в течение предыдущих 10 – 15 дней и больше геомагнитных возмущений не было, то высыпания энергичных электронов здесь, как правило, не регистрировались. Представленные данные демонстрируют, как происходит заполнение энергичными электронами зазора между внутренним и внешним радиационными поясами Земли и последующее его опустошение.

В качестве примера (Рисунок 3.1) рассмотрим характеристики высыпаний энергичных электронов, полученные в измерениях 6 – 27 мая 2006 г. в условиях сильно изменяющегося день ото дня уровня геомагнитной активности, когда ИСЗ DEMETER пролетал над неработающим стендом «Сура». По горизонтальной оси отмечено время (слева – юг, справа – север – аврора), по вертикальной – энергия в кэВ (спектрометр IDP не регистрировал электроны с энергией  $< 70$  кэВ). Здесь и ниже координата центра возмущённой магнитной силовой трубки на представленных панелях отмечена чёрным треугольником под осью абсцисс. На самих панелях дополнительно указаны характеристики геомагнитной активности: первая строка – трехчасовой  $K_p$  в момент пролета спутника; вторая строка –

суммарный суточный  $K_p$  в день пролета (в скобках суточный  $K_p$  за вчерашний и позавчерашний день относительно дня пролета); третья строка –  $AE$  в момент пролета, четвертая строка – средний  $AE$  в день пролета.

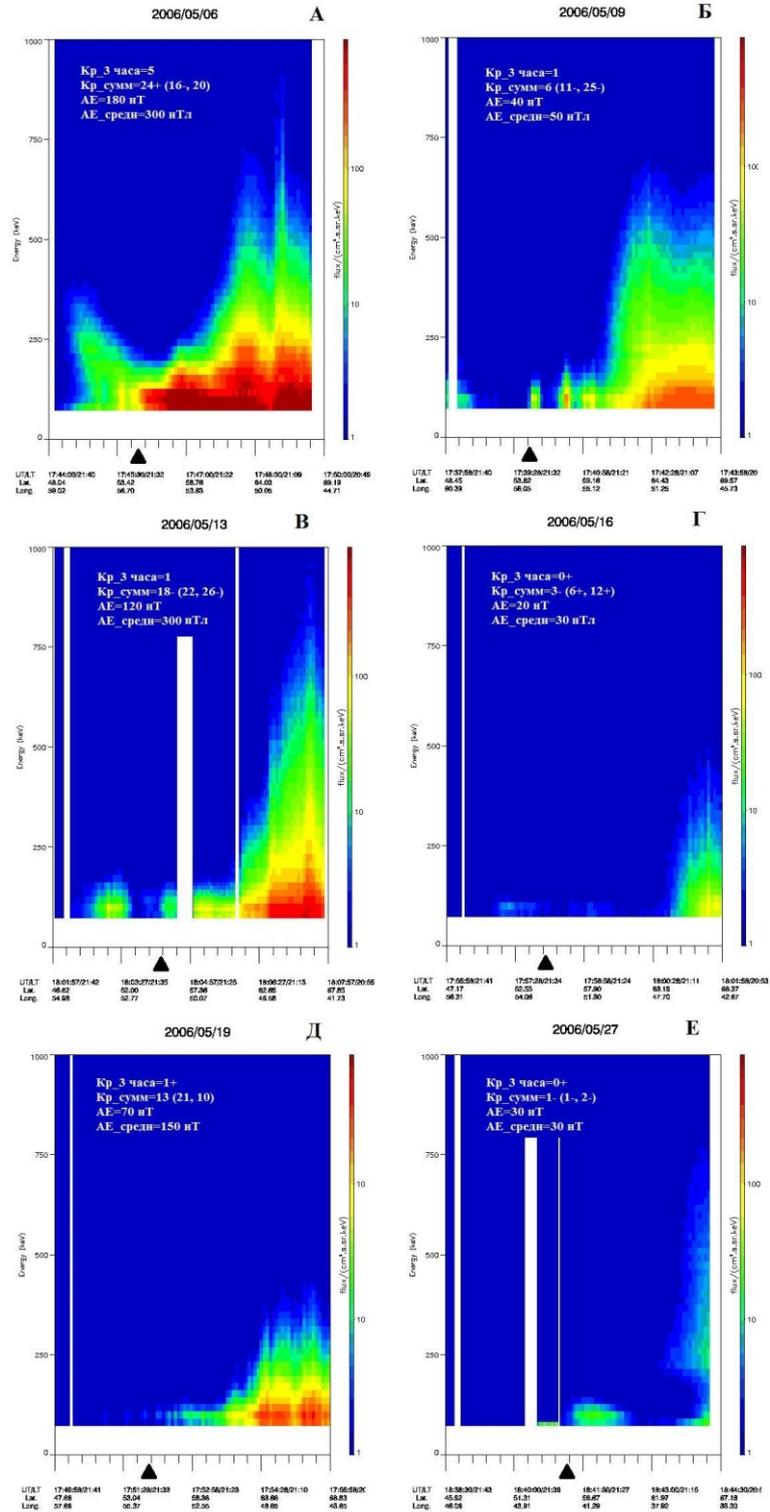


Рисунок 3.1 - Сеансы пролетов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура». Панель А – сеанс за 06.05.2006, панель Б - сеанс за 09.05.2006, панель В - сеанс за 13.05.2006, панель Г - сеанс за 16.05.2006, панель Д - сеанс за 19.05.2006, панель Е - сеанс за 27.05.2006.

Геомагнитные возмущения с  $K_p$  до 5 начались 4 мая; 5, 6 и 7 мая они оставались на таком же высоком уровне. В течение 8 мая значение  $K_p$  индекса понизилось с 3<sup>-</sup> до 1<sup>-</sup>; 10 мая оно было уже в пределах 0 – 1. В этом цикле наиболее высокие значения индекса  $AE = 300 - 500$  нТл регистрировались 6 мая (панель А), когда область интенсивных высыпаний доходила до широты 54.6° с. ш., но граница более слабых высыпаний была ещё на 6° южнее. 9 мая (панель Б) на стадии релаксации геомагнитных возмущений значение индекса  $K_p$  уже упало до 0 – 1, а  $AE$  — до 50 нТл. Тем не менее, аппаратурой спутника продолжали регистрироваться отдельные всплески слабых высыпаний на широте  $\Phi_{тр}^*$ .

С 10 на 11 мая был зарегистрирован новый всплеск геомагнитной активности с  $K_p$  до 4 и  $AE \approx 300 - 500$  нТл; к 15 мая индекс  $K_p$  уменьшился до 1<sup>-</sup>,  $AE$  — до 50 нТл. 13 мая (панель В) опять наблюдались интенсивные авроральные высыпания, однако на широте стенда «Сура» обнаруживалась лишь их «низкоширотная» компонента. Здесь, также можно видеть дополнительную локальную область высыпаний на широтах 49 – 52° с. ш.. К 16 мая (см. панель Г) всё успокоилось, авроральная активность имела небольшую интенсивность; при этом на широте  $\Phi_{тр}^*$  регистрировались лишь очень слабые высыпания с максимумом их интенсивности на широте  $\sim 51.5^\circ$  с. ш..

18 мая в третий раз в течение месяца наблюдался всплеск геомагнитной активности с  $K_p$  до 4. Измерения 19 мая (панель Д) проходили в условиях  $K_p \approx 2$ ,  $AE \approx 150$  нТл, когда, судя по значениям  $K_p$ , пик возмущений был уже пройден. Однако уровень авроральных высыпаний был высоким и его «низкоширотная» компонента опускалась до широты стенда «Сура». После 22 мая уровень возмущённости постепенно уменьшался, и к 27 мая (панель Е) значение  $K_p$  составляло 0<sup>+</sup> при  $AE \approx 50$  нТл. При этом авроральная активность была уже слабой и наблюдалась только на широтах севернее 64° с. ш. при наличии локального усиления высыпаний в области широт 55 – 60° с. ш., которая располагалась лишь немного севернее  $\Phi_{тр}^*$ .

Приведённые выше результаты показывают, что в день измерений уровень естественных высыпаний энергичных электронов более определяется значением индекса  $AE$ , а не  $K_p$  и что при достаточно сильных возмущениях с  $AE \geq 300 - 500$  нТл высыпания высокой интенсивности могут регистрироваться вплоть до широты стенда «Сура». Часто в них выделяется «низкоширотная» компонента достаточно слабой интенсивности, южная граница которой может опускаться до широты стенда и даже несколько южнее её и которая не имеет сильной широтной зависимости потока высыпающихся электронов. Похожие выводы по свойствам высыпаний энергичных электронов на средних широтах можно найти, например, в работах [107-108], из которых также следует, что потоки частиц с энергиями 20 – 45 кэВ могут в 3 – 5 раз превышать потоки электронов с энергиями 85 – 120 кэВ и, следовательно, вносить с собой в ионосферу приблизительно ту же энергию, что и более энергичные частицы.

### **3.2.2. Регистрация высыпаний энергичных электронов в условиях нагрева ионосферы мощными радиоволнами**

Принимая во внимание результаты изучения свойств естественных высыпаний энергичных электронов, в данном разделе будет проведен анализ наблюдений, когда на стенде «Сура» выполнялись эксперименты по модификации  $F_2$ -области ионосферы. Имеющиеся экспериментальные данные для удобства их представления и анализа были разделены на четыре категории: 1) когда спутник пролетал близко к центру возмущённой магнитной силовой трубки, но искусственные высыпания не регистрировались; 2) когда они регистрировались одновременно вместе с дактом плотности плазмы; 3) когда они регистрировались в отсутствии дакта плотности плазмы.

Отсутствие искусственных высыпаний энергичных электронов, когда спутник пролетал близко к центру возмущённой магнитной силовой трубки.

Для анализа данного случая рассмотрим несколько соответствующих сеансов (Рисунок 3.2).

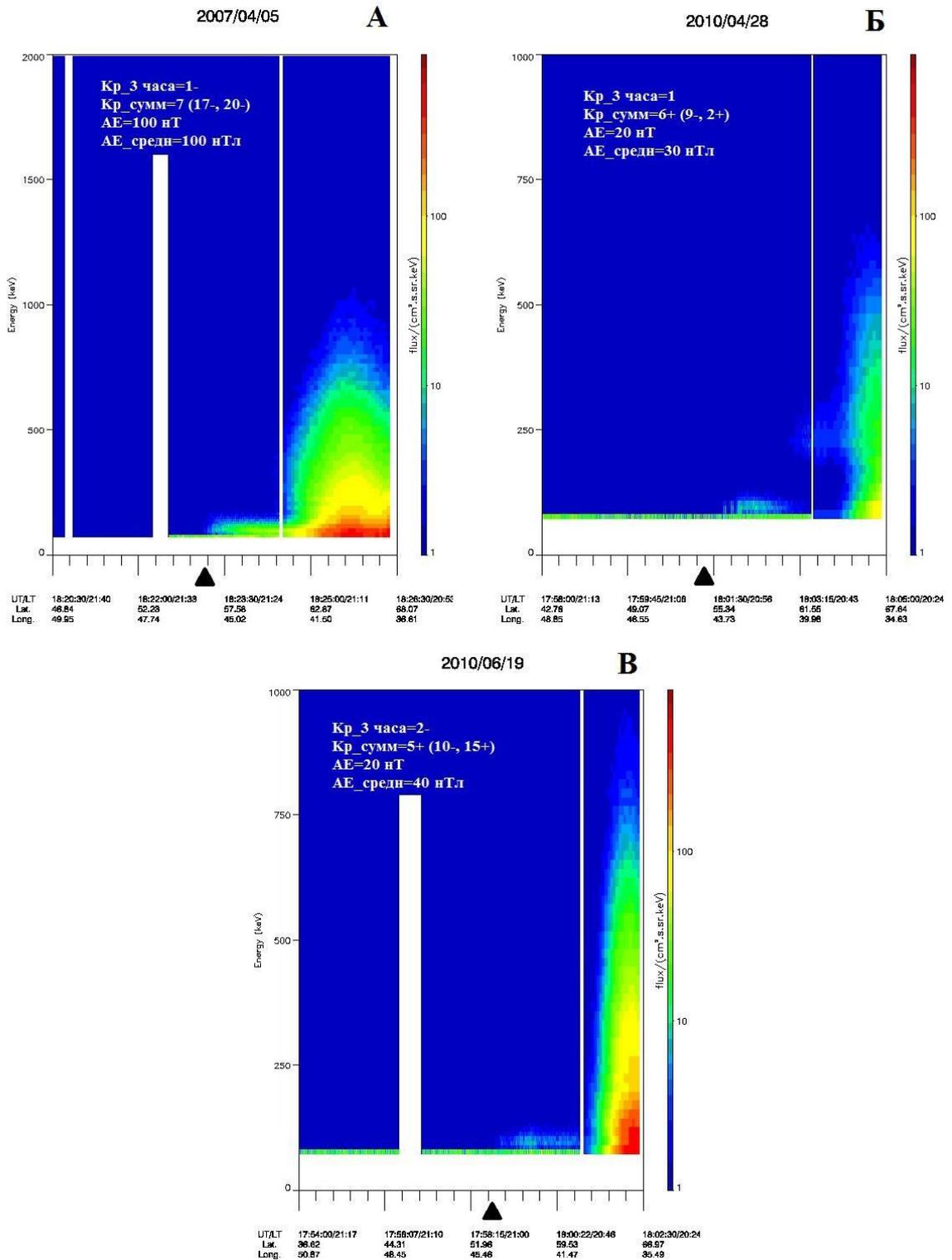


Рисунок 3.2 - Сеансы пролетов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура».

Панель А – сеанс за 05.04.2007, панель Б - сеанс за 28.04.2010, панель В - сеанс за 19.06.2010.

05.04.2007 (Рисунок 3.2, панель А). В этом сеансе, который характеризуется низкими уровнями авроральной и геомагнитной активности и проводился спустя 4 дня после начала геомагнитных возмущений, естественные «низкоширотные» высыпания электронов с энергией  $E$  до 170 кэВ с практически неизменной максимальной величиной потока  $F \approx 80$  для  $E \approx 100$  кэВ наблюдались в диапазоне широт  $56.2^\circ - 61.5^\circ$  с. ш.; на более высоких широтах регистрировалась область с высокой авроральной активностью. Особенностью этого сеанса являлся нагрев ионосферной плазмы, когда  $f_{\text{ВН}} \cong f_{0\text{F}2}$ . В таких условиях не наблюдается возбуждение интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и формирование дакта плотности плазмы из-за высокого уровня просачивания энергии ВН во внешнюю ионосферу [72]. В этом сеансе и в некоторых сеансах ниже белые полосы на рисунках отвечают периодам, когда прибор IDP по техническим причинам не проводил регистрацию энергичных электронов.

28.04.2010 (Рисунок 3.2, панель Б). Особенностью этого сеанса, который проводился через 23 дня после начала геомагнитных возмущений и характеризуется низким уровнем геомагнитной активности, являлись нагрев при  $f_{\text{ВН}}$  на 1.4 МГц ниже  $f_{0\text{F}2}$  (т.е. далеко от критической частоты) и не очень высокая, 50 МВт, мощность нагрева. Как показано в [72], при меньших мощностях ВН формирование дакта может уже не обнаруживаться. В рассматриваемом сеансе «низкоширотные» высыпания электронов с  $E \leq 140$  кэВ наблюдались только на широтах  $56 - 62.3^\circ$  с. ш. (150 – 850 км севернее  $\Phi^*_{\text{тр}}$ ) с максимумом потока  $F \approx 10$  для  $E \approx 100$  кэВ на широтах  $56.7 - 57.2^\circ$  с. ш.. Немного южнее этой области наблюдались ещё два отдельных всплеска сильных высыпаний; севернее её энергия электронов и величина их потока постепенно уменьшались с приближением к  $62.7^\circ$  с. ш. (при приближении к области высокой авроральной активности). Из-за большого расстояния до центра возмущённой магнитной силовой трубки ( $D^* = 105$  км) и прекращения нагрева за 6 мин до пролёта ИСЗ его аппаратурой не могли быть зарегистрированы дакт и какие-либо иные плазменные возмущения. Однако нельзя исключать, что в этом сеансе усиление

интенсивности высыпаний в области широт  $56.7 - 57.2^\circ$  с. ш. могло быть частично связано с работой стенда «Сура». Особенностью этого сеанса также является большое время между окончанием геомагнитной активности и измерениями, когда оболочка с параметром Мак-Илвайна  $L \approx 2.7$  уже могла потерять энергичные электроны.

19.06.2010 (Рисунок 3.2, панель В). Особенности этого сеанса, который проводился через 21 день после начала геомагнитных возмущений, являлись небольшая мощность излучения ВН (40 МВт), низкий уровень геомагнитной активности, а также присутствие во время модификации ионосферы полупрозрачного на частоте мощной радиоволны спорадического слоя  $E_s$ , что могло приводить к значительному ослаблению транспортируемой в верхнюю ионосферу мощности ВН. В этом сеансе «низкоширотная» компонента высыпаний электронов с  $E \approx 100$  кэВ регистрировалась на широтах  $53.3 - 61.7^\circ$  с. ш. (от 140 км к югу до 820 км к северу от  $\Phi_{\text{тр}}^*$ ) с максимумом потока  $F \approx 20$  для  $E \approx 100$  кэВ на широтах  $56.3 - 57.7^\circ$  с. ш. Южнее и севернее области максимума интенсивности высыпаний и величина их потоков плавно уменьшаются, более быстро — в южном направлении. Имеет место максимум интенсивности высыпаний на широте  $\Phi_{\text{тр}}^* = 54.6^\circ$  с. ш. Большое расстояние до центра возмущённой магнитной силовой трубки ( $D^* = 95$  км), низкая мощность ВН и присутствие  $E_s$  явились причинами отсутствия регистрации генерации дакта и иных плазменных возмущений. Основываясь на имеющихся данных, основную часть высыпаний на широтах южнее зоны авроральной активности нельзя отнести к искусственным, хотя нельзя исключать, что некоторое усиление потока энергичных электронов вблизи  $\Phi_{\text{тр}}^*$  может быть связано с работой стенда «Сура».

Представленные выше экспериментальные данные позволяют заключить, что стимулированные модификацией ионосферы искусственные высыпания энергичных электронов не регистрировались, когда не выполнялись условия генерации интенсивных плазменных возмущений вблизи высоты отражения ВН. Это: при нагреве «на просвет» или даже в условиях  $f_{\text{ВН}} \cong f_{\text{OF2}}$ , для частоты ВН

более чем на 1 МГц ниже  $f_{0F2}$ , при низких мощностях ВЧ  $P_{эфф} \leq 40$  МВт, при коротких (несколько минут) временах нагрева, при наличии спорадического  $E_s$ -слоя, частично или полностью экранирующего  $F_2$ -область ионосферы. В таких же условиях не наблюдается генерация дактов с повышенной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы [12, 72]. Искусственные высыпания также не наблюдались, когда геомагнитные условия перед измерениями оставались длительное время спокойными, что может быть связано с отсутствием энергичных электронов на оболочке  $L \approx 2.7$ , которая в спокойных геомагнитных условиях находится между внутренним и внешним радиационными поясами Земли. Тем не менее, выполненные исследования показали, что в области широт  $56 - 59^\circ$  с. ш. иногда наблюдаются локальные (по широте) высыпания энергичных электронов, которые по части своих характеристик могут быть связаны с работой стенда «Сура».

#### Высыпания энергичных электронов при наличии дактов плотности плазмы

Рассмотренные в данном разделе сеансы интересны тем, что регистрируемые в них дакты с увеличенной плотностью плазмы заведомо являются искусственными образованиями, создаваемыми при нагреве ионосферы мощными КВ радиоволнами [72]. Из 9 сеансов, в которых наблюдалось формирование дакта, в 3 случаях имело место явное их влияние на интенсивность высыпаний энергичных электронов, в 3 сеансах это влияние наблюдалось, но имело не столь выраженную форму, либо на результаты этих измерений дополнительно оказывали влияние технические причины, ещё в 3 сеансах не было отмечено какого-либо заметного влияния дактов на характеристики высыпаний.

Рассмотрим сначала сеансы (Рисунок 3.3), в которых влияние дакта как фактора стимуляции высыпания энергичных электронов было бесспорным.

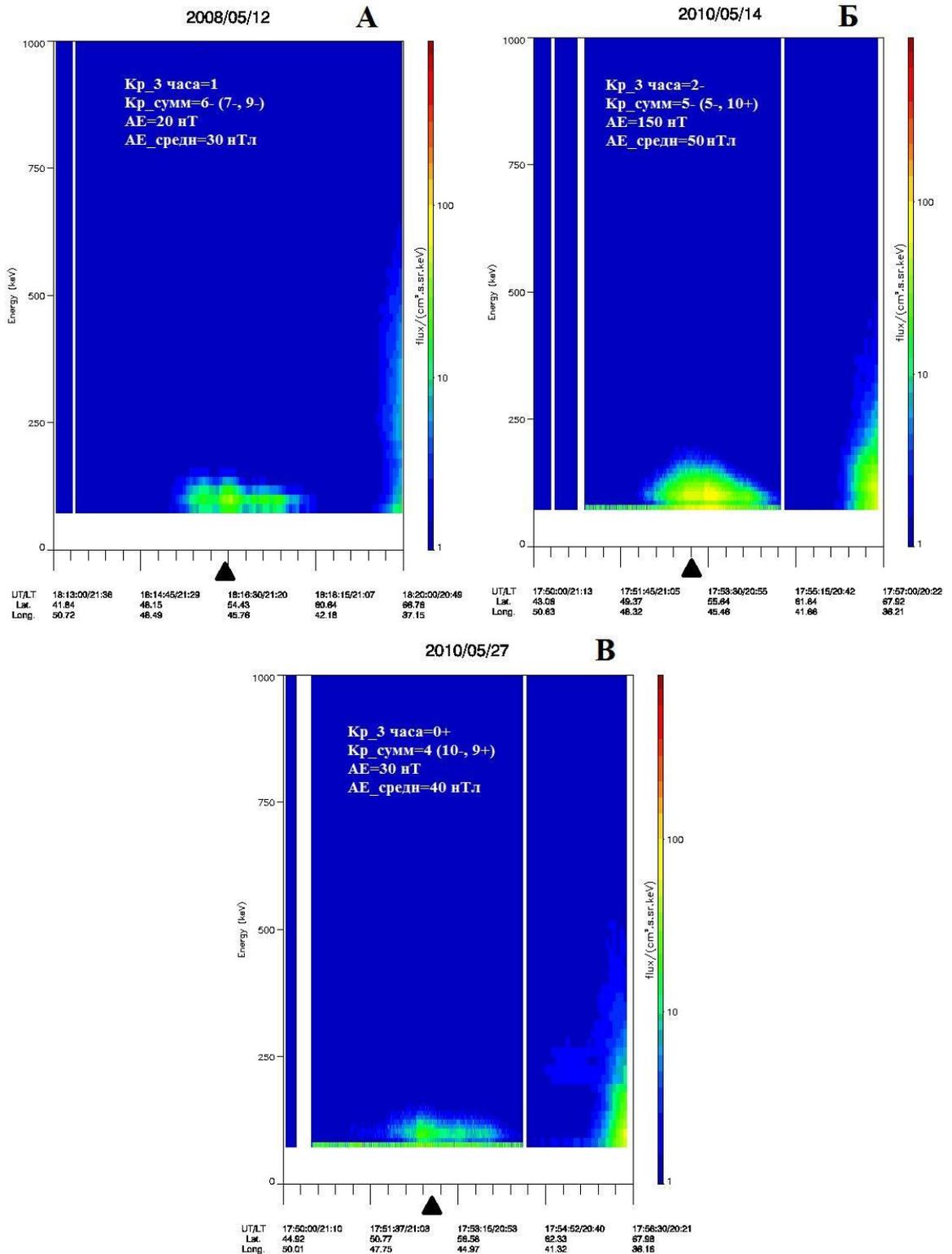


Рисунок 3.3 - Сеансы пролетов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура».

Панель А – сеанс за 12.05.2008, панель Б - сеанс за 14.05.2010, панель В - сеанс за 27.05.2010.

12 мая 2008 г. (см. Рисунок 3.3, панель А) [A25]. В этом сеансе высыпания энергичных электронов с  $E = 70 - 150$  кэВ и  $F \approx 5 - 70$  наблюдались в диапазоне широт  $50.5 - 60.2^\circ$  с. ш. (450 км на юг и 620 км на север от  $\Phi^*_{\text{тр}}$ ), причём величина

потока вдоль орбиты спутника уменьшалась с увеличением расстояния от ИСЗ до центра возмущённой магнитной силовой трубки. Максимум интенсивности высыпаний с  $F \approx 70$  для  $E \approx 100$  кэВ здесь регистрировался во время пересечения ИСЗ дакта плотности плазмы, однако в 180 км южнее  $\Phi_{\text{тр}}$  наблюдалось локальное усиление интенсивности высыпаний. В этом сеансе имело место возбуждение сильных плазменных возмущений при низком уровне авроральной и геомагнитной активности, но при повышенной интегральной концентрации электронов в ионосфере. Измерения проводились через 19 дней после начала геомагнитных возмущений. Отметим, что результаты измерений именно в этом сеансе рассматривались в работе [104], в которой был сделан вывод, что наблюдаемые при излучении станда «Сура» более интенсивные высыпания энергичных электронов внутри дакта определяются возбуждением магнитосферного мазера. На основе полученных данных сейчас стало ясно, что не только высыпания энергичных электронов внутри дакта имеют здесь искусственный характер, но и высыпания южнее и севернее дакта (всего на расстоянии 1 070 км вдоль орбиты спутника, практически вдоль меридиана) тоже были стимулированы модификацией ионосферы мощными короткими радиоволнами.

14 мая 2010 г. (см. Рисунок 3.3, панель Б). Измерения в этом сеансе проводились через 12 дней после начала геомагнитных возмущений. Высыпания энергичных электронов с  $E = 70 - 200$  кэВ и  $F \approx 5 - 100$  наблюдались на широтах  $50.3 - 60.7^\circ$  с. ш. (на расстоянии от 480 км на юг и до 680 км на север от  $\Phi_{\text{тр}}^*$ ), при этом величина потока и энергия регистрируемых электронов уменьшались с увеличением расстояния от центра возмущённой магнитной силовой трубки. Локальный максимум интенсивности высыпаний с  $F \approx 80$  для  $E \approx 100$  кэВ здесь имел место во время пересечения ИСЗ дакта плотности плазмы, который регистрировался несколько южнее  $\Phi_{\text{тр}}^*$ , что может быть связано с влиянием эффекта «магнитного зенита», когда область с наиболее сильными плазменными возмущениями оказывается смещённой на 20 – 30 км от центра диаграммы направленности пучка мощных радиоволн по направлению к магнитному зениту

[12, 26, 109]. Однако максимальные потоки  $F \approx 100$  электронов с  $E \approx 100$  кэВ наблюдались здесь в 80 – 200 км севернее центра возмущённой магнитной силовой трубки. Последнее может быть связано с более высоким содержанием энергичных электронов на оболочках внутренней границы внешнего радиационного пояса по сравнению с их содержанием на оболочке  $L \approx 2.7$ . Отмечается, что интенсивность высыпаний падала к северу медленнее, чем к югу. Эти данные прямо свидетельствуют, что не только высыпания в дакте, но и высыпания южнее и севернее дакта на расстоянии 1160 км вдоль орбиты спутника тоже стимулированы нагревом ионосферы. Эти измерения проводились при низком уровне авроральной и геомагнитной активности спустя 12 дней после начала возмущений, когда в зазоре между радиационными поясами содержание энергичных электронов уже заметно уменьшается. Как было установлено в [72], в этом сеансе наблюдалось возбуждение сильных плазменных возмущений во внешней ионосфере, что свидетельствует о высокой эффективности взаимодействия мощной радиоволны с плазмой.

27 мая 2010 г. (см. Рисунок 3.3, панель В). Измерения в этом сеансе проводились через 25 дней после начала геомагнитных возмущений при низком уровне авроральной и геомагнитной активности. Искусственные высыпания энергичных электронов с  $E = 70 - 150$  кэВ и  $F \approx 5 - 70$  наблюдались на широтах  $49.5 - 61^\circ$  с. ш. (на расстоянии от 570 км на юг и до 710 км на север от  $\Phi_{\text{тр}}^*$ ); величина потока и энергия регистрируемых электронов уменьшались с увеличением расстояния и быстрее к югу, чем к северу. Максимум интенсивности высыпаний с  $F \approx 40$  для  $E \approx 100$  кэВ имел место во время пересечения ИСЗ дакта плотности плазмы и немного южнее его, сам дакт располагался в 30 км южнее относительно расчётного значения широты центра трубки  $\Phi_{\text{тр}}^*$ , что связывается с влиянием эффекта «магнитного зенита». Как и в предыдущем сеансе, здесь имело место возбуждение сильных плазменных возмущений.

Результаты выполненных измерений позволяют сформулировать признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов из радиационного

пояса Земли, наблюдавшихся в экспериментах «Сура»–DEMETER при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами в поздние вечерние и предполуночные часы [A26-A31]. Это:

1) как правило, максимум интенсивности высыпаний наблюдается внутри возмущённой магнитной силовой трубки (особенно при формировании в ней дакта с увеличенной плотностью плазмы);

2) в плоскости геомагнитного меридиана интенсивность высыпаний плавно уменьшается в направлении к северу от центра возмущённой магнитной силовой трубки, простираясь до области авроральных широт, и значительно более резко к югу от него;

3) энергия высыпающихся электронов с максимальными их потоками до  $F \approx 100$  составляет  $\sim 100$  кэВ по измерениям в области  $E \geq 70$  кэВ;

4) высыпания наблюдаются, когда транспортируемая в верхнюю ионосферу эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт и при этом имеет место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой  $F_2$ -слоя, которое проявляется на ионограммах вертикального зондирования как генерация сильного  $F$ -рассеяния (или  $F_{\text{spread}}$ ) и появления аномального ослабления радиоволн  $O$ -поляризации на частотах около и выше частоты ВН.

#### Высыпания в отсутствие регистрации дактов плотности плазмы

В этом разделе работы рассматриваются результаты измерений, полученные в сеансах (Рисунок 3.4), когда дакт не регистрировался, плазменные возмущения были слабы или отсутствовали, однако наблюдалось появление высыпаний энергичных электронов, индуцированных нагревом ионосферы мощными КВ радиоволнами.

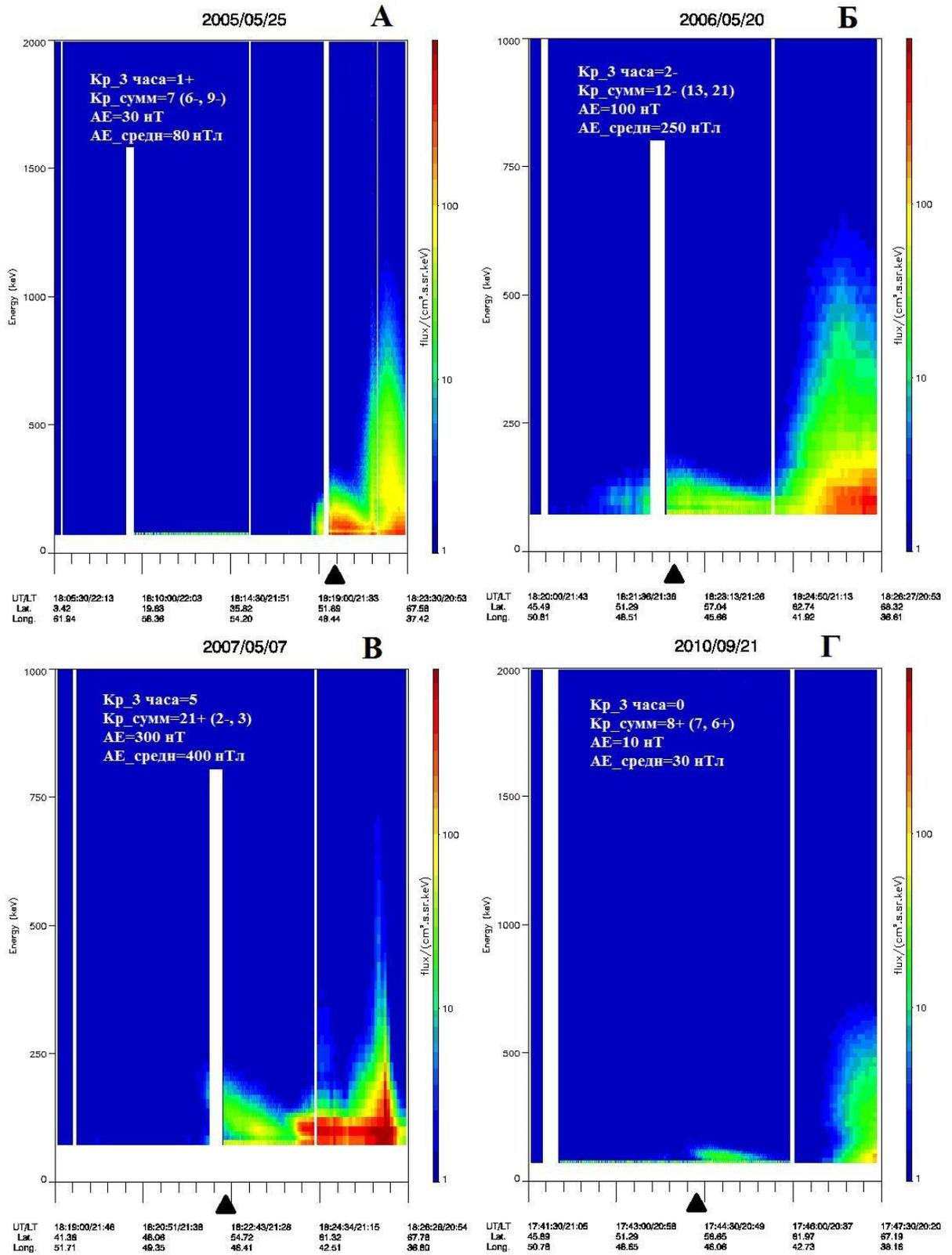


Рисунок 3.4 - Сеансы пролетов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура». Панель А – сеанс за 25.05.2005, панель Б - сеанс за 20.05.2006, панель В - сеанс за 07.05.2007, панель Г - сеанс за 21.09.2010.

25.05.2005 г. (см. Рисунок 3.4, панель А). Измерения в этом сеансе проводились через 25 дней после начала геомагнитных возмущений. Его особенностью являлось то, что он выполнялся при высокой критической частоте  $f_{0F2} \approx 6.6$  МГц с вертикальной диаграммой направленности антенны станда, но с высокой эффективной мощностью излучения ВН  $P_{эфф} \approx 150$  МВт. При этом возбуждалось только слабое  $F$ -рассеяние (на ионограммах регистрировался слабый  $F_{spread}$ ). Невысокий уровень регистрируемых плазменных возмущений в этом сеансе можно связать с высокими критическими частотами, вертикальной диаграммой направленности излучения мощной радиоволны и с достаточно большим расстоянием  $D^* = 67$  км между орбитой ИСЗ и центром возмущённой магнитной силовой трубки. Дакт не обнаруживался аппаратурой спутника, что может быть связано как с большим расстоянием  $D^*$ , так и с малой эффективностью взаимодействия ВН с плазмой. Несмотря на далеко неоптимальные условия модификации  $F_2$ -области, в этом сеансе регистрировались интенсивные высыпания с максимальной интенсивностью на широте  $\Phi^*_{тр}$ . Требуется проведение дальнейших исследований, чтобы понять, с чем это может быть связано. Полученные здесь результаты позволяют заключить, что поперечный размер зоны высыпаний должен заметно превышать 130 км. Как это отмечалось выше, от широты  $\Phi^*_{тр}$  к северу до авроральной области (на расстоянии  $\sim 700$  км) интенсивность высыпаний плавно уменьшалась и более быстро — к югу (на расстоянии  $\sim 450$  км).

20.05.2006 г. (см. Рисунок 3.4, панель Б). Этот сеанс характеризуется слабой авроральной и геомагнитной активностью: рост геомагнитной активности начался 17 мая, в день измерений регистрировалась лишь небольшая остаточная возмущённость. Дакт не регистрировался (из-за большого расстояния  $D^* = 68$  км). Наиболее интенсивные высыпания наблюдались на широте  $\Phi^*_{тр}$ . Размер зоны высыпаний поперёк геомагнитного меридиана здесь можно оценить как превышающий 140 км. От широты  $\Phi^*_{тр}$  к северу до области авроральных высыпаний (расстояние  $\sim 700$  км) и на расстоянии  $\sim 600$  км к югу интенсивность

высыпаний плавно уменьшалась, но сама интенсивность высыпаний в южной части была намного меньше, чем в северной.

*07.05.2007 г.* (см. Рисунок 3.4, панель В). Этот сеанс характеризуется повышенным уровнем геомагнитной и авроральной активности: геомагнитные возмущения начались за 9 дней до начала измерений, но 7 мая имел место повторный всплеск возмущённости. Измерения проводились при  $f_{\text{ВН}} \approx f_{0\text{F}2}$ . Дакт не регистрировался, что связывается с большим расстоянием  $D^* = 68$  км и близостью частоты ВН к  $f_{0\text{F}2}$ . В этом сеансе наиболее интенсивные высыпания наблюдались на 170 – 310 км к северу от  $\Phi^*_{\text{тр}}$ . К северу от широты с максимальным уровнем высыпаний их интенсивность на расстоянии  $\sim 450$  км плавно уменьшалась с приближением к авроральной области, к югу от  $\Phi^*_{\text{тр}}$  интенсивность высыпаний резко уменьшалась. Размер зоны высыпаний поперёк геомагнитного меридиана здесь можно оценить как превышающий 140 км. Близкие результаты были также получены *24.08.2006 г.*

*21.09.2010 г.* (см. Рисунок 3.5, панель Г). Этот сеанс характеризуется слабой авроральной и геомагнитной активностью, причём уровень возмущённости был низким в течение предыдущих четырех недель. При модификации ионосферы возбуждался очень сильный  $F_{\text{spread}}$ . Дакт не мог быть обнаружен из-за большого расстояния  $D^* = 105$  км. Высыпания наблюдались только севернее широты  $\Phi^*_{\text{тр}}$  с максимумом их интенсивности в 210 км севернее  $\Phi^*_{\text{тр}}$  с плавно спадающей интенсивностью дальше к северу до области авроральных высыпаний. Особенностью этого сеанса является то, что здесь имел место достаточно высокий уровень искусственных высыпаний, несмотря на слабый уровень геомагнитной активности в течение длительного времени перед измерениями, при этом высыпания регистрировались только севернее  $\Phi^*_{\text{тр}}$ .

### 3.2.3. Основные выводы по экспериментальным данным

Суммируя все полученные экспериментальные данные можно заключить, что область высыпаний вытянута вдоль геомагнитного меридиана, имея продольные размеры до 1160 км и поперечные — не меньше 400 км. Следует также отметить, что в условиях отсутствия длительное время геомагнитных возмущений перед измерениями максимум интенсивности высыпаний может быть смещён к северу от  $\Phi_{\text{тр}}^*$  на 200 – 300 км при отсутствии высыпаний вблизи широты  $\Phi_{\text{тр}}^*$  (вблизи стенда «Сура»). Такое смещение может быть связано со следующими причинами. Во-первых, с более высоким содержанием энергичных электронов на более высокоширотных магнитных силовых линиях (для  $L \geq 3$ ), когда они уже попадают во внешний радиационный пояс, при отсутствии таких электронов в трубке, отвечающей  $L \approx 2.7$ , которая опирается на область интенсивного взаимодействия мощной радиоволны с плазмой  $F_2$ -области ионосферы. Во-вторых, как показано в работах [91-92], это может быть также связано с присутствием области с достаточно интенсивной генерацией искусственной ионосферной турбулентности к северу от области, определяемой центром диаграммы направленности излучения пучка мощных радиоволн. Последнее определяется рефракцией и фокусировкой лучей на области с развитыми искусственными километровыми неоднородностями плотности плазмы в главном лепестке диаграммы направленности. Кроме того, усиление генерации искусственной турбулентности в этом направлении может быть поддержано достаточно интенсивным излучением мощной радиоволны в первом боковом лепестке диаграммы направленности антенны стенда при наклоне диаграммы на  $12^\circ$  на юг, что обычно используется в наших измерениях для достижения эффекта «магнитного зенита».

### 3.3. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли в магнитосопряженной относительно станда «Сура» области ионосферы

Актуальной задачей, связанной с модификацией  $F_2$ -области ионосферы, является анализ характеристик ионосферы в магнитосопряженной области относительно области, возмущённой наземными передатчиками. Некоторые нагревные стенды располагаются внутри внешнего радиационного пояса Земли, как например стенд HAARP (параметр Мак-Илвейна  $L \approx 4.9$ ) [110], в результате чего достоверное исследование искусственных высыпаний становится практически невозможным по причине высокого естественного фона высыпаний. В этом плане стенд «Сура» обладает выгодным географическим местоположением, так как расположен в области зазора между радиационными поясами (параметр Мак-Илвейна  $L \approx 2.7$ ).

Важным вопросом, связанным с анализом проведённых экспериментов, являлось определение местонахождения МСО. Существуют разные модели расчетов магнитосопряженных точек (ИКИ, ИЗМИРАН, NASA и пр.) [111], которые дают координаты центра МСО с разбросом в  $2-3^\circ$  как по широте, так и по долготе. На основании анализа полученных к настоящему времени экспериментальных данных нами было определено положение магнитосопряженной области относительно возмущённой радиоизлучением станда «Сура» магнитной силовой трубки: центр возмущённой силовой трубки определен в точке с координатами  $40.5^\circ$  ю. ш.,  $61.5^\circ$  в. д. для поверхности Земли. Заметим, что центр возмущённой силовой трубки зависит от высоты отражения волны накачки, значение которой в рассматриваемых экспериментах изменялся от 220 до 270 км; однако неучет данного факта, дает погрешность не более в  $0.2^\circ$  по широте и долготе, которую можно было не учитывать в наших оценках.

### 3.3.1. Регистрация высыпаний энергичных электронов в естественных условиях

Для изучения свойств естественных высыпаний в магнитосопряженной области были проанализированы более 20 сеансов измерений, выполненных в апреле-октябре 2005-2010 годов, когда стенд «Сура» не работал [А32-А37]. В процессе обработки экспериментальных данных анализировались: а) широта северной границы области сильных авроральных высыпаний; б) широта северного края области, где ещё регистрировались потоки электронов слабой интенсивности; в) как характеристики высыпаний связаны с индексами геомагнитной активности  $K_p$  (или его суточным значением  $\Sigma K_p$ ) и индексом авроральной электроструи  $AE$ , а также с фазой развития геомагнитной возмущённости. Полученные при этом данные были использованы для выработки критериев, используя которые можно было выделить высыпания энергичных электронов, стимулированные модификацией ионосферы мощным КВ радиоизлучением стенда «Сура», на фоне их естественной составляющей.

На Рисунке 3.5 представлены данные измерений естественных высыпаний в МСО. На панели А – сеанс за 25.05.2008, на панели Б - сеанс за 18.02.2010, на панели В - сеанс за 06.05.2010. Треугольниками на этом рисунке, как и на следующих, отмечен предполагаемый центр МСО. По горизонтальной оси отмечено время (слева – юг (аврора), справа – север), по вертикальной – энергия в кэВ. На самих панелях дополнительно указаны характеристики геомагнитной активности: первая строка – трехчасовой  $K_p$  в момент пролета спутника; вторая строка – суммарный суточный  $K_p$  в день пролета (в скобках суточный  $K_p$  за вчерашний и позавчерашний дни относительно дня пролета); третья строка –  $AE$  в момент пролета, четвертая строка – средний  $AE$  в день пролета. Представленные рисунки позволяют отметить большие значения энергий и потоков в авроральной области, которые значительно увеличиваются с ростом геомагнитной активности. В области примерно от  $46^\circ$  до  $53^\circ$  южной широты наблюдается незначительное

уменьшение значения энергии относительно последующего роста в более южных областях. Однако в случае больших значений  $AE$ , как на панели В Рисунка 3.5, это уменьшение становится практически незаметно. В целом, интенсивность наблюдаемых явлений зависит от характеристик геомагнитной активности. Значения энергий высыпающихся электронов в МСО не превышает 120 кэВ даже в случаях достаточно больших значений  $AE$ .

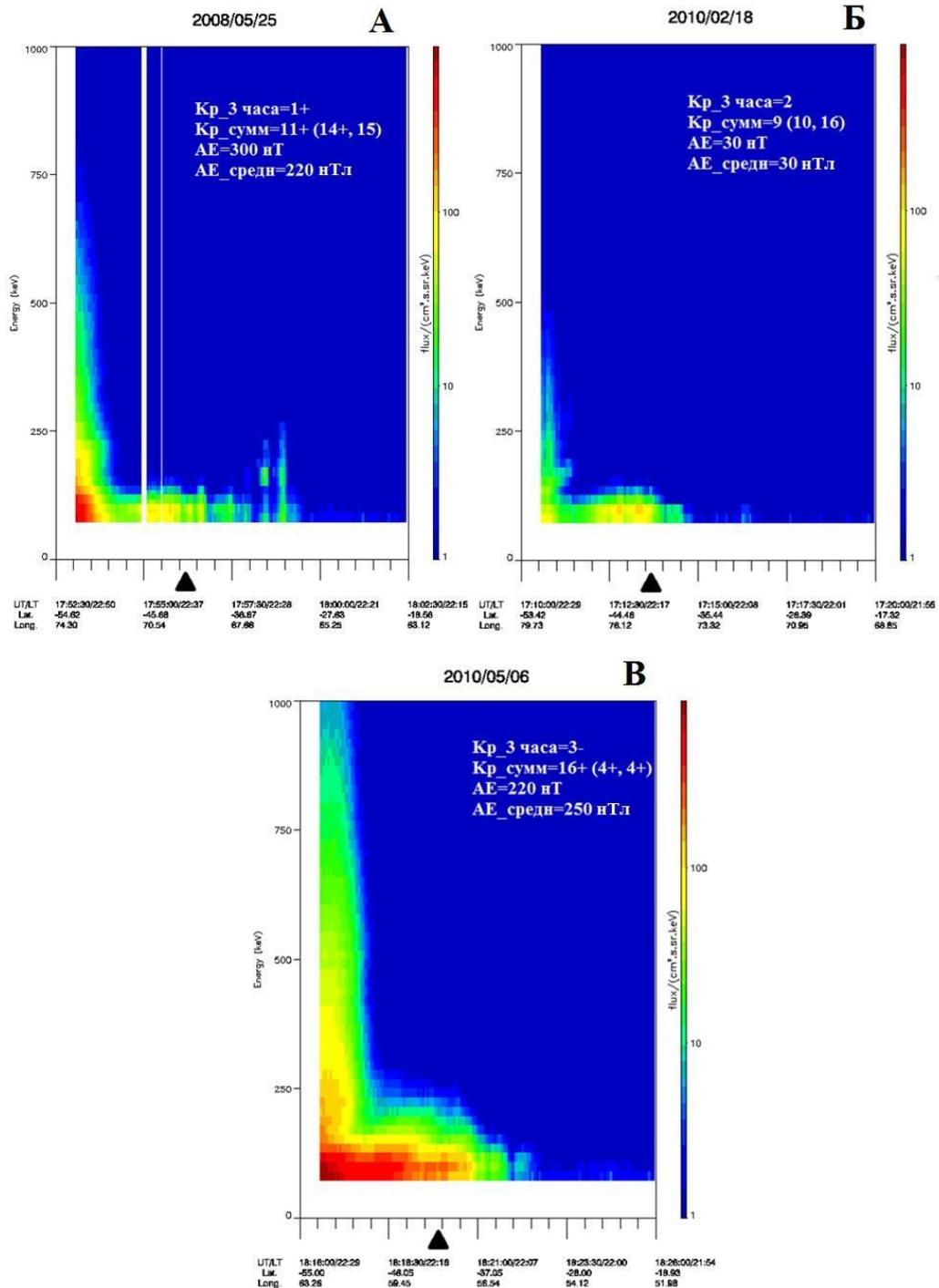


Рисунок 3.5 - Сеансы пролетов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура». Панель А – сеанс за 25.05.2008, панель Б - сеанс за 18.02.2010, панель В - сеанс за 06.05.2010.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1) Во время авроральной активности невысокого уровня ( $K_p \leq 2$  в течение нескольких предшествующих измерениям дней, при этом, в день измерений индекс  $AE$  не превышал значений 150 – 200 нТл) северная граница интенсивных высыпаний на долготе центра МСО для времени  $T \approx 18:00$  UT, когда проводились измерения с ИСЗ DEMETER, не опускается ниже географической широты  $39 - 40^\circ$  ю. ш. Севернее этой области высыпания либо вообще отсутствовали, либо имели низкую интенсивность для электронов с энергией  $E \leq 100$  кэВ при величине их потока  $F \leq 10$ . Таким образом, широта границы с сильными высыпаниями при невысоком уровне авроральной активности находится заметно южнее широты центра МСО.

2) С ростом значений индекса  $AE$  южная граница области с сильными естественными высыпаниями опускается на более южные широты, и при  $AE \geq 200$  нТл она уже может достигать широты  $36 - 37^\circ$  ю. ш. При этом положение южной границы зоны высыпаний в большей степени контролируется среднесуточным значением индекса  $AE$ , а не текущим его значением прямо во время измерений.

3) Уменьшение в значениях энергии между авроральной областью и центром предполагаемой МСО (то есть в области от  $46^\circ$  ю. ш. до  $53^\circ$  ю. ш.) незначительно (падение не превышает 10-20 кэВ).

4) Наблюдаемые значения энергий и потоков высыпающихся электронов более определяются индексом  $AE$ , чем  $K_p$ .

Полученные в рамках анализа сеансов при неработающем стенде «Сура» результаты позволяют более строго отделить искусственные высыпания, стимулируемые нагревом стенда «Сура», от естественных. Стоит отметить, что, в целом, характер естественных высыпаний в МСО совпадает со случаем естественных высыпаний над стендом «Сура» [A25-A31].

### 3.3.2. Регистрация высыпаний энергичных электронов в условиях стимуляции ионосферы мощными КВ радиоволнами стенда «Сура»

Учитывая результаты, полученные в разделе 3.3.1, проведём анализ наблюдений, когда на стенде «Сура» выполнялись эксперименты по модификации  $F_2$ -области ионосферы с целью стимулирования искусственных высыпаний в МСО. Всего было выполнено более 20 экспериментов, что позволило определить характерные особенности наблюдаемых явлений и сформулировать критерии появления искусственных высыпаний в МСО.

На Рисунке 3.6 представлены наиболее типичные сеансы пролетов спутника DEMETER в МСО при работе стенда «Сура». Как видно из рисунка, в её центре наблюдаются искусственные высыпания со значениями  $E \geq 150$  кэВ и  $F \geq 100$ . Но наиболее важным фактором, отличающим данные сеансы от сеансов при неработающем стенде «Сура», является резкое уменьшение энергии высыпающихся электронов в области  $46 - 53^\circ$  ю. ш., что является нехарактерным для естественных высыпаний. Наиболее результативным является сеанс за 16.05.2008, представленный на панели А Рисунка 3.6: искусственные высыпания регистрируются от  $30^\circ$  до  $50^\circ$  ю. ш., то есть область высыпаний вытянута почти на  $\sim 2200$  км вдоль магнитного меридиана. Размер зоны высыпаний поперёк геомагнитного меридиана можно оценить, как превышающий 500 км, исходя из протяженности с запада на восток ( $61.5^\circ$  в. д. –  $67^\circ$  в. д.).

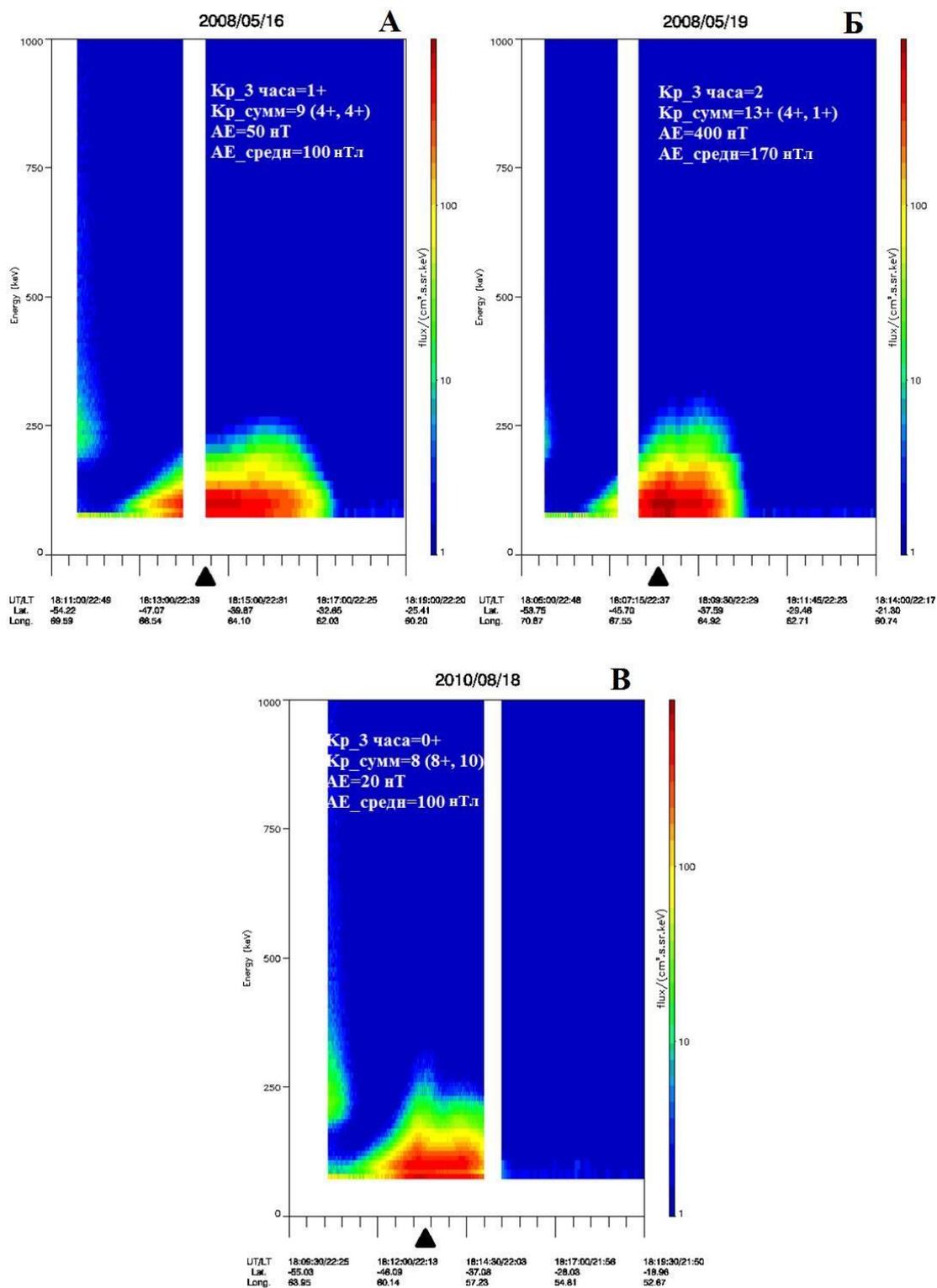


Рисунок 3.6 - Сеансы пролетов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура». Панель А – сеанс за 16.05.2008, панель Б - сеанс за 19.05.2008, панель В - сеанс за 18.08.2010.

Помимо сеансов с явным присутствием искусственных высипаний, приведенных на Рисунке 3.6, были сеансы, в которых не удалось обнаружить заметных эффектов с высокой степенью их достоверностью. Примеры таких

сеансов представлены на Рисунке 3.7 (панель А – сеанс за 26.04.2010, Б – 02.10.2010, В – 09.10.2010). Характер высыпаний, наблюдаемых в представленных на панелях А и Б сеансах не отличается от случаев естественных высыпаний. В то же время, высыпания, наблюдаемые на панели В, можно считать следствием стимуляции ионосферы мощными КВ радиоволнами, так как наблюдается резкое уменьшение энергии в области  $46^{\circ} - 53^{\circ}$  ю. ш. В данном сеансе значения энергии и потоков относительно невелики ( $E = 120$  кэВ и  $F = 10$ ), а сама область высыпаний занимает всего  $\sim 300$  км.

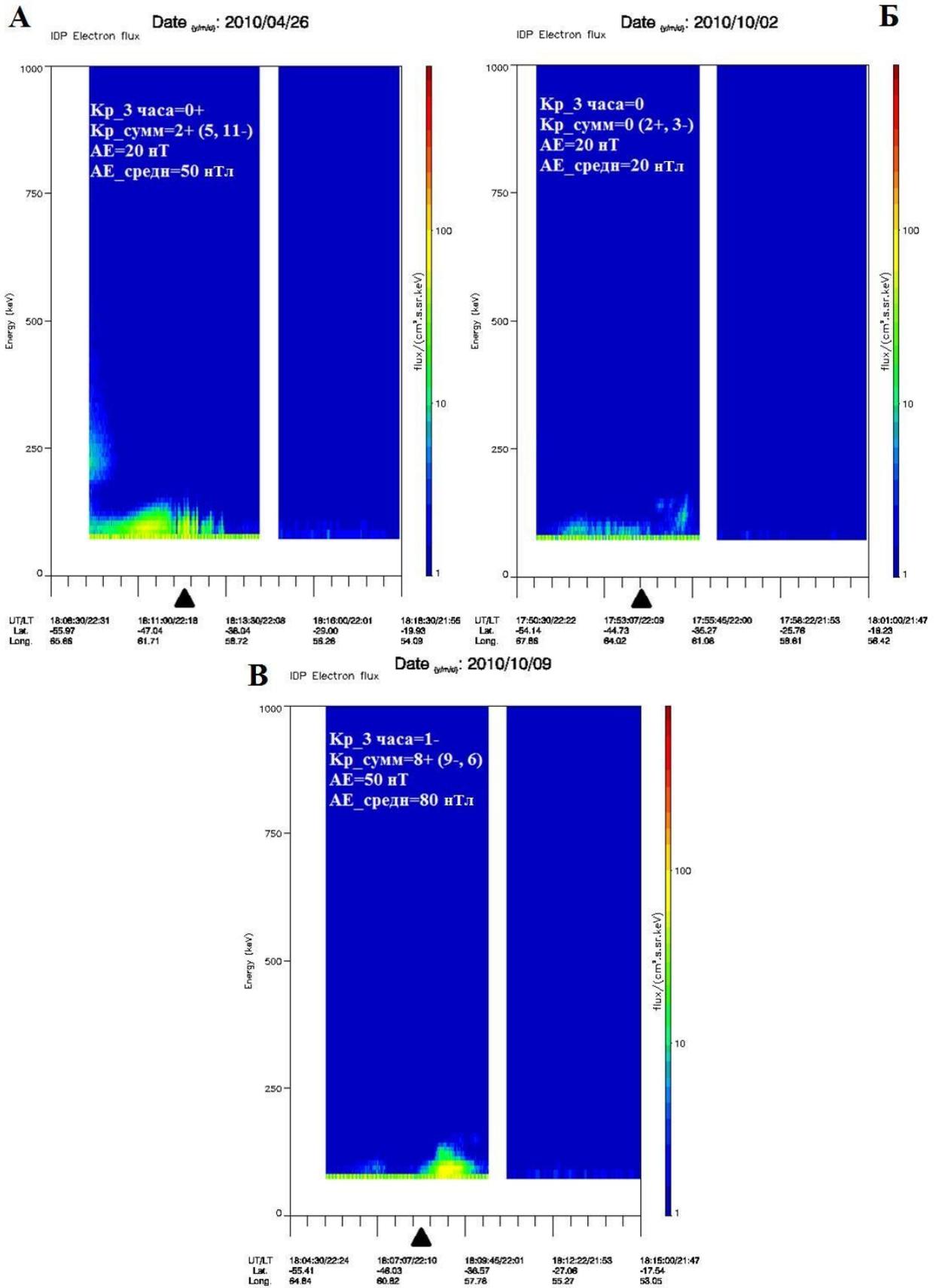


Рисунок 3.7 - Сеансы пролетов спутника DEMETER в условиях неработающего стенда «Сура». Панель А – сеанс за 26.04.2010, панель Б - сеанс за 02.10.2010, панель В - сеанс за 09.10.2010.

По итогам проведённых сеансов были сформулированы условия появления искусственных высыпаний в магнитосопряженной области. Необходимо, чтобы:

а) частота волны накачки (ВН)  $f_{\text{ВН}}$  не превышала критическую частоту  $F_2$ -области  $f_{0F2}$  (пример невыполнения этого условия был представлен на панели Б Рисунка 3.7);

б) мощность ВН  $P_{\text{эфф}} \geq 50$  МВт;

в) отсутствовал спорадический  $E_s$ -слой, экранирующий  $F_2$ -область ионосферы;

г) прошло менее 15 дней с последней суббури (в противном случае низкая степень наполненности радиационного пояса энергичными электронами будет препятствовать генерации интенсивных высыпаний – см. панель А Рисунка 3.7). Однако стоит отметить, что непосредственно во время суббури достоверная регистрация искусственных высыпаний сильно осложнена высоким уровнем естественных высыпаний.

На основании проведённых экспериментов искусственные высыпания высокоэнергичных электронов в МСО из радиационного пояса Земли, вызванные стимуляцией ионосферы мощными КВ радиоволнами, имели следующие характеристики:

а) максимальная энергия высыпающихся электронов составляет  $E \sim 150$  кэВ при величине потока  $F \geq 10$ , даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий;

б) максимум интенсивности высыпаний наблюдается в центре МСО;

в) к югу от МСО наблюдается резкое уменьшение энергии высыпающихся частиц между авроральной областью и центром МСО ( $\sim$  от  $46^\circ$  до  $53^\circ$  ю. ш.).

г) зона стимулированных модификацией ионосферы высыпаний энергичных электронов в магнитосопряженной области может иметь пространственные размеры до 2200 км вдоль геомагнитного меридиана и до 550 км поперёк его.

Стоит отметить, что, при сравнении экспериментов по стимуляции высыпаний в области над стендом «Сура» [A25] с экспериментами, по измерению высыпаний в МСО, во втором случае наблюдается значительно больший разброс,

как в значениях энергий, так и в значениях потоков: больше доля и сеансов с очень заметными эффектами ( $E \geq 150$  кэВ,  $F \geq 100$ ), и неудачных, когда высыпания не отличаются от естественного уровня. Причины, почему сеансы оказываются более эффективными в южном полушарии, вероятно, связаны с ролью Южно-атлантической магнитной аномалии (ЮАМА) [112-116]. В области ЮАМА магнитное поле Земли заметно слабее, чем в прилежащих областях, что приводит к более слабому запираению энергичных частиц, в результате чего эти частицы проникают глубже в верхние слои атмосферы, чем это было бы в случае отсутствия аномалии.

В экспериментах по стимуляции высыпаний траектория пролёта спутника, как правило, проходила так, что не представлялось возможным провести измерения, как над стендом, так и в МСО. Однако имеется сеанс за 24.08.2007, когда спутник пролетел примерно в 150 км от центра возмущённой стендом «Сура» области и в 100 км от центра МСО (см. Рисунок 3.8, панель А). Прочие условия оказались очень благоприятными, поэтому удалось зарегистрировать высыпания в обеих областях (см. Рисунок 3.8, панель Б). Результаты этого сеанса подтверждают сделанные выше выводы о том, что необходимые условия для наблюдения высыпаний над стендом и в МСО практически одинаковы, а интенсивность высыпаний выше в южном полушарии.

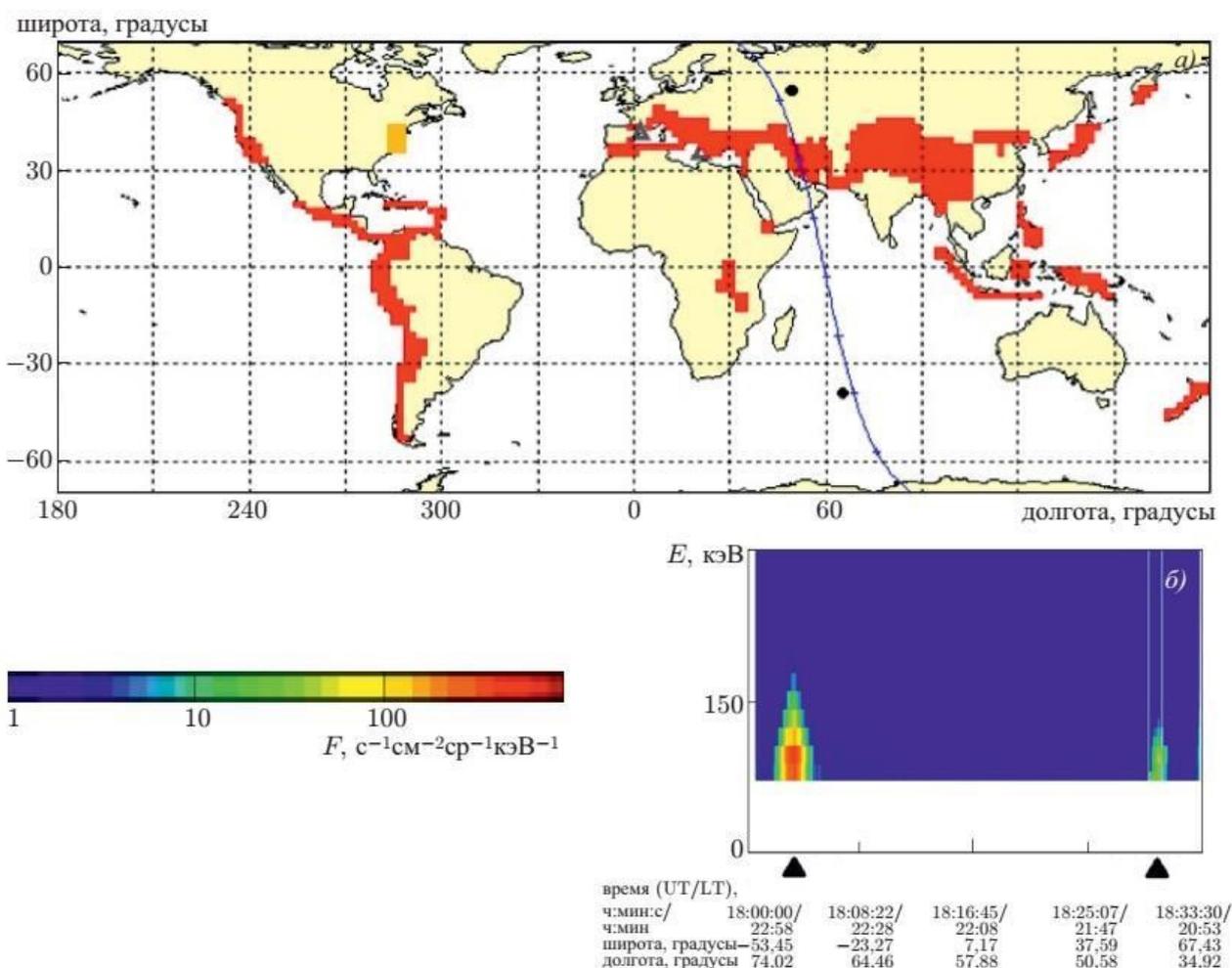


Рисунок 3.8 – Сеанс пролета спутника DEMETER за 24.08.2007.

### 3.3.3. Основные выводы по экспериментальным данным

В рамках представленных в разделе 3.3 экспериментов были определены признаки искусственного характера высыпаний энергичных электронов:

а) высыпания наблюдаются, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 50 МВт и имеет место интенсивное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой  $F_2$ -слоя ионосферы.

б) максимальная энергия высыпающихся электронов составляет  $\sim 150$  кэВ при величине потоков  $\geq 10$  эл/( $\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{стер} \cdot \text{кэВ}$ ). Такие величины наблюдаются даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий. Энергия

высыпающихся электронов при максимальной величине потоков  $\sim 300$  эл/(см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ) составляет  $\sim 100$  кэВ;

в) максимальная интенсивность высыпаний наблюдается в центре МСО, то есть внутри возмущённой магнитной силовой трубки.

Результаты выполненных исследований позволяют заключить, что в тех случаях, когда не выполнялись условия генерации интенсивных плазменных возмущений вблизи высоты отражения ВН, не наблюдалась стимуляция высыпаний энергичных электронов, которые имели бы явно искусственный характер. Все эти условия соответствуют требованиям генерации ИИН [72], хотя, как было показано в настоящей работе, выполнение этих условий не является достаточным для стимуляции искусственных высыпаний (например, низкая степень наполненности радиационного пояса энергичными электронами будет являться причиной отсутствия высыпаний).

Важно отметить, что значения энергий и потоков высыпающихся электронов в МСО оказались сопоставимы со значениями этих величин в случае исследования аналогичных явлений в возмущённой магнитной силовой трубке над стендом «Сура» ( $E \sim 100$  кэВ,  $F \geq 10$ ).

Область высыпаний в МСО в представленных экспериментах имеет размеры до  $\sim 2200$  км вдоль геомагнитного меридиана и до  $\sim 550$  км поперек него. Этот результат превосходит результаты сеансов генерации искусственных высыпаний над стендом «Сура», где область высыпаний была вытянута вдоль геомагнитного меридиана на расстояние до 1160 км; размеры области в поперечном направлении составляли  $\sim 400$  км.

### 3.4. Заключение по третьей главе

Полученные экспериментальные данные позволяют оценить полную мощность, переносимую высыпающимися электронами с энергией  $\sim 100$  кэВ как 200 кВт, которая сопоставима по порядку величины с ВЧ мощностью  $P \approx 500$  кВт,

генерируемой передатчиками нагревного стенда. На самом деле, мощность, переносимая высыпавшимися электронами может быть в несколько раз больше, если учесть энергию электронов с  $E \leq 70$  кэВ [107-108], а также высыпания, которые наблюдаются и в МСО.

Рассмотренные в настоящей работе результаты по стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли и их влияния на нижнюю ионосферу позволяют дать интерпретацию до сих пор необъяснённого эффекта, обнаруженного ещё в первых экспериментах на стенде в Платтевилле (Колорадо, США) при измерении величины стимулированного нагревом поглощения радиоволн в *D*-области ионосферы [117]. В этой работе было показано, что после длительного (10 мин) нагрева ионосферы мощными радиоволнами наблюдалась длительная (до 10 мин) релаксация поглощения пробных радиоволн, чего никогда не регистрировалось при коротких (40 мс) импульсах излучения ВН, для которых характерное время роста и ослабления поглощения были заведомо меньше 40 мс, что отвечает теоретическим оценкам. Кроме того, нагрев ионосферы мощными радиоволнами *O*-поляризации здесь был более эффективен по сравнению с волнами *X*-поляризации. Оба этих результата не укладывались в рамки принятых тогда представлений о модификации нижней ионосферы мощными радиоволнами. Сейчас ясно, что наблюдаемые эффекты были связаны со стимулированными мощной радиоволной высыпаниями энергичных электронов, влияние которых на нижнюю ионосферу продолжается 10 – 15 мин, и что для стимуляции высыпаний модификация ионосферной плазмы мощными радиоволнами *O*-поляризации является намного более эффективной из-за резонансного характера взаимодействия ВН с плазмой.

Как известно, эффективным механизмом стимулирования высыпаний энергичных электронов из радиационных поясов Земли является их взаимодействие с ОНЧ радиоволнами (вистлерами) [106, 118]. Для этого обычно используется либо непосредственное излучение этих волн наземными СДВ передатчиками, либо их генерация при нелинейной демодуляции на ионосферных

высотах модулированной по амплитуде мощной КВ радиоволны за счёт эффекта Гетманцева [119], которая особенно эффективна в высокоширотной ионосфере благодаря присутствию в ней сильной авроральной токовой струи.

Как показали исследования [49, 120-122], генерация ОНЧ волн возможна и при нагреве ионосферы, когда ВН излучается в режиме несущей. Это происходит за счёт возбуждения нижнегибридных волн при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости [22, 26] с последующей их трансформацией в ОНЧ волны, которые покидают область резонансного взаимодействия ВН с плазмой и вдоль силовых линий геомагнитного поля уходят в магнитосферу. Остающиеся вопросы, связанные с эффективностью рассматриваемой схемы генерации ОНЧ волн, требует своего отдельного рассмотрения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1) Впервые проведен детальный анализ характеристик возмущений плотности и температуры плазмы, индуцируемых на высотах 450 – 500 км при работе стенда «Сура». Измерения выполнялись с помощью бортовой аппаратуры спутников SWARM. Определено, что на высотах 450 – 500 км вариации плотности и температуры плазмы обнаруживаются на расстояниях до 200 км вдоль орбиты ИСЗ, что в 1.5 – 3 раза превышает горизонтальные размеры центральной части ВО ионосферы на уровне отражения ВН, где наблюдается развитие наиболее интенсивной искусственной ионосферной турбулентности и наиболее сильный разогрев плазмы. Плазменные возмущения характеризуются изменениями и вариациями (до 7 %) концентрации электронов, а также изменениями и вариациями (до 8 %) температуры электронов. С точностью до 1 % не было обнаружено характерного для дактов увеличения плотности плазмы с размерами  $\sim 100$  км поперёк линий геомагнитного поля, которые регистрировались на высотах  $\sim 660$  км в экспериментах с ИСЗ DEMETER.

2) Обнаружено возбуждение направленных вниз продольных электрических токов, отвечающих выносу электронов из области разогрева вдоль линий геомагнитного поля; за границей этой области зарегистрированы токи противоположного направления, отвечающие движению электронов вниз вдоль силовых линий. Данная картина соответствует униполярному характеру термодиффузионного развития плазменных возмущений с генерацией вихревых токов, продольные компоненты которых определяются движением электронов вдоль магнитного поля, а поперечные — движением ионов поперёк него. Локализованные пики плотности наблюдаемых электрических продольных токов достигают  $0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$ .

3) Проведен анализ результатов измерений высыпаний энергичных электронов (с энергиями  $E \leq 200$  кэВ) из радиационного пояса Земли при

модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными короткими радиоволнами с  $O$ -поляризацией в режиме их непрерывного излучения, как над стендом «Сура», так и в магнитосопряженной области. В результате, были определены условия возбуждения высыпаний ( $f_{ВН} < f_{0F2}$ ,  $P_{эфф} \geq 50$  МВт в условиях наполненности радиационного пояса энергичными электронами) и признаки искусственного характера наблюдаемых высыпаний (максимум плотности потока высыпаний имеет место вблизи центра возмущенной магнитной силовой линии с  $F \approx 10 - 100$  эл/(см<sup>2</sup>·с·стер·кэВ) при энергии электронов  $E \approx 100 - 150$  кэВ). Область высыпаний была вытянута вдоль геомагнитного меридиана на расстояние до 1160 км (размеры области в поперечном направлении составляли  $\sim 400$  км) в северном полушарии и до  $\sim 2200$  км (размеры области в поперечном направлении составляли  $\sim 550$  км) в южном полушарии. Механизм стимуляции высыпаний электронов из радиационного пояса Земли объясняется взаимодействием энергичных электронов с ОНЧ излучениями. Генерация ОНЧ волн при нагреве ионосферы в режиме несущей происходит за счёт возбуждения нижнегибридных волн при развитии тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости с последующей их трансформацией в ОНЧ волны, которые покидают область резонансного взаимодействия ВН с плазмой и уходят вдоль силовых линий геомагнитного поля в магнитосферу.

В научном плане результаты дают основу для более глубокого понимания особенностей взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой, условий и механизмов формирования на высотах внешней ионосферы плазменных возмущений.

Полученные в работе результаты рекомендованы для сотрудников следующих научно-исследовательских учреждений: ИКИ РАН, ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН, ПГИ КНЦ РАН, ИПФ РАН, ИРЭ РАН, КФУ и др. Результаты обладают перспективой быть востребованными и развитыми в физике околоземного космического пространства, распространении радиоволн в плазмоподобных средах, астрофизике и др.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВГР – верхнегибридный резонанс

ВН – волна накачки

ВО – возмущённая область

ВЧ – высокочастотный

ИИН – искусственные ионосферные неоднородности

ИИТ – искусственная ионосферная турбулентность

ИСЗ – искусственный спутник Земли

КА – космический аппарат

КВ – коротковолновой

КНЧ – крайне низкочастотный

мин – минута, минуты

мс - миллисекунда

МСО – магнитосопряженная область

НИИ – научно-исследовательский институт

ОНЧ – очень низкочастотный

с – секунда, секунды

СВ – средние волны

СДВ – сверхдлинные волны

СКО – среднее квадратичное отклонение

СПН – стрикционная параметрическая неустойчивость

СФН – самофокусирующая неустойчивость

УКВ – ультракоротковолновой

ЮАМА - Южно-атлантическая магнитная аномалия

Некоторые сокращения повторно расшифровываются в тексте диссертации для удобства чтения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

А1. Рябов, А. О. Определение ионного состава внешней ионосферы на основе характеристик КНЧ-СНЧ-волн, регистрируемых во время работы стенда «СУРА» / А. О. Рябов // Физика плазмы. – 2018. – Т. 44. – № 11. – С. 916-921.

А2. Возмущение ионосферно-магнитосферных связей мощным ОНЧ-излучением наземных передатчиков / А. С. Белов [и др.] // ЖЭТФ. – 2012. – Т. 142. – № 6. – С. 1246-1252.

А3. Рябов, А. О. Исследование поляризационных характеристик КНЧ сигналов в области ионосферы, возмущённой мощным КВ радиоизлучением / А. О. Рябов, А. С. Белов // Труды XX научной конференции по физике. – 2016. – С. 30-33.

А4. Рябов, А. О. Поляризационные характеристики КНЧ/СНЧ-волн, наблюдаемых во внешней ионосфере при воздействии мощным наземным КВ-радиоизлучением / А. О. Рябов // Тезисы докладов конференции «Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике». – 2017. – С. 92.

А5. Рябов, А. О. Поляризационные характеристики низкочастотных волн, наблюдаемых в ионосфере / А. О. Рябов // Тезисы докладов Пятнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2017. – С. 431.

А6. Рябов, А. О. Метод определения ионного состава внешней ионосферы / А. О. Рябов // Труды конференции «Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике». – 2019. – С. 373-375.

A7. Ryabov, A. O. Estimation of the ion composition of the outer ionosphere from the characteristics of ELF–VLF waves / A. O. Ryabov // Atmosphere, ionosphere, safety. Proceedings of VII International Conference. – 2020. – P. 47-51.

A8. Высотные характеристики дактов плотности плазмы / В. Л. Фролов [и др.] // Труды конференции «Распространение радиоволн – 26». – 2019. – Том II. – С. 100–103.

A9. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450 – 500 км при работе стенда "Сура" / В. Л. Фролов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2018. – Т.61. – № 5. – С. 359-373.

A10. Characteristics of artificial plasma disturbances at heights about 500 km / I. A. Bolotin [et al.] // Radiation and Scattering of Electro-magnetic Waves (RSEMW). – 2017. – P. 134-137.

A11. Excitation of artificial plasma turbulence in the outer ionosphere / A. O. Riabov [et al.] // 42th COSPAR Scientific Assembly. – 2018. – Paper № C5.1-0037-18.

A12. Возбуждение искусственной плазменной турбулентности на высотах внешней ионосферы (по данным искусственного спутника Земли SWARM) / А. О. Рябов [и др.] // Труды Тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». – 2018. – С. 118.

A13. Особенности генерации плазменных возмущений на высотах 450 – 500 км при работе стенда «Сура» / А. О. Рябов [и др.] // Труды II Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – 2018. – С. 309-314.

A14. Измерение искусственного плазменного возмущения с помощью ИСЗ SWARM / А. О. Рябов [и др.] // Труды V Всероссийской научно-технической

конференции «Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды». – 2018. – С. 781-786.

A15. Рябов, А. О. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 10. – С. 736-746.

A16. Рябов, А. О. Анализ взаимосвязи между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Труды конференции «Распространение радиоволн – 26». – 2019. – Том II. – С. 71-74.

A17. Рябов, А. О. Исследование взаимосвязи между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Труды конференции «Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике». – 2019. – С. 207-209.

A18. Рябов, А. О. Исследование связи между потенциалом ИСЗ и температурой электронов в ионосфере / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. – 2019. – С. 342-346.

A19. Рябов, А. О. Взаимосвязь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. – 2020. – С. 44-45.

A20. Lukianova, R. First SWARM observations of the artificial ionospheric plasma disturbances and field-aligned currents induced by the SURA power HF heating / R. Lukianova, V. Frolov, A. Ryabov // Geophysical Research Letters. – 2019. – Vol. 46. – № 22. – P. 12731-12738.

A21. Лукьянова, Р. Ю. Продольные токи и плазменные неоднородности, индуцированные высокочастотным нагревом стенда SURA, по наблюдениям спутников SWARM на высотах 400–500 км / Р. Ю. Лукьянова, В. Л. Фролов, А. О. Рябов // Труды Пятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». – 2020. – С. 90.

A22. Лукьянова, Р. Ю. Плазменные возмущения и токовые системы, индуцированные нагревом среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами / Р. Ю. Лукьянова, В. Л. Фролов, А. О. Рябов // Материалы Восемнадцатой всероссийской открытой конференции с международным участием «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2020. – С. 403.

A23. Спутниковые измерения плазменных возмущений и электрических токов, индуцируемых в среднеширотной ионосфере при её модификации мощными КВ радиоволнами / В. Л. Фролов [и др.] // Космические исследования. – 2021. – Т. 59. – № 4. – В печати.

A24. The electromagnetic emissions and plasma modulations at middle latitudes related to SURA-CSES experiments in 2018 / X. Zhang [et al.] // Radio Science. – 2020. – Vol. 55. – № 8.

A25. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными короткими радиоволнами / В. Л. Фролов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62. – № 9. – С. 641-663.

A26. Рябов, А.О. Высыпание энергичных электронов из радиационных поясов Земли, стимулированное работой стенда «Сура» (по данным ИСЗ DEMETER) / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Труды Тринадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе» – 2018. – С. 119.

A27. Ryabov, A. O. Energetic electron precipitation induced by the SURA facility / A. O. Ryabov, V. L. Frolov // 42th COSPAR Scientific Assembly. – 2018. – Paper № C5.1-0036-18.

A28. Фролов, В. Л. Высыпания энергичных электронов из внутреннего радиационного пояса Земли при модификации  $F_2$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами / В. Л. Фролов, А. О. Рябов // Труды Четырнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». – 2019. – С. 121.

A29. Рябов, А. О. Высыпания энергичных электронов при модификации ионосферы мощным радиоизлучением стенда «Сура» над возмущённой стеном областью / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Труды Пятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». – 2020. – С. 109.

A30. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли при модификации ионосферы мощным радиоизлучением стенда «Сура» / В. Л. Фролов [и др.] // Труды конференции «Распространение радиоволн – 26». – 2019. – Том II. – С. 96-99.

A31. Рябов, А. О. Искусственные высыпания электронов высоких энергий / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. – 2020. – С. 48-49.

A32. Рябов, А. О. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнитосопряженной относительно стенда «Сура» области ионосферы / А. О. Рябов, В. Л. Фролов, А. Д. Акчурин // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – № 4. – С. 285-296.

A33. Рябов, А. О. Высыпания электронов высоких энергий в магнитосопряженной относительно стенда «Сура» области ионосферы / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Труды Пятнадцатой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». – 2020. – С. 86.

A34. Рябов, А. О. Искусственные высыпания электронов высоких энергий в магнито-сопряженной области при стимуляции ионосферы Земли мощными КВ-радиоволнами стенда «СУРА» / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Труды конференции «Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике». – 2019. – С. 370-372.

A35. Рябов, А. О. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнито-сопряженной области при стимуляции ионосферы Земли мощными КВ радиоволнами стенда «Сура» / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Труды конференции «Распространение радиоволн – 26». – 2019. – Том II. – С. 75-78.

A36. Ryabov, A. O. Artificial precipitation of energetic electrons from the Earth's radiation belt / A. O. Ryabov, V. L. Frolov // Atmosphere, ionosphere, safety. Proceedings of VII International Conference. – 2020. – P. 73-76.

A37. Рябов, А. О. Высыпания электронов высоких энергий в магнитно-сопряженной области / А. О. Рябов, В. Л. Фролов // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. – 2020. – С. 46-47.

### **Список используемых источников**

1. Гинзбург, В. Л. Нелинейные явления в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле / В. Л. Гинзбург, А. В. Гуревич // УФН. – 1960. – Т.70. – С. 201-246.

2. Гуревич, А. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере / А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург. – М.: Наука, 1973. – 272 с.

3. Gurevich, A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere / A. V. Gurevich. – New York: Springer, 1978. – 372 p.

4. Виленский, И. М. Нелинейные явления при распространении радиоволн в ионосфере / И. М. Виленский, Н. А. Зыкова // Известие вузов. Радиофизика. – 1959. – Т.2. – С. 543.
5. Гинзбург, В. Л. К теории люксембург-горьковского аффекта / В. Л. Гинзбург // Известия АН СССР. Серия физ. – 1948. – Т. 12. – № 3. – С. 293-309.
6. Ratcliffe, J. A. A Study of the Interaction of Radio Waves / J. A. Ratcliffe, I. J. Shaw // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – Vol. 193. – № 1034. – P. 311-343.
7. Huxley, L. G. H. Measurements of the Interaction of Radio Waves in the Ionosphere / L. G. H. Huxley, H. G. Foster, C. C. Newton // Proc. Phys. Soc. – 1948. – Vol. 61. – № 2. – P. 134-146.
8. Hibberd, F. H. On the observation of ionospheric self-interaction / F. H. Hibberd // J. Atmos. Terr. Phys. – 1956. – Vol. 8. – № 2. – P. 120-122.
9. Гуревич, А. В. К вопросу о распространении сильных электро-магнитных волн в плазме / А. В. Гуревич // Радиотехника и электроника. – 1956. – Т. 1. – № 6. – С. 704-719.
10. Гуревич, А. В. Исследование нелинейных явлений при распространении мощного радиоимпульса в нижних слоях ионосферы / А. В. Гуревич, И. С. Шлюгер // Известия вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18. – № 9. – С. 1237-1260.
11. Шлюгер, И. С. Самомодуляция мощного электромагнитного импульса, отражённого от верхних слоев ионосферы / И. С. Шлюгер // Письма в ЖЭТФ. – 1974. – Т. 19. – Вып. 5. – С. 247-251.
12. Фролов, В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Монография / В. Л. Фролов. – Нижний Новгород: Издательство ННГУ, 2017. – 468 с.

13. Известия вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42. – №№ 7-8 (спец. выпуск).
14. Известия вузов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48. – № 9 (спец. выпуск).
15. Известия вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51. – № 11 (спец. выпуск).
16. Известия вузов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – №№ 1-2 (спец. выпуск).
17. J. Atmos. Terr. Phys. – 1982. – Vol. 44. – № 12 (special issue).
18. J. Atmos. Terr. Phys. – 1985. – Vol. 47. – № 12 (special issue).
19. J. Atmos. Terr. Phys. – 1997. – Vol. 59. – № 18 (special issue).
20. J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75. – № 31 (special issue).
21. Стенд "Сура": исследования атмосферы и космического пространства (обзор) / В. В. Беликович [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 545-576.
22. Гуревич, А. В. Нелинейные явления в ионосфере / А. В. Гуревич // УФН. – 2007. – Т. 177. – № 11. – С.1145-1177.
23. Искусственная ионосферная турбулентность (обзор) / Л. М. Ерухимов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30. – № 2. – С. 208-225.
24. Фролов, В. Л. Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением / В. Л. Фролов, Н. В. Бахметьева, В. В. Беликович. // УФН. – 2007. – Т. 177. – № 3. – С. 330-340.
25. Ютло, У. Изменение ионосферы под действием мощных радиоволн / У. Ютло, Р. Коэн // УФН. – 1973. – Т. 109. – № 2. – С. 371-373.
26. Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in Space / A. V. Streltsov [et al.] // Space Science Rev. – 2018. – Vol. 214. – No. 8.
27. Gurevich, A. V. Modern problems of ionospheric modification / A. V. Gurevich // Radiophys. and Quant. Electr. – 1999. – Vol. 42. – № 7. – P.525-532.

28. Stubbe, P. Review of ionospheric modification experiments at Tromsø / P. Stubbe // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – Vol. 58. – P. 349-368.
29. Space plasma exploration by active radar (SPEAR): An overview of a future radar facility / D. M. Wright [et al.] // *Ann. Geophys.* – 2000. – Vol. 18. – № 9. – P. 1248-1255.
30. Создание дуктов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным КВ-радиоизлучением / В. Л. Фролов [и др.] // *Письма в ЖЭТФ.* – 2008. – Т. 88. – Вып. 12. – С. 908-913.
31. Formation of artificial ionospheric ducts / G. M. Milikh [et al.] // *Geophysical Research Letters.* – 2008. – Vol. 35. – L17104.
32. Об особенностях механизма генерации искусственных ионосферных неоднородностей в области масштабов 50 – 200 м / И. А. Болотин [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2016. – Т. 59. – № 12. – С. 1087–1097.
33. First in-situ observations of strong ionospheric perturbations generated by a powerful VLF ground-based transmitter / M. Parrot [et al.] // *Geophysical Research Letters.* – 2007. – Vol. 34. – L11111.
34. Inan, U. S. Electron precipitation zones around major ground-based VLF signal sources / U. S. Inan, H. C. Chang, R. A. Helliwell // *J. Geophys. Res.* – 1984. – Vol. 89. – P. 2891-2906.
35. DEMETER observations of transmitter-induced precipitation of inner radiation belt electrons / K. Graf [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2009. – Vol. 114. – A07205.
36. DEMETER observations of ionospheric heating by powerful VLF transmitters / T. F. Bell [et al.] // *Geophysical Research Letters.* – 2011. – Vol. 38. – L11103.
37. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER / J. J. Berthelier [et al.] // *Planetary and Space Science.* – 2006. – Vol. 54. – № 5. – P. 487-501.

38. ICE, the electric field experiment on DEMETER / J. J. Berthelier [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 2006. – Vol. 54. – № 5. – P. 456-471.
39. The ISL Langmuir probe experiment processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results / J. P. Lebreton [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 2006. – Vol. 54. – № 5. – P. 472-486.
40. The magnetic field experiment IMSC and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results / M. Parrot [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 2006. – Vol. 54. – № 5. – P. 441-455.
41. High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt / J. A. Sauvaud [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 2006 (special issue). – Vol. 54, № 5. – P. 502-511.
42. Возмущения в КНЧ/ОНЧ-сигналах в верхней ионосфере над передатчиком HAARP, регистрируемые на спутнике DEMETER / Е. Е. Титова [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2015. – Т. 58. – № 3. – С. 167-186.
43. Шкляр, Д. Р. Особенности спектра естественных ОНЧ-излучений в приэкваториальной области верхней ионосферы по наблюдениям спутника DEMETER / Д. Р. Шкляр, Е. Е. Титова, М. Парро // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 2018. – Т. 58. – № 6. – С. 801-807.
44. Study of the lower hybrid resonance frequency over the regions of gathering earthquakes using DEMETER data / D. I. Vavilov [et al.] // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2013. – Т. 100-101. – С. 1-12.
45. Формирование ОНЧ каналов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы / В. В. Васьков [и др.] // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1993. – Т.33. – № 6. – С.91–97.
46. Возникновение плазменных шумов при воздействии мощной радиоволны на F-слой ионосферы по данным спутника АПЭКС / В. В. Васьков [и др.] // *Геомагнетизм и аэрномия*. – 1995. – Т. 35. – № 1. – С. 154-158.

47. Гдалевич, Г. Л. Процессы в ионосферной плазме, связанные с нагревом, возникновением электрического поля и ускорением частиц (по данным ИСЗ «Интеркосмос-24») / Г. Л. Гдалевич, З. Клос, Ю. М. Михайлов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2003. – Т. 43. – № 5. – С. 645-652.

48. Спутниковые исследования возмущений внешней ионосферы при воздействии мощных КВ-радиоволн на F-область ионосферы / В. М. Костин [и др.] // Космические исследования. – 1993. – Т. 31. – № 1. – С. 84-92.

49. Detection on the Intercosmos-24 satellite of VLF and ELF waves stimulated in the topside ionosphere by the heating facility Sura / V. V. Vas'kov, [et al.] // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 1998. – Vol. 60. – № 12. – P. 1261-1274.

50. Известия вузов. Радиофизика. – 1977. – Т. 20. – № 12.

51. J. Atmos. and Terr. Phys. – 1982. – Vol. 44. – № 12.

52. J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. – 1998. – Vol. 60. – № 12.

53. Васьков, В. В. Параметрическое возбуждение ленгмюровских колебаний в ионосфере в поле сильных радиоволн / В. В. Васьков, А. В. Гуревич // Известия вузов. Радиофизика. – 1973. – Т. 16. – № 2. – С. 188-198.

54. Perkins, F.W. Parametric instabilities and ionospheric modifications / F. W. Perkins, C. Oberman, E. J. Valeo // J. Geophys. Res. – 1974. – Vol. 79. – № 10. – P. 1478-1483.

55. К теории тепловой параметрической неустойчивости в неоднородной плазме / С. М. Грач [и др.] // Физика плазмы. – 1978. – Т. 4. – № 6. – С. 1321-1329.

56. Тепловая параметрическая неустойчивость в ионосферной плазме / С. М. Грач [и др.] // Тепловые нелинейные явления в плазме. — Горький: Издательство ИПФ АН СССР, 1979. – С. 46-80.

57. Васьков, В. В. Самофокусирующая и резонансная неустойчивости в F-области ионосферы / В. В. Васьков, А. В. Гуревич // Тепловые нелинейные явления в плазме. – Горький: Издательство ИПФ АН СССР, 1979. – С. 81-138.
58. Perkins, F. W. Thermal self-focusing of electromagnetic waves in plasmas / F. W. Perkins, E. J. Valeq // Phys. Rev. Lett. – 1974. – Vol. 32. – № 22. – P. 1234-1237.
59. The Swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and Swarm data products / N. Olsen [et al.] // Earth Planets Space. – 2013. – V. 65. – № 11. – P. 1189.
60. Independent validation of Swarm Level 2 magnetic field products and 'Quick Look' for Level 1b data / C. D. Beggan [et al.] // Earth Planets Space. – 2013. – Vol. 65. – № 11. – P. 1345-1353.
61. Wang, X. Ionosphere variations at 700 km altitude observed by the DEMETER satellite during the 29 March 2006 solar eclipse / X. Wang, J. J. Berthelier, J. P. Lebreton. // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – A11312.
62. Bupalov, P. A. Short-period VLF emissions as solitary envelope waves in a magnetospheric plasma maser / P. A. Bupalov, M. Parrot, J. Manninen // J. Atm. Sol. Terr. Phys. – 2010. – Vol. 72. – P. 1275-1281.
63. On the origin of lower- and upper-frequency cutoffs on wedge-like spectrograms observed by DEMETER in the midlatitude ionosphere / D. R. Shklyar [et al.] // J. Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – A05203.
64. Lehtinen, N. G. Full-wave modeling of transionospheric propagation of VLF waves / N. G. Lehtinen, U. S. Inan. // Geophysical Research Letters. – 2009. – Vol. 36. – L03104.
65. WN4 effect on longitudinal distribution of different ion species in the topside ionosphere at low latitudes by means of DEMETER / L. Bankov [et al.] // DMSP-F13 and DMSP-F15 data, Ann. Geophys. – 2009. – Vol. 27. – P. 2893-2902.

66. First simultaneous observations of daytime MSTIDs over North America using GPS-TEC and DEMETER satellite data / T. Onishi [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – Vol. 36. – L11808.

67. Survey of magnetospheric line radiation events observed by the DEMETER spacecraft / F. Nemeč [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2009. – Vol. 114. – A05203.

68. Transionospheric attenuation of 100 kHz radio waves inferred from satellite and ground based observations / M. Fullekrug [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – Vol. 36. – L06104.

69. Observation of Intensified Lower Hybrid Noise in the Midlatitude Ionosphere / M. Parrot [et al.] // *IEEE Trans. on Plasma Science*. – 2008. – Vol. 36 (4-1). – P. 1164-1165.

70. Radiation belt electron precipitation into the atmosphere: Recovery from a geomagnetic storm / C. J. Rodger [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2007. – Vol. 112. – A11307.

71. Некоторые результаты измерения характеристик электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере мощным КВ-радиоизлучением стенда СУРА / В. О. Рапопорт [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2007. – Т. 50. – № 8. – С. 709-721.

72. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F<sub>2</sub>-области мощным КВ радиоизлучением стенда СУРА / В. Л. Фролов [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2016. – Т. 59. – № 3. – С. 198-222.

73. A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating / G. M. Milikh [et al.] // *Geophysical Research Letters*. – 2012. – Vol. 39. – L10102.

74. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP / A. Vartanyan [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2012. – Vol. 117. – A10307.

75. Ionospheric electron heating, optical emissions, and striations induced by powerful HF radio waves at high latitudes: Aspect angle dependence / M. T. Rietveld [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2003. – Vol. 108. – № A4. – P. 1141.

76. The Structure of Electromagnetic Wave-Induced 557.7-nm Emission Associated with a Sporadic-E Event over Arecibo / L. M. Kagan [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – Vol. 85. – № 1. – P. 218-221.

77. Leyser, T. B. Stimulated electromagnetic emissions by high frequency electromagnetic pumping of the ionospheric plasma / T. B. Leyser // *Space Sci. Rev.* – 2001. – Vol. 98. – P. 223–328.

78. Study of large-scale irregularities generated in the ionospheric F region by high-power HF waves / V. L. Frolov [et al.] // *Radiophys. Quantum Electron.* – 2000. – Vol. 43. – № 6. – P. 446-468.

79. Особенности возбуждения крупномасштабных неоднородностей концентрации плазмы при модификации области F<sub>2</sub> ионосферы мощными короткими радиоволнами / В. Л. Фролов [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2015. – Т. 58. – № 10. – С. 797.

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

81. Quasistatic electric field measurements with spherical double probes on the GEOS and ISEE satellites / A. Pedersen [et al.] // *Space Sci. Rev.* – 1984. – V. 37. – P. 269–312.

82. Density in the magnetosphere inferred from ISEE-1 spacecraft potential / C. P. Escoubet [et al.] // *JGR.* – 1997. – V. 102. – P. 17595–17609.

83. Измерения электрического потенциала спутника ИНТЕРБОЛ-2 относительно плазмы и основанное на нем определение концентрации электронов

/ К. Торкар [и др.] // Космические исследования. –1999. – Т. 37. – № 6. – С. 644–653.

84. Альперт, Я.Л. Искусственные спутники в разряженной плазме / Я. Л. Альперт, А. В. Гуревич, Л. П. Питаевский. – М.: Наука, 1964. – 382 с.

85. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility / V. O. Raroport [et al.] // Geophys. Res. – 2010. – Vol. 115. – A10322.

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

87. Брюнелли, Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 526 с.

88. Kelley, M. C. The Earth' Ionosphere / M. C. Kelly. – San Diego: Academic Press, 1989. – 487 p.

89. Гуревич, А. В. Движение и расплывания неоднородностей в плазме / А. В. Гуревич, Е. Е. Цедилина // УФН. – 1967. – Т. 91, 4. – С. 609-643.

90. Рожанский, В. А. Столкновительный перенос в частично ионизированной плазме / В. А. Рожанский, Л. Д. Цендин. – М.: Энергоиздат, 1988. – 245 с.

91. First observation of the anomalous electric field in the topside ionosphere by ionospheric modification over EISCAT / M. J. Kosch [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2014. – V. 41 (21). – P. 7427-7435.

92. Contracting O/X-mode heater effects on O-mode sounding echo and the generation of magnetic pulsations / S. Kuo [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2010. – V. 37. – L01101.

93. Исследование пространственной динамики нагрева и термодиффузии плазмы / Г. Ю. Голубятников [и др.] // Физика плазмы. – 1988. – Т. 14. – № 4. – С. 482-486.

94. Laboratory study of interaction of magnetoplasma irregularities produced by several radio-frequency heating sources / N. Aidakina [et al.] // *Physics of Plasmas*. – 2018. – V. 25. – № 7. – 072114.

95. Белов, А. С. Исследование пространственной структуры и динамика развития возмущений околоземной плазмы при воздействии мощного коротковолнового радиоизлучения / А. С. Белов // *ЖЭТФ*. – 2015. – Т. 148. – № 4. – С. 758-765.

96. Фролов, В. Л. Исследование процессов переноса в верхней ионосфере Земли с помощью искусственной ионосферной турбулентности, создаваемой пучком мощных КВ радиоволн / В. Л. Фролов, Е. Н. Сергеев, П. Штуббе // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2002. – Т. 45. – № 2. – С. 121-143.

97. Об эффектах, наблюдаемых при воздействии мощными короткими радиоимпульсами на верхнюю ионосферу Земли / В. Л. Фролов [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2006. – Т. 49. – № 8. – С. 643-663.

98. Гельберг, М. Г. Образование мелкомасштабных неоднородностей в верхней ионосфере высоких широт / М. Г. Гельберг // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 1984. – Т. 24. – № 6. – С. 911-915.

99. Мишин, Е. В. Плазменные эффекты сверхтепловых электронов в ионосфере / Е. В. Мишин, А. А. Трухан, Г. В. Хазанов. – М.: Наука, 1990 – 116 с.

100. Генерация искусственных ионосферных неоднородностей на высотах 130 – 170 км / В. Л. Фролов [и др.] // *XXII Всероссийская конференция по распространению радиоволн*. – 2008. – Т. II. – С. 134-137.

101. Черногор, Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе / Л. Ф. Черногор. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2014. – 541 с.

102. Аперидические крупномасштабные возмущения в E-области ионосферы, стимулированные мощным радиоизлучением / Л. Ф. Черногор [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2012. – Т. 55. – № 3. – С. 173-185.

103. Черногор, Л. Ф. Эффекты воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу на фоне умеренных геокосмических бурь: результаты наблюдений с помощью ионозондов / Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. В. Барабаш // Вестник ПГТУ: Телекоммуникации и радиотехника. – 2016. – № 2 (30). – С. 6-27.

104. Возбуждение магнитосферного мазера воздействием на ионосферу Земли мощным КВ-радиоизлучением наземного передатчика / Г. А. Марков [и др.] // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138. – Вып. 6. – С. 1037-1042.

105. Благовещенская, Н. Ф. Геофизические эффекты активных воздействий в околоземном космическом пространстве / Н. Ф. Благовещенская. – СПб: Гидрометеиздат, 2002. – 287 с.

106. Controlled precipitation of radiation belt electrons / U. S. Inan [et al.] // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108. № A5. – P. 1186.

107. Лаштовичка, Я. Высыпание жёстких электронов ( $E = 20 - 150$  кэВ) на средних широтах / Я. Лаштовичка // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – Т. 20. – № 5. – С. 999-1010.

108. Ковтюх, А. С. Радиационные пояса Земли / А. С. Ковтюх, М. И. Панасюк // Плазменная гелиогеофизика. – М.: Физматлит, 2008. – Т. 1. – С. 510-534.

109. Фролов, В. Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при её модификации мощными КВ радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований / В. Л. Фролов // Солнечно-земная физика. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 22-45.

110. DEMETER observations of ELF waves injected with the HAARP HF transmitter / M. Platino [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2006. – Vol. 33. – L16101.

111. Гальперин, Ю. И. Некоторые алгоритмы расчета справочной геофизической информации вдоль орбит околоземных спутников.

Программа-справочник КАДР-2. Препринт / Ю. И. Гальперин, Ю. Н. Пономарев, В. М. Синицин. – М.: ИКИ АН, 1980.

112. Cole, K. D. Airglow and the South Atlantic Geomagnetic Anomaly / K. D. Cole // *Journal of Geophysical Research*. – 1961. – Vol. 66. – № 9. – P. 3064-3064.

113. Discovery of radiation anomalies above the South Atlantic at heights of 310-340 km / L. V. Kurnosova [et al.] // *Planetary and Space Science*. – 1962. – Vol. 9. – P. 513-516.

114. Torr, D. G. Particle precipitation in the South Atlantic geomagnetic anomaly / D. G. Torr, M. R. Torr, J. C. G. Walker // *Planetary and Space Science*. – 1975. – Vol. 23. – № 1. – P. 15-26.

115. Observations in the South Atlantic geomagnetic anomaly with intercosmos-Bulgaria-1300 during a geomagnetic storm / M. M. Gogoshev [et al.] // *Advances in Space Research*. – 1985. – Vol. 5. – № 4. – P. 213-216.

116. The South Atlantic Magnetic Anomaly – Three decades of research / O. Pinto [et al.] // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1992. – Vol. 54. – № 9. – P. 1129-1134.

117. Utlaut, W. F. A summary of vertical incidence radio observations of ionospheric modification / W. F. Utlaut, E. J. Violette // *Radio Science*. – 1974. – Vol. 9. – № 11. – P. 895-903.

118. Беспалов, П. А. Альфвеновские мазеры / П. А. Беспалов, В. Ю. Трахтенгерц. – Горький: ИПФ РАН, 1986. – 190 с.

119. Генерация электромагнитных сигналов комбинационных частот в ионосфере / П. П. Беляев [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. – 1987. – Т. 30. – № 2. – С. 248-267.

120. Generation of whistler waves by continuous HF heating of the upper ionosphere / A. Vartanyan [et al.] // *Radio Science*. – 2016. – Vol. 51. – P. 1188-1198.

121. Eliasson B. Numerical study of mode conversion between lower hybrid and whistler waves on short-scale density striations / B. Eliasson, K. Papandopoulos // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113. – A09315.

122. Borisov N. D. Transformation of VLF electrostatic waves into whistlers under the action of strong HF radio waves / N. D. Borisov // Physics Letters A. – 1995. – Vol. 206. – № 3-4. – P. 240-246.