

35. РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ БОРТОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ТГК "ПРОГРЕСС":

АЛГОРИТМЫ, ИНСТРУМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ.

**Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П., Медведев А.В., Кушнарев Д.С.,
Шпынев Б.Г., Заруднев В.Е., Алсаткин С.С., Ратовский К.Г., Подлесный А.В.,
Брынько И.Г.**

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, г. Иркутск

Аннотация. В 2007-10 г.г. проведены активные космические эксперименты с участием ТГК "Прогресс" и наземного комплекса радиофизических инструментов ИСЗФ СО РАН (г.Иркутск). Выхлопные струи бортовых двигателей ТГК вызывали ионосферные возмущения и изменяли радиолокационный портрет корабля. Менялись геофизические условия, направление выхлопных струй, продолжительность работы двигателей и, соответственно, количество выработанного топлива. Были разработаны радиофизические методы диагностики ионосферных возмущений. Проведено исследование пространственно-временных параметров возмущений. Результаты исследований показали, что в ионосфере образуется область с существенно пониженной электронной концентрацией (от 20 до 40 %). Среднее время жизни этой области 15-20 минут.

КОСМИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «ПЛАЗМА-ПРОГРЕСС»

В настоящее время околоземное космическое пространство (ОКП) все чаще используют как огромную естественную лабораторию, в которой с помощью ракет, спутников, орбитальных станций и естественных космических тел проводится детальное исследование природных геофизических явлений, а также изучение плазмы в условиях, не доступных для земных лабораторных экспериментов. В пионерских космических экспериментах (КЭ) проводились прямые измерения геофизических параметров. Они дали важные знания о структуре ОКП. Важную роль играют активные КЭ. Для изучения некоторых геофизических явлений, например, образование, эволюция и динамика мелко- и средне- масштабных неоднородностей в ионосфере, можно использовать контролируемое воздействие на космическую плазму, создаваемое двигательными установками (ДУ) космических аппаратов (КА). Т.е. создать условия, подобные природным. Такие КЭ открывают большие возможности в имитации и инициировании природных явлений, возникающих при различных геомагнитных возмущениях, а также в диагностике околоземной плазмы.

Искусственные плазменные образования являются своеобразным зондом, с помощью которого можно исследовать такие основные характеристики околоземного космического пространства, как магнитные и электрические поля, плотность и температура ионосферной плазмы, ее волновые свойства, поведение в возмущенных условиях [1]. Эта область космических исследований бурно прогрессирует, что объясняется, прежде всего, появлением новых экспериментальных возможностей, связанных с развитием, как космической техники, так и экспериментальных методов исследования ионосферной плазмы. Каждый запуск американских ракет сопровождается включением большого числа измерительной и наблюдательной аппаратуры. Хорошо известны результаты исследований отклика ионосферы на эти запуски. Но это очень мощное воздействие на ионосферу, естественные аналоги которых в ионосфере крайне редки, и отклик ионосферы хорошо измеряем и изучен.

Исследование искусственных ионосферных возмущений, связанных с выхлопными газами от работы бортовых ДУ, являлись целью многих экспериментов, выполненных с привлечением космического корабля Space Shuttle и радаров некогерентного рассеяния (РНР) [2-7]. Решались три основные задачи: 1) технология струи; 2) ионосферное взаимодействие; 3) проверка ионосферных моделей. Количество выбрасываемых продуктов сгорания составляло от 87 кг в эксперименте над РНР Jicamarca [3] и до 830 кг над РНР Millstone-Hill [4], что приводило к образованию больших областей в ионосфере с пониженной концентрацией существовавшими от часа и более.

В программу исследований, проводимых ФГУП ЦНИИМаш Роскосмоса, включен КЭ "Исследование наземными средствами наблюдения отражательных характеристик плазменного окружения транспортно-грузового корабля (ТГК) серии "Прогресс" в радио и оптическом диапазонах при работе бортовых двигателей" (КЭ "Плазма-Прогресс"). Источниками неоднородностей являются инжестируемые в ионосферу выхлопные струи ДУ ТГК "Прогресс". Включались 8 двигателей причаливания и ориентации (ДПО), инжестируя 40 г/с продуктов сгорания, или один сближающе-корректирующий двигатель (СКД) (1 кг/с). Для исследования ионосферных эффектов привлечен широкий набор наземных радиофизических средств наблюдений ИСЗФ СО РАН: Иркутский РНР; двухпозиционный ЛЧМ ионозонд; однопозиционный ЛЧМ ионозонд; ионозонд DPS-4; УКВ приемник.

Отличительной особенностью КЭ «Плазма-Прогресс» является слабое воздействие (от 2 до 11 кг выбрасываемого вещества) на ионосферу. Именно такие

возмущения, образующиеся в ионосфере, наиболее близки к природным, естественным. Поэтому изучение процессов образования, эволюции, динамических характеристик таких искусственно создаваемых возмущений в нужном месте и нужное время крайне важно.

ИЗМЕРЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Основным измерительным средством в КЭ "Плазма-Прогресс" является Иркутский РНР [8,9], на котором мониторинг ионосферных параметров методом некогерентного рассеяния (НР) можно проводить одновременно с радиолокацией КА. Метод НР является наиболее информативным методом изучения ионосферной плазмы и позволяет измерять следующие параметры ионосферной плазмы: высотный профиль электронной концентрации N_e , температуру ионов и электронов, скорости дрейфа плазмы, ионный состав. Иркутский РНР представляет собой моностатическую, импульсную РЛС с частотным сканированием. Отличие от других РНР в конструкции антенны, представляющей собой рупор с размерами апертуры 246x12,2 м (Рис.1), разделенный перегородкой на два симметричных полурупора. Поляризационный фильтр подавляет на 30 дБ поперечную к большой оси рупора компоненту E : излучаются и принимаются сигналы линейной поляризации.

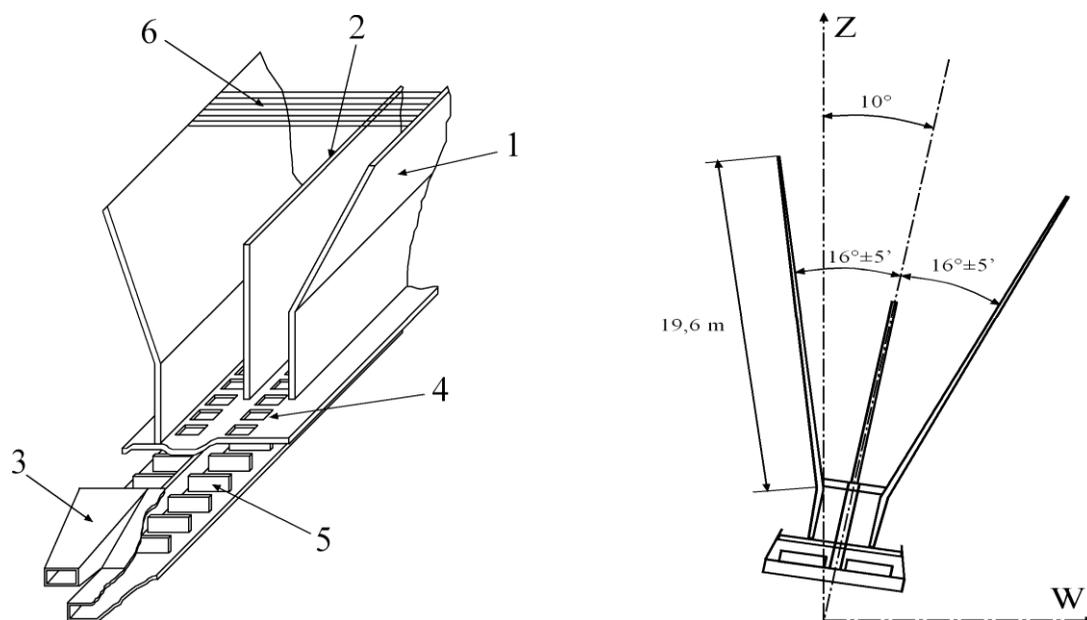


Рис.1. Структура антенны: 1 - рупор; 2 - перегородка; 3 - возбуждение; 4 - волноводно-щелевая система; 5 - замедляющая структура; 6 - поляризационный фильтр

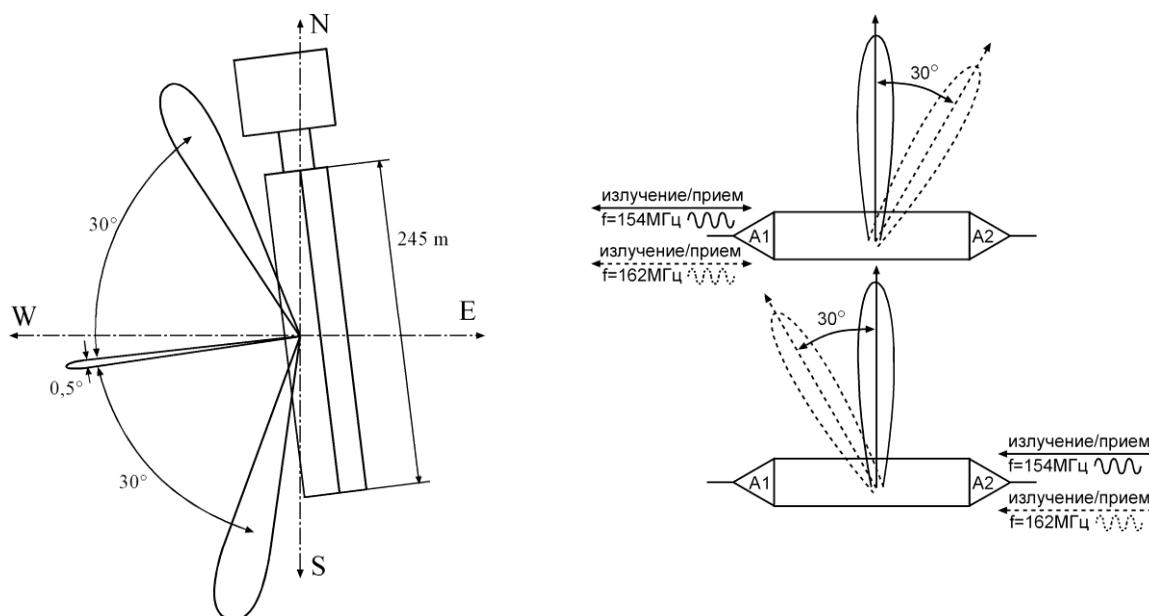


Рис.2. ДН Иркутского РНР

Ширина ДН антенны вдоль большой оси около $0,5^\circ$. На частоте 154 МГц направление основного излучения по нормали к плоскости раскрыва рупора. Изменение частоты от 154 до 162 МГц приводит к отклонению ДН на $\pm 30^\circ$ (Рис.2). В поперечной плоскости ДН каждого из полурупоров имеет ширину $\sim 20^\circ$. Суммарная ДН формируется путем сложения ДН полурупоров и имеет ширину $\sim 10^\circ$.

В период 2003-06 гг. на РНР проведена глобальная модернизация. Основной задачей модернизации стало обеспечение следующих возможностей:

1. Измерение параметров ионосферной плазмы одновременно в нескольких направлениях для исследования её пространственной структуры.
2. Одновременные измерения мощных радиолокационных (РЛ) сигналов от КА или когерентного эха на фоне слабых сигналов НР.
3. Управление формой ДН и проведение интерферометрических измерений.
4. Автоматическое определение наличия на РЛ развертке когерентных сигналов.
5. Повышение пространственного разрешения и расширения высотного диапазона
6. Регистрация на электронные носители всего объема первичной информации.
7. Регистрация формы зондирующего импульса.
8. Обработка большого массива данных в реальном масштабе времени.

Эти новые возможности позволили реализовать поставленные перед Иркутским РНР задачи КЭ "Плазма-Прогресс" в полном объеме: проведены измерения ионосферных параметров и РЛ сигналов ТГК до, во время и после работы бортовых ДУ.

Ионосферные измерения являются основным режимом работы Иркутского РНР. Последовательно излучаются два импульса: узкополосный прямоугольный длительностью 750 мкс и широкополосный фазоманипулированный (11-ти элементный код Баркера) длительностью 150 мкс. Принятые узкополосные сигналы НР подвергаются спектральной и корреляционной обработкам, широкополосные сигналы НР используются в расчетах высотных профилей электронной концентрации.

Радиолокация ТГК проводилась на сетке из 5 рабочих частот, в ДН которых пролетает ТГК. ДН соседних частот перекрываются. Частоты выбирались заблаговременно по рассчитанным ЦММ ЦУП орбитам ТГК "Прогресс".

За 2 часа до пролета ТГК в ДН радара режим ионосферных измерений переключался на выбранную сетку рабочих частот. Сессии КЭ проводились в условиях низкой солнечной активности и, как следствие, низкой фоновой концентрации электронов и низкого отношения сигнал/шум. К тому же пролеты ТГК, большей частью, проходили в условиях ночной ионосферы и суточного минимума электронной концентрации. Чтобы добиться приемлемого статистического усреднения данных, получаемых методом НР в сложившихся условиях, проводилось 8-10 минутное накопление НР сигнала, что соответствовало накоплению 4000-6000 реализаций. Отдельные реализации НР сигнала представляют собой случайный процесс. Для того чтобы оценить ионосферные параметры, НР сигнал усредняется по нескольким тысячам реализаций, в предположении, что за время усреднения процессы в ионосфере стационарные.

В [2, 3] предложены механизмы взаимодействия выхлопных струй ДУ с ионосферой. Выделено два основных механизма воздействия продуктов горения на ионосферную плазму: 1) создание локальной области возмущения с нестандартным для ионосферы химическим составом; 2) изменение химического состава и концентрации плазмы вследствие реакции с продуктами горения. Первый механизм является короткоживущим порядка десятков секунд и при использованном на РНР времени накопления не может быть исследован. Второй механизм оказывает более продолжительное воздействие на состояние плазмы и, поэтому, рассмотрен подробно.

Основной причиной изменения состояния ионосферной плазмы при работе ДУ является создание очагов рекомбинации, которые в большом пространственном объеме создают зону пониженной концентрации электронов. Молекулы H_2O , CO_2 и H_2 , содержащиеся в выхлопной струе, имеют в 100-1000 раз более высокую скорость реакции с ионами кислорода O^+ [3], чем естественные для ионосферы тяжелые ионы N_2 и O_2 . Поскольку основным продуктом выбросов являются пары H_2O , а основной компонентой ионосферной плазмы на данных высотах является атомарный кислород, то наиболее значимыми химическими реакциями будут: обмен $H_2O + O^+ \rightarrow H_2O^+ + O$ (1) и диссоциативная рекомбинация $H_2O^+ + e^- \rightarrow OH + H$ (2). Аналогичные реакции и для CO_2 и H_2 . В результате этих реакций в ионосферной плазме образуется область пониженной концентрации, своеобразная «дыра», которая увеличивается по мере распространения продуктов выброса. При этом расширении важным является присутствие геомагнитного поля, поскольку после реакции типа (1) заметное время могут существовать ионы H_2O^+ , OH^+ и H_3O^+ , которые становятся замагниченными и направление их движения при первичном расширении области выброса контролируется магнитным полем. Расширение области выброса происходит не только вдоль направления выброса, но и вдоль линий геомагнитного поля до тех пор, пока не произойдет реакция типа (2). При определении формы «дыры» необходимо учитывать, что для временных интервалов менее минуты будет существовать дополнительная компонента скорости струи вдоль магнитного поля.

Получившаяся в результате указанных реакций «дыра» электронной концентрации будет заполняться плазмой из соседних областей. Однако, поскольку плазма является замагниченной, то заполнение будет происходить только вдоль магнитной силовой трубки. Магнитная силовая трубка на широте Иркутска наклонена на величину порядка 15° к экватору от вертикали. В ночных условиях на средних широтах фотоионизация отсутствует и приток плазмы происходит в основном за счет магнитосферного резервуара с некоторой равновесной скоростью. Когда происходит выброс продуктов горения и образование области пониженной ионизации, равновесное состояние нарушается и должно наблюдаться усиление притока плазмы в «дыру» как сверху, так и снизу, вдоль линий геомагнитного поля. Поскольку внизу отсутствуют источники ионизации, ниже области выброса также должно наблюдаться общее понижение N_e , которое отразится на всех высотах ниже «дыры». Выше области

выброса произойдет усиление падающего потока термосферной плазмы, который будет длиться вплоть до полного заполнения «дыры» и восстановления области пониженной ионизации в нижней ионосфере до равновесного состояния.

На Рис.3 представлен наиболее представительный результат измерений $N_e(h)$ до (штриховая) и после (красная, желтая, зеленая и черная линии) пролета ТГК 20.09.2007 г. Время работы СКД 20:39:53–58 (UT), масса инжектированных газов 5 кг. Направление выхлопных струй на РНР. После работы СКД образовалась "дыра" с пониженной до 40% электронной концентрацией с границами по высоте от 300 до 340 км (красная линия). В течение 10-15 минут (те же значения, что в [2,3]) происходило затекание в "дыру" электронов из соседних областей так, что N_e превысило до пролетную концентрацию.

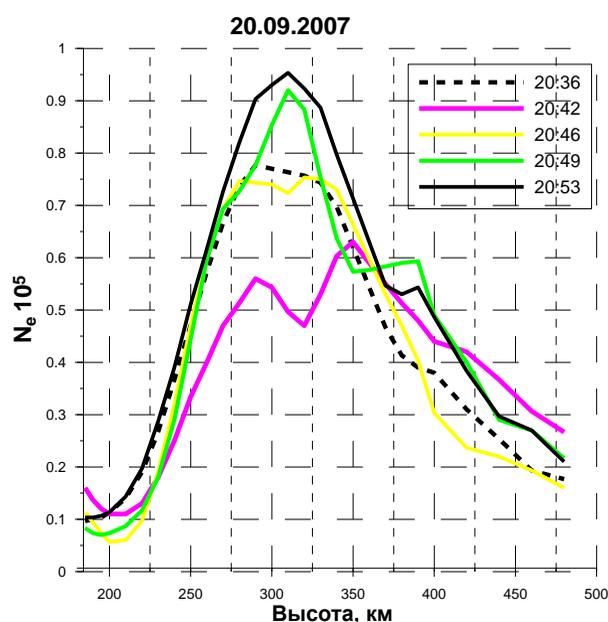


Рис.3. Динамика профиля электронной концентрации $N_e(h)$

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ИРКУТСКОМ РНР

РЛ измерения проводятся в режиме циклического частотного сканирования, соответствующего равномерному смещению ДН. РЛ измерения начинались за 30 сек. до входа ТГК в сектор сканирования РНР и заканчивались через 30 сек. после выхода. Регистрируется полная форма РЛ сигнала и измеряются траекторные параметры: дальность до КА R ; лучевая скорость V , азимутальный угол ε , угол места γ и амплитуда μ РЛ сигнала [9].

На Рис. 4 и 5 представлены результаты измерений во время включения СКД продолжительностью 5,1 с. и направлением выхлопных струй на РНР 20 и 22.09.2007 г., соответственно. На левых панелях представлены динамика амплитуд РЛ сигналов ТГК измеренных двумя полурупорами антенны (Рис.1) на двух частотах, что соответствует разным направлениям ДН (первое и второе направления). ДН разнесены в пространстве с частичным перекрытием и из рисунков видно, что ТГК пролетает из одной ДН в другую. На правых панелях представлены поведение радиальных скоростей и антенного угла места ТГК.

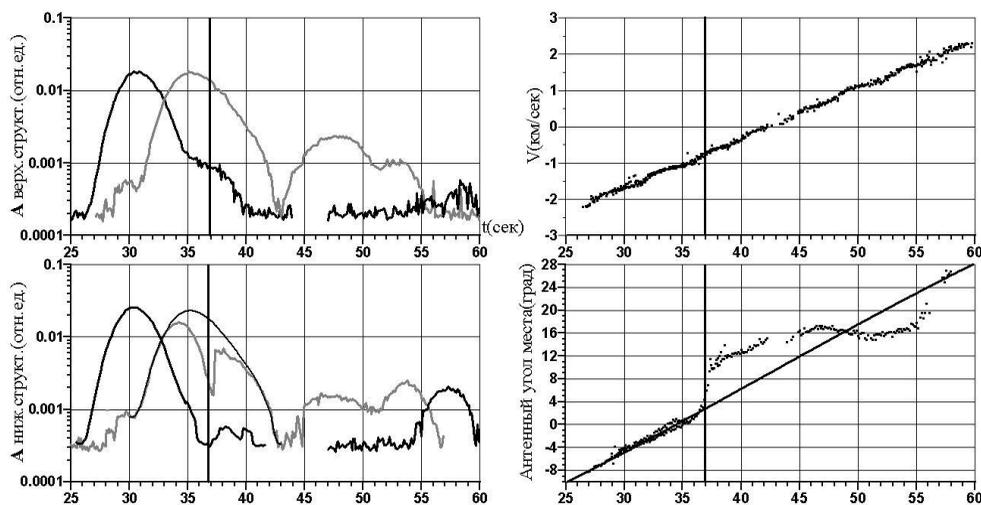


Рис. 4. Результаты измерений 20.09.2007 г. Момент включения СКД 37-ая секунда.

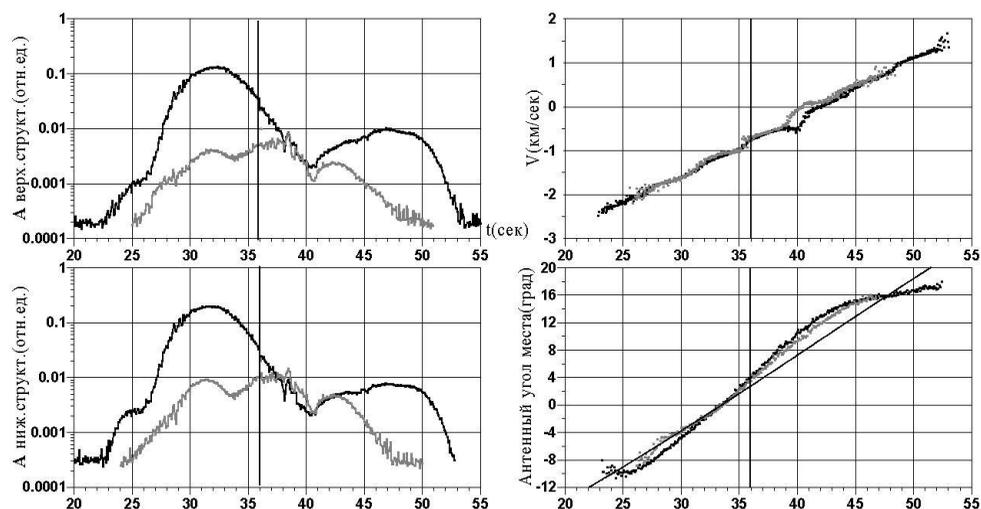


Рис. 5. Результаты измерений 22.09.2007 г. Момент включения СКД 36-ая секунда.

Следствием включения СКД 20.09.2007 г. является отличия в динамиках амплитуд РЛ сигналов в полурупорах. Поведение амплитуды РЛ сигналов второго направления в одном из полурупоров (серая линия на нижнем графике левой панели Рис.4) сильно отличается от расчетного (темная тонкая линия). Вторым эффектом является изменение в поведении динамики разности фаз между РЛ сигналами в

полурупорах и, как следствие, антенного угла места. После включения СКД фаза резко меняет свое поведение и наблюдается колебательный характер около расчетного поведения (прямая линия). Такие эффекты возможны при интерференции РЛ сигналов от двух целей, если они разнесены не только по дальности, но и по антенному углу места. При этом эффективная площадь рассеяния (ЭПР) появившейся цели должна быть не меньше 0.1 от ЭПР ТКК. Дополнительно к вышеописанным эффектам включения СКД 22.09.2007 г. было зарегистрировано, что в течение 4 сек. наблюдалось (нижний график на правой панели Рис. 5) расхождение лучевых скоростей (на 0.5 км/с), полученных с разных направлений ДН, разнесенных на 0.5° .

На Рис. 6 представлены результаты РЛ измерений 26.04.2010 г. Следствиями включения СКД являются асимметрия в динамиках амплитуд РЛ сигналов в полурупорах (средняя частота) и изменение в динамике разности фаз.

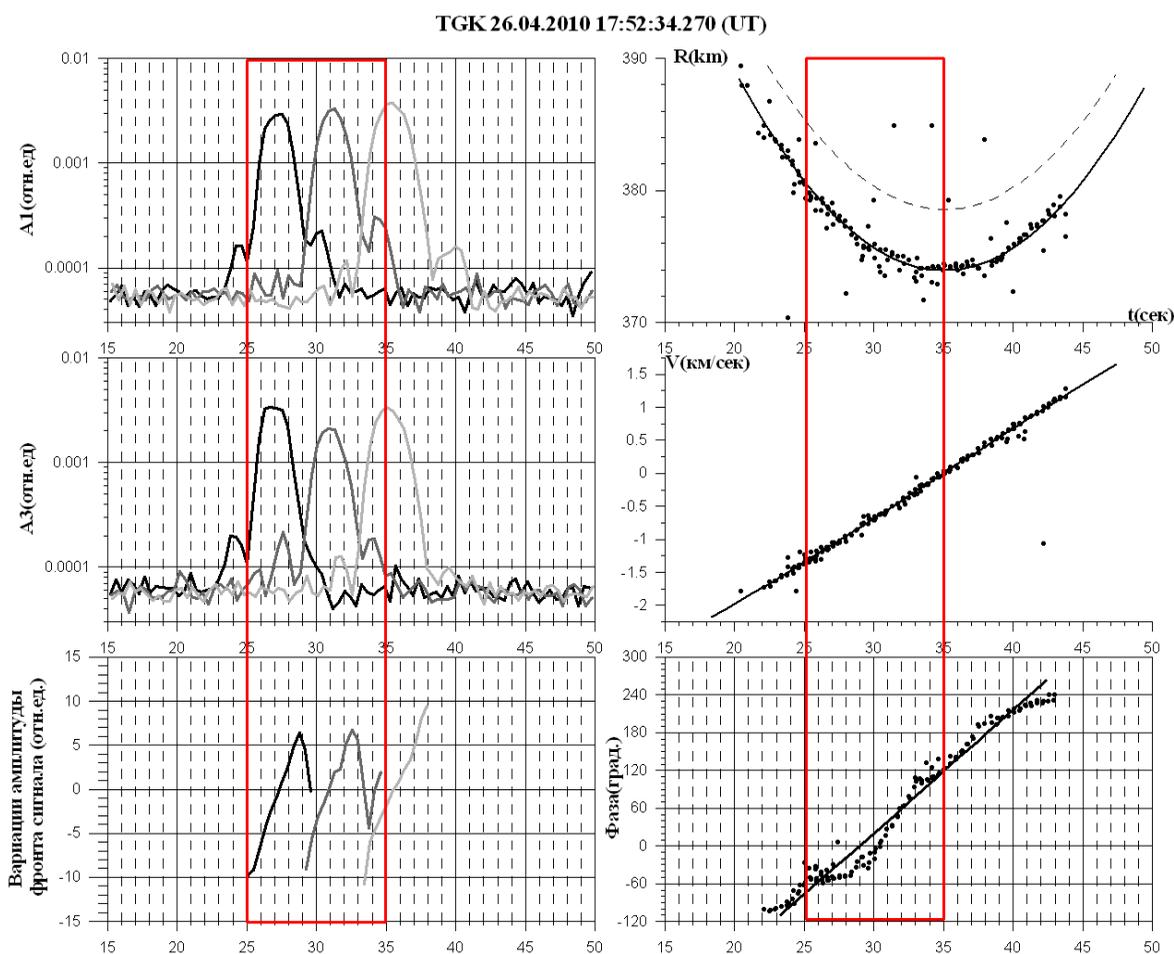


Рис. 6. Результаты измерений 26.04.2010 г. Момент включения СКД 25-ая секунда.

Результаты анализа РЛ измерений показали, что влияние работы ДУ проявляется в изменениях от расчетных поведений: амплитуды РЛ сигнала и, как следствие, ЭПР, радиальной составляющей скорости и антенного угла места ТГК. Наиболее

чувствительным параметром является антенный угол места. Наиболее заметны изменения анализируемых параметров при испускании выхлопных струй ДУ в направлении на РНР.

ИОНОСФЕРНЫЙ МОНИТОРИНГ ЦИФРОВЫМ ИОНОЗОНДОМ

В качестве дополнительного радиофизического средства измерения возмущений параметров ионосферной плазмы был привлечен цифровой ионозонд вертикального зондирования (ВЗ) DPS-4 [8] расположенный непосредственно в ИСЗФ СО РАН.

Основным назначением ионозонда ВЗ является регистрация ионограмм с целью расчета профиля электронной концентрации, а также получения других ионосферных параметров. Ионограмма представляет собой высотно-частотную матрицу амплитуд отраженных ионосферой сигналов, т.е. растровое изображение результата одного сеанса работы ионозонда при ВЗ ионосферы. След на ионограмме позволяет получить зависимость кажущейся высоты отраженного ионосферой сигнала от частоты зондирования или, другими словами, высотно-частотную характеристику (ВЧХ) ионосферного радиоканала. На основе полученной ВЧХ осуществляется восстановления высотного профиля электронной концентрации [9]. Профиль может быть рассчитан в высотном диапазоне от ~90 км до высоты максимума электронной концентрации.

Ионозонд DPS-4 также имеет возможность регистрации доплеровских спектров отраженного ионосферой сигнала на 4-х разнесенных приемных антеннах. Регистрация доплеровского спектра дает возможность измерения доплеровского сдвига частоты (ДСЧ). Измерения на разнесенных приемных антеннах позволяют получать углы прихода отраженных ионосферой волн с помощью фазоразностного метода. Достоинствами доплеровских и угловых измерений являются: высокое временное разрешение по сравнению с методом анализа ионограмм, чувствительность к возмущениям малой интенсивности и возможность оценки смещения области отражения от зенитного положения.

Для обнаружения ионосферных возмущений, вызванных работой ДУ ТГК “Прогресс”, применялось три метода анализа данных.

1. Анализ угловых измерений с целью выявления смещения области отражения от зенитного положения во время и после работы ДУ.

2. Анализ временной динамики максимума электронной концентрации до и после включения ДУ с целью выявления возмущений этого параметра.

3. Анализ ионограмм ВЗ с целью выявления аномальных отражений на ионограммах во время и после работы ДУ.

К сожалению, ионозонд DPS-4 не имеет возможности одновременной регистрации ионограмм и доплеровских спектров. Поэтому во время наблюдений ионозонд работал либо в режиме учащенной регистрации ионограмм (каждые 3 минуты), либо в режиме регистрации доплеровских спектров.

Режим регистрации доплеровских спектров применялся в сентябре 2007 и 2008 г. Для визуализации угловых измерений использовался метод «светящихся точек», иллюстрирующий смещения области отражения от зенитного положения. Координаты «светящихся точек» в XU -плоскости рассчитывались по результатам измерений углов прихода и действующей высоты H_d : $x = H_d \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi$, $y = H_d \cdot \sin\theta \cdot \sin\varphi$, где θ – угол места; φ – азимутальный угол прихода отраженной радиоволны; ось X направлена на север; U – на восток; начало координат соответствует зенитному положению области отражения. На Рис. 7 показаны «светящиеся точки», полученные 20 сентября 2007 г. на временном интервале 20:21:41-20:50:38 UT до (белые кружки) и после (черные кружки) включения ДУ. Траектория ТГК «Прогресс» во время работы ДУ показана толстой сплошной линией. До момента включения двигателей «светящиеся точки» ориентированы вдоль направления север-юг, что является типичным для ионосферных неоднородностей естественного происхождения. Согласно многочисленным экспериментальным данным, такие неоднородности представляют собой перемещающиеся ионосферные возмущения аврорального происхождения. Эти возмущения распространяются с севера на юг, градиент возмущения максимален вдоль направления распространения, что приводит к смещениям области отражения вдоль оси север-юг. После включения ДУ «светящиеся точки» наблюдаются в юго-западном секторе, т.е. в том же секторе, где проходит орбита ТГК. Этот эффект может объясняться отражением от неоднородностей, сгенерированных работой ДУ. Следует отметить, что сектор разброса «светящихся точек» существенно шире сектора траектории ТГК. Это может быть связано с интерференцией возмущений, сгенерированных работой ДУ и возмущениями естественного происхождения. К сожалению, в некоторых наблюдениях в ионосфере над Иркутском присутствовал спорадический E-слой, который экранировал отражения от F-области ионосферы.

Подводя итоги можно отметить, что в ряде наблюдений метод «светящихся точек» показывает смещения области отражения от зенитного положения в сектор, где проходит траектория ТГК с включенными ДУ. Однако метод дает возможность только качественного анализа.

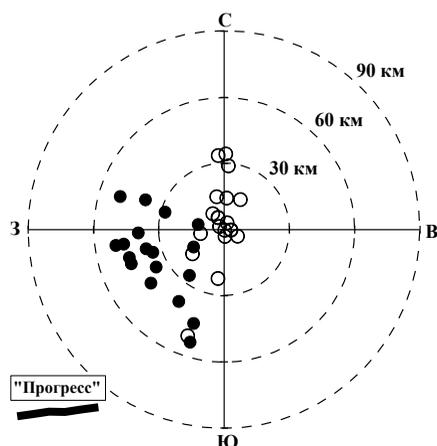


Рис. 7. Области отражений до включения ДУ (белые кружки) и после (черные кружки)

Для объективизации исследований была разработана специальная методика, основанная на анализе временной динамики максимума электронной концентрации до и после включения ДУ в режиме учащенной регистрации ионограмм. Основным стимулом к исследованию временной динамики ионосферных характеристик являлись результаты, полученные на РНР (Рис. 3). Из всех характеристик, измеряемых ионозондом, анализировалось возмущение максимума электронной концентрации ($\Delta N_m F2$), поскольку этот параметр соответствует высоте, наиболее близкой к источнику возмущения (высота пролета ТГК “Прогресс” была выше высоты максимума электронной концентрации). Возмущение представляет собой относительную разницу между $N_m F2$ и медианным значением $N_m F2_{med}$ 31-дневного ряда (± 15 дней относительно дня наблюдения). Такой способ анализа позволяет исключить вариации $N_m F2$, обусловленные естественным суточным ходом.

Анализ вариации $\Delta N_m F2$ в февральских наблюдениях 2008 г. показал, что после включения ДУ наблюдается существенное падение $\Delta N_m F2$ (возрастание отрицательного возмущения), что может быть проинтерпретировано как уменьшение N_e , вызванное работой ДУ при направлении выхлопных струй на РНР. Амплитуды дополнительных возмущений составляли до $\sim 30\%$, длительности до ~ 40 минут. При этом амплитуда возмущения не зависела от типа ДУ: как в случае работы 8 ДПО, так и в случае работы СКД, наблюдались возмущения как большой, так и малой амплитуды.

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

На ионограмме могут присутствовать следы, соответствующие кратным отражениям от ионосферы (так называемые "кратники"): наиболее низкий по высоте след (первый кратник) соответствует однократному отражению от ионосферы, следующий (второй кратник) – двукратному от ионосферы и однократному от Земли и т.д. Наличие второго кратника автоматически подразумевает наличие первого. На Рис. 8 и 9 представлены ионограммы: горизонтальная ось - частота, вертикальная – высота отражения. Сплошная линия – восстановленный $N_e(h)$.

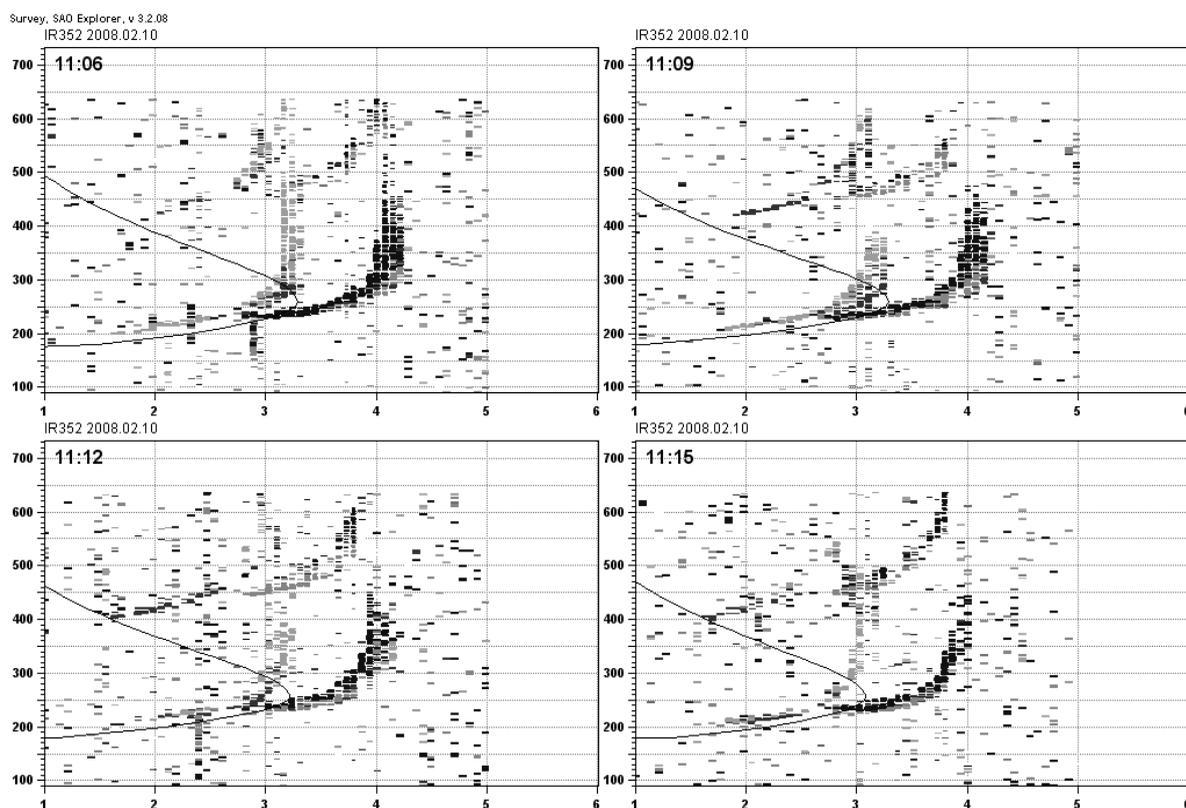
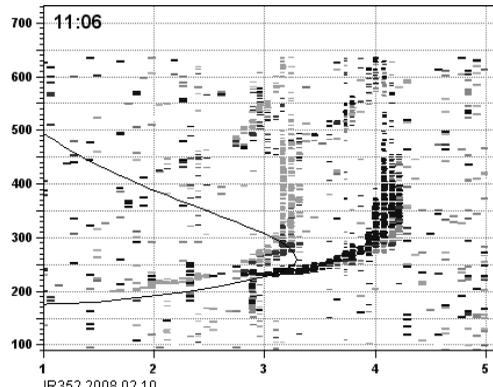


Рис. 8. Ионограммы 10 февраля 2008 г. Время работы СКД 11:12:59 – 11:13:05

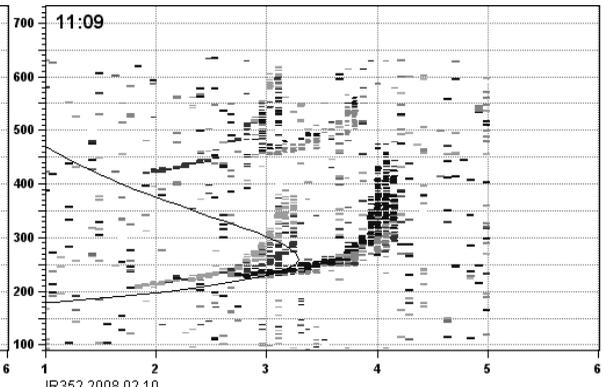
Особенностью ионограмм является наличие второго кратника при отсутствии первого на интервалах зондирующих частот: 10 февраля – от 1,5 МГц до 2 МГц и 11 февраля – от 1,8 МГц до 3 МГц. 10 февраля с 11:12:59 по 11:13:05 УТ работал СКД с направлением струй выхлопа против движения ТКК. В это время излучались частоты от 2,39 до 2,53 МГц. 11 февраля в период 10:00:36–10:00:42 УТ работал СКД с направлением струй выхлопа в направлении на РНР и излучались частоты от 2,0 до 2,17 МГц.

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

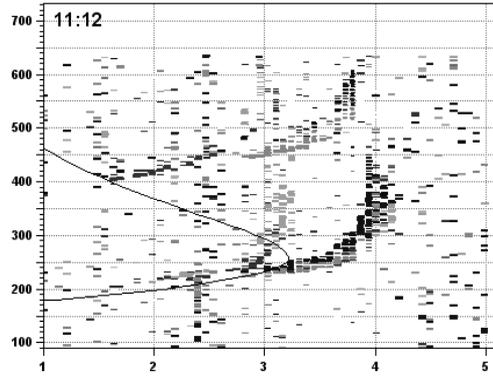
Survey, SAO Explorer, v 3.2.08
IR352 2008.02.10



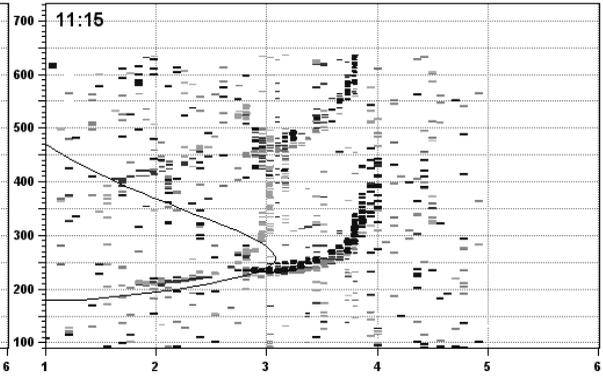
IR352 2008.02.10



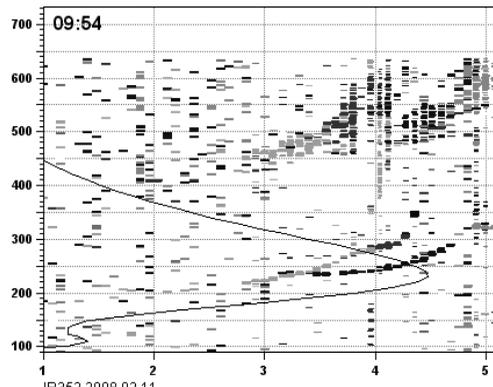
IR352 2008.02.10



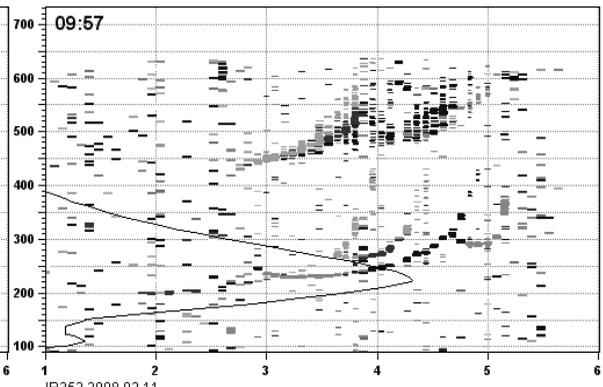
IR352 2008.02.10



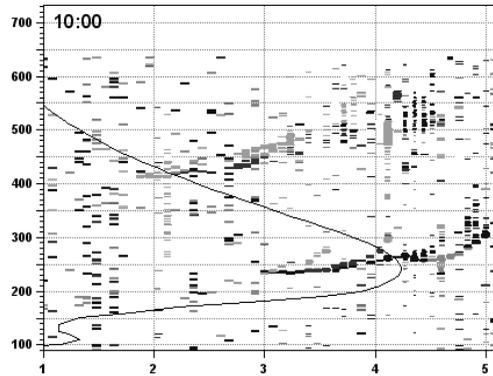
Survey, SAO Explorer, v 3.2.08
IR352 2008.02.11



IR352 2008.02.11



IR352 2008.02.11



IR352 2008.02.11

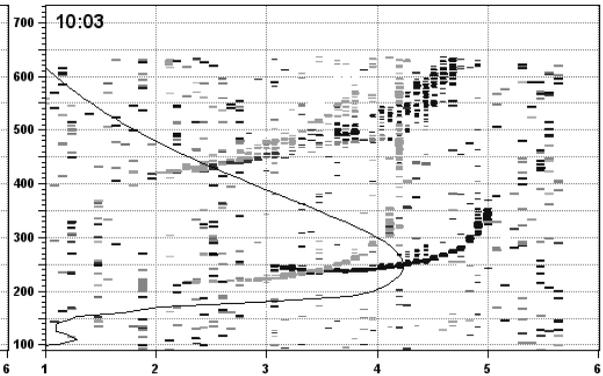


Рис. 9. Ионogramмы 11 февраля 2008 г. Время работы СКД 10:00:36 – 10:00:42 UT

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ УКВ СИГНАЛОВ БОРТОВОГО ПЕРЕДАТЧИКА ТГК

РЛ измерения показали, что наиболее чувствительным параметром на работу ДУ является разность фаз между принятыми сигналами в полурупорах антенны РНР. С целью исследования распространения радиоволн сквозь ионосферные неоднородности, инициированные работой ДУ, был развернут наземный интерферометрический комплекс в составе 4-х антенн зенитного излучения, фидерных линий и 8-ми канального приемника с рабочим диапазоном 1-170 МГц. При появлении над горизонтом (угол места 0.5° и дальность > 2000 км) включался бортовой передатчик ТГК в режиме непрерывного излучения на частоте 121750 кГц. Получены характеристики радиосигнала, прошедшего через ионосферные возмущения, сгенерированные выхлопными струями СКД ТГК.

В 2009 году сигнал принимался на одну антенну. На Рис. 10 представлены динамика амплитуды и Доплеровское смещение частоты (ДСЧ) (синяя и черная линии, соответственно) сигнала в сеансе 22.09.2009 г. Зеленой линией нанесено расчетное ДСЧ. Сигнал принимался с и до, т.е. при пролете ТГК от горизонта до горизонта.

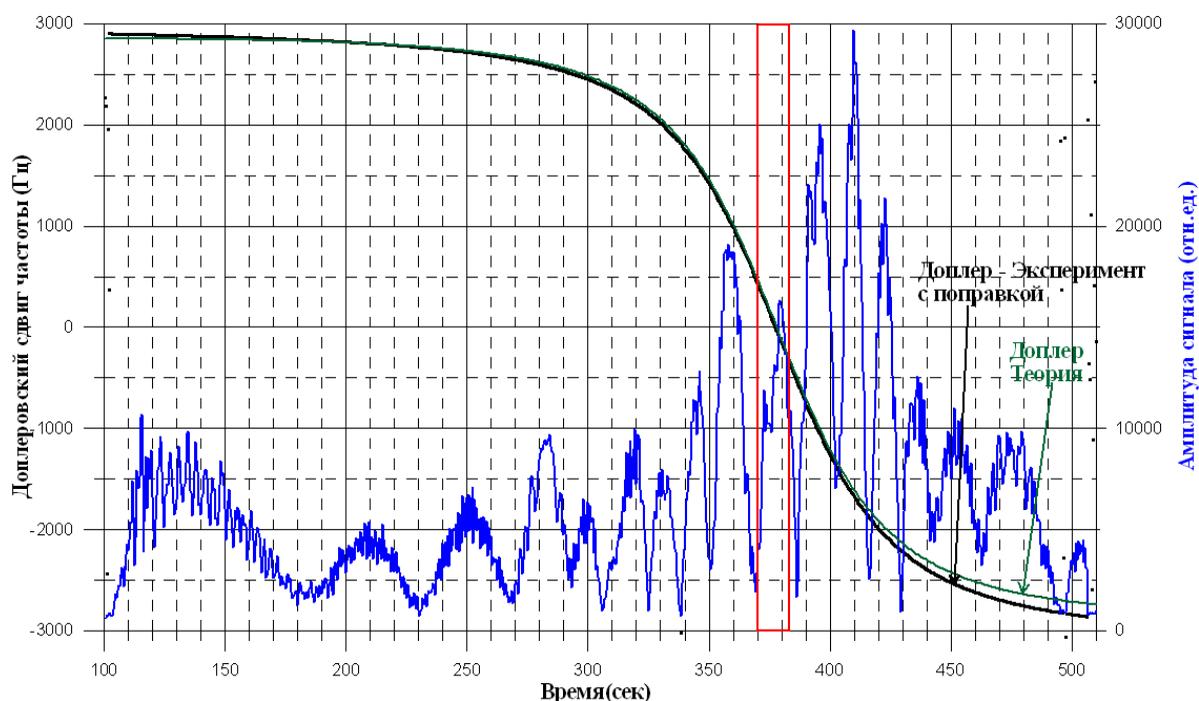


Рис. 10. Амплитуда и ДСЧ сигнала 22.09.2009 г.

Красным прямоугольником выделен временной интервал работы СКД, во время которого можно отметить изменение динамики амплитуды сигнала.

В 2010 г. сигнал принимался тремя из четырех антенн. На Рис. 11 представлены результаты измерений разностей фаз сигналов в антеннах 25.04.2010 г. Видно, что

разности фаз между парами антенн: запад (W)-центр (O) (база 8.17λ) и W-восток (E) (14.04λ) ведут себя практически идентично, отличаясь от динамики разности фаз между антеннами O-E (8.17λ). Такое поведение может быть вызвано высокой степенью анизотропности среды, в которой распространялись радиосигналы.

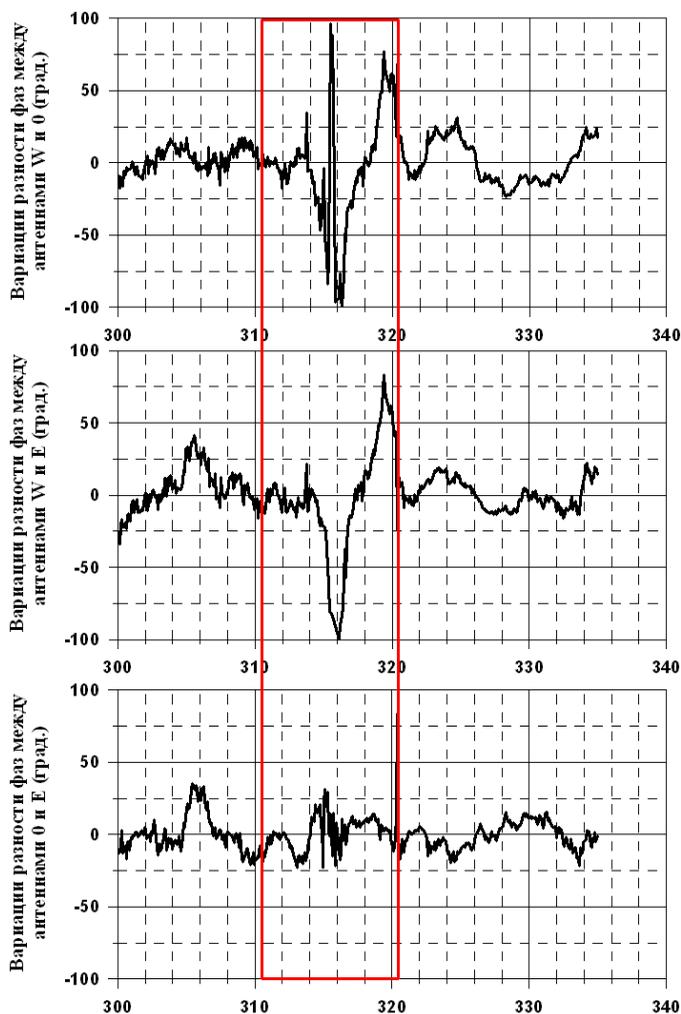


Рис. 11. Результаты измерения разности фаз между сигналами в антеннах 25.04.2010

2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты КЭ «Плазма-Прогресс» показали, что зона плазменных возмущений, генерируемых при работе бортовых ДУ, распространяется на несколько десятков километров и существует более десяти минут. При этом в зоне неоднородности меняется не только плотность и температура плазмы, но и её ионный состав. При инъекции выхлопных струй

возникают среднemasштабные неоднородности с уровнем вариаций параметров от 20 до 40% от фонового значения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников ФГУП ЦНИИМаш Роскосмоса Карабаджака Г.Ф., Твердохлебову Е.М. и Куршакова М.Ю. за постановку КЭ, ЦММ ЦУП Роскосмоса Манжелея А.И. и Тимофееву Н.И. за обеспечение проведения КЭ.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 10-05-01099-а, 08-05-00618 и 08-05-00274-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филипп Н.Д., Ораевский В.Н., Блаунштейн Н.Ш., Ружин Ю.Я. Эволюция искусственных плазменных неоднородностей в ионосфере Земли. Кишинев:Штиинца, 1986. 248 с
2. Bernhardt P.T., Huba J.D., Swartz W.E., Kelly M.C. Incoherent scatter from space shuttle and rocket engine plumps in the ionosphere // JGR, 1998. V. 103, No. A2. P. 2239-2251.
3. Bernhardt P.T., Huba J.D., Kudeki E., Woodman R.F., Condori L., Villanueva F. Lifetime of a depression in the plasma density over Jicamarca produced by space shuttle exhaust in the ionosphere // Radio Science, 2001. V. 36. No. 5. P. 1209–1220.
4. Foster J.C., Holt J.M., Lanzerotti L.J. Mid-Latitude ionospheric perturbation associated with the Spacelab-2 plasma depletion experiment at Millstone Hill // Ann. Geophys, 2000. V. 18. P. 111-119.
5. Mendillo M., Baumgardner J., Allen D.P. et. all. Spacelab-2 plasma depletion experiments for ionospheric and radio astronomical studies // Science, 1987. V.238. P. 1260-1264.
6. Mendillo M., Forbes J.M. Artificially created holes in the ionosphere // J. Geophys. Res., 1991. V. 83. P. 5785-5792.
7. Mendillo M., Hawkins G.S., Klobuchar J.A. A sudden vanishing of the ionospheric *F* region due to the launch of Skylab // J. Geophys. Res., 1975. V. 80. P. 2217-2228.
8. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника, 2002. Т.47, № 11. С.1-7.
9. Потехин А.П., Медведев А.В. и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Косм. исслед., 2008. Т.46. №4. С.356-362.
10. Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K. et al. Ionospheric sounding support of OTH radar // Radio Sci., 1997. V. 32. No. 4. P. 1681-1694.
11. Reinisch B.W., Huang X. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 3. Processing of bottomside ionograms // Radio Sci., 1983. V.18. No.3. P.477-492.