

## Результаты дистанционного зондирования ионосферных возмущений в активных космических экспериментах «Радар-Прогресс»

В.В. Хахинов<sup>1</sup>, А.П. Потехин<sup>1</sup>, В.П. Лебедев<sup>1</sup>, С.С. Алсаткин<sup>1</sup>, К.Г. Ратовский<sup>1</sup>,  
Д.С. Кушнарев<sup>1</sup>, Е.М. Твердохлебова<sup>2</sup>, М.Ю. Куршаков<sup>2</sup>, А.И. Манжелей<sup>3</sup>,  
Н.И. Тимофеева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИСЗФ СО РАН),*

*664033, Иркутск, Лермонтова, 126-а,  
e-mail: khakhin@iszf.irk.ru*

<sup>2</sup> *Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП «ЦНИИМаш»),*

*141070, Королев Московской обл., Пионерская, 4,  
e-mail: katya.tverdokhlebova@gmail.com*

<sup>3</sup> *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева (РКК «Энергия»),  
141070, Королев Московской обл., Ленина, 4а,*

*e-mail: mmc@sfoc.ru*

Представлены результаты активного космического эксперимента «Радар-Прогресс» проводимого совместно ФГУП «ЦНИИМаш», РКК «Энергия» и ИСЗФ СО РАН. С 2007 г. проведено более 50 сеансов. Основной целью эксперимента является исследование параметров ионосферных возмущений, генерируемые выхлопными струями бортовых двигательных установок транспортных грузовых кораблей серии «Прогресс». Используются наземные средства дистанционного зондирования ионосферы ИСЗФ СО РАН: основным является Иркутский радар некогерентного рассеяния, вспомогательным — цифровой ионозонд DPS-4, работающий в режиме вертикального зондирования ионосферы. Сеансы космического эксперимента проводились при различных гелио- и геофизических условиях, направлениях скорости выхлопной струи, длительности работы и типах двигательных установок. Проведена оценка пространственно-временных характеристик ионосферных неоднородностей. Исследована зависимость наблюдаемости неоднородностей от направления скорости и массы выхлопных газов.

**Ключевые слова:** ионосфера, дистанционное зондирование, радар некогерентного рассеяния, ионозонд, активный космический эксперимент.

### Введение

Активные космические эксперименты (КЭ) в околоземном космическом пространстве (ОКП) интересны и важны для исследований динамических процессов в ионосферной плазме. Активное воздействие на ионосферную плазму может осуществляться различными способами: инжекция с космических аппаратов (КА) и ракет плазмообразующих и плазмогающих химических реагентов, воздействие КВ радиоволнами с использованием специально сооруженных мощных радиочастотных (нагревных) стенов и комплексов, наземные и воздушные взрывы, запуски ракет и т. п. К их числу относятся контролируемое включение бортовых двигательных установок (ДУ) низкоорбитальных КА и пилотируемых станций.

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) (Bernhardt et al., 1998, 2001; Foster et al., 2000). Решались три основные задачи: 1) изучение феноменологии и технологии струи; 2) исследование ионосферных взаимодействий; 3) проверка ионосферных моделей. Количество выбрасываемых продуктов сгорания составляло от 87 кг в эксперименте над РНР Jicamarca и до 830 кг над РНР Millstone-Hill, что приводило к образованию больших областей в ионосфере с пониженной электронной концентрацией, существовавших от часа и более.

Такие КЭ открывают большие возможности в имитации и инициировании природных явлений, возникающих при различных геомагнитных возмущениях, а также в диагностике околоземной плазмы. Так, искусственные плазменные образования являются своеобразным зондом, с помощью которого можно исследовать такие основные характеристики ОКП, как магнитные и электрические поля, плотность и температура ионосферной плазмы, ее волновые свойства, поведение в возмущенных условиях. В последние годы 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. Включением большого числа измерительной и наблюдательной аппаратуры сопровождаются запуски американских ракет. Работа стартовых ДУ оказывает мощное воздействие на ионосферу, но естественные аналоги в ионосфере встречаются крайне редко.

Отличительной особенностью КЭ «Радар-Прогресс» является воздействие на ионосферу маломощных маневровых бортовых ДУ с выбросами масс выхлопных газов много меньше, чем исследовалось ранее в (Bernhardt et al., 1998, 2001; Foster et al., 2000). Изучение процессов образования, эволюции, динамических характеристик искусственно создаваемых возмущений в нужном месте и в заданное время крайне важны. Не менее важны экспериментальные результаты для разработки теоретических и математических моделей процессов генерации и эволюции локальных плазменных неоднородностей в ионосфере.

Актуальность указанных работ и в первую очередь работ по исследованию эволюции плазменных неоднородностей в ионосфере определяется не только научными интересами, но и нуждами чисто прикладными. Здесь достаточно указать на проблемы радиосвязи КА – Земля, так как возмущения возникают в ближней зоне бортовых антенн. Известно, что наличие неоднородности концентрации вызывает искажение радиосигналов и часто нарушает надежность радиосвязи. Поэтому исследование всего комплекса физических явлений, происходящих при эволюции плазменных образований, имеет большое значение для решения научных и прикладных задач.

В 2004–2006 гг. на Иркутском РНР (ИРНР) (Жеребцов и др., 2002; Потехин и др., 2008) были проведены сеансы радиолокации плазменного окружения (собственной внешней ионосферы) Международной космической станции (МКС) во время работы бортовых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) (Лебедев и др., 2008). Анализ искажений радиолокационных данных был затруднен сложной структурой радиолокационной характеристики самой МКС ввиду ее больших размеров и непростой геометрической формой. Однако было сделано предположение, что после включения ЖРД принятые РНР сигналы есть результат интерференции радиолокационных сигналов от двух целей: сильный сигнал от самой МКС и очень слабый сигнал, возможно, от образовавшейся плазменной неоднородности.

Некоторым подтверждением высказанного предположения стали результаты расчета вариаций полного электронного содержания (ПЭС) по данным наземных станций глобальной навигационной системы GPS, расположенных вблизи подионосферных точек орбиты МКС. 4 мая 2006 г. для подъема орбиты МКС было проведено длительное включение ДУ транспортного грузового корабля (ТГК) «Прогресс М-56» состыкованного с МКС. Анализ данных показал резкое снижение ПЭС, длившегося ~150 с (Лебедев и др., 2008).

В 2007 г. принято решение использовать ТГК серии «Прогресс». Сеансы КЭ проводятся в режиме автономного полета ТГК после выполнения основной задачи по доставке грузов и отстыковки от МКС. Преимущества привлечения ТГК следующие:

- меньшие размеры по сравнению с МКС, а, следовательно, более простые радиоотражательные характеристики;
- свобода в выборе типов ДУ и режимов их работы;
- организация необходимой геометрии эксперимента.

## Цель и постановка космического эксперимента «Радар-Прогресс»

Целью КЭ, получившего название «Плазма-Прогресс» (с 2010 г. «Радар-Прогресс»), является определение пространственно-временных зависимостей плотности, температуры, ионного состава локальных неоднородностей ионосферы, возникающих в результате работы бортовых ЖРД.

Сеансы КЭ проводятся при известном сочетании внешних орбитальных условий, таких как: географические координаты и ориентация ТГК на орбите, положение Солнца и направление скорости выхлопной струи. Во время пролета через основное направление диаграммы направленности (ДН) ИРНР, на борту ТГК включаются или восемь двигателей причаливания и ориентации (ДПО) с суммарным расходом топлива 376 г/с, или один сближающе-корректирующий двигатель (СКД) с расходом 1 кг/с. От сеанса к сеансу менялись тип и длительность работы (от 5 до 11 с) ДУ, местное время включения, направление выхлопных струй.

- навстречу радиолучу наблюдения ИРНР («на ИРНР») (рис. 1а);
- по направлению движения ТГК («на торможение») (рис. 1б);
- против направления движения ТГК («на ускорение»);
- на север в плоскости местного горизонта ТГК («на север»).

Следует отметить, что в первом варианте («на ИРНР») истечении струи происходит практически вдоль силовых линий магнитного поля Земли (МПЗ), во всех остальных вариантах — поперек МПЗ.

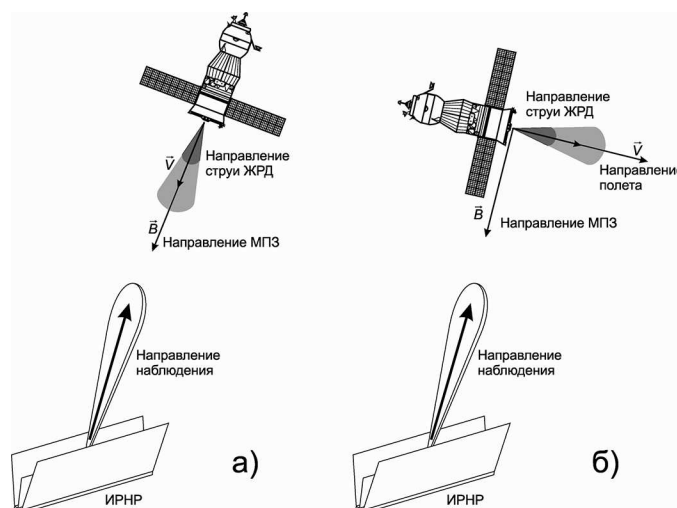


Рис. 1. Геометрия КЭ: а — «на ИРНР»; б — «на торможение»

## Результаты зондирования ионосферных возмущений на Иркутском радаре некогерентного рассеяния

Основным исследовательским инструментом служит Иркутский РНР, входящий в перечень уникальных инструментов и установок России под № 01-28. РНР предназначен для определения во всей толще ионосферы (90...1000 км) пространственно-временных распределений основных параметров ионосферной плазмы: электронную концентрацию  $N_e(h)$ , температуры электронов и ионов, скорость дрейфа плазмы и др. При проведении сеансов КЭ ИРНР работал по следующей методике.

По присылаемым из Центра управления полетами РКК «Энергия» параметрам орбиты ТГК рассчитываются рабочие частоты ИРНР, на которых проводятся измерения. За два часа до включения ДУ на рассчитанных частотах начинаются ионосферные измерения методом

некогерентного рассеяния в областях пролета ТГК на высотах  $\sim 350$  км. Цель таких измерений: определение фоновых параметров невозмущенной ионосферы. Длительность пролета ТГК в основном лепестке ДН радара составляет 15...20 с, длительность работы ДУ — от 5 до 11 с. После пролета ТГК ионосферные измерения продолжают еще два часа с целью определения пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений вызванных выхлопными струями бортовых ДУ.

К настоящему времени проведено 54 сеанса измерений в различных геофизических условиях. Не во всех сеансах были обнаружены и диагностированы результаты работы ДУ. Основная причина — низкая электронная концентрация фоновой ионосферы в период затянувшегося минимума солнечной активности в 2008–2009 гг. Диагностика мелкомасштабных неоднородностей, генерируемых в ионосфере с низкой  $Ne(h)$ , ограничена возможностями ИРНР. Еще одной возможной причиной, влияющей на диагностику неоднородностей во время проведения КЭ, является наличие нейтрального ветра, который может выносить возмущенную область из диаграммы направленности (ДН) ИРНР.

Уже первые сеансы КЭ, проведенные в сентябре 2007 г., выявили значимые эффекты воздействия выхлопных струй на ионосферную плазму и позволили сделать некоторые выводы (Shpynev et al., 2008; Potekhin et al., 2009, Хахинов и др., 2010). Наибольшее воздействие оказывает работа мощного СКД, нежели более слабых 8ДПО. Другим фактором, влияющим на образование неоднородностей, является направление выхлопных струй ДУ. Так, после работы СКД в направлении «на ИРНР» возникали области с пониженной (до 40 %) электронной концентрацией и временем существования в 15...20 мин, а после работы 8ДПО в том же направлении изменения в  $Ne(h)$  практически не наблюдались или проявлялись с некоторой задержкой.

В 2010 г. уровень фоновой электронной концентрации в ионосфере вырос. Результаты проведенных сеансов в апреле и сентябре 2010 г. подтвердили зависимость масштабов возникающих неоднородностей от параметров фоновой ионосферы. На рис. 2а, б представлены  $Ne(h)$  до и после включения мощного СКД с направлениями выхлопных струй «на север», время накопления составляет 2 мин. Снижение электронной концентрации составило  $\sim 40$  % (рис. 2а, сплошная линия) и  $\sim 30$  % (рис. 2б, сплошная линия).

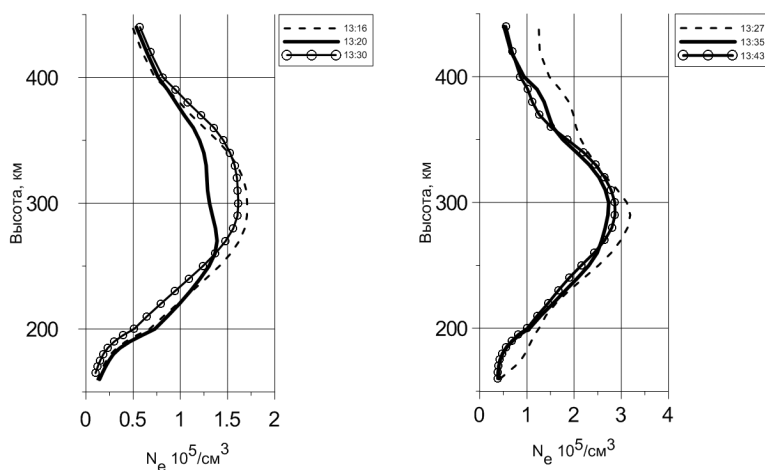


Рис. 2. Динамика профиля  $Ne(h)$ : а — 01.09.2010. СКД «на север» 13:20:02–13:20:09 UT, расход 7,5 кг; б — 23.04.2011. СКД «на торможение» 13:34:56–13:35:03 UT, расход 7,8 кг

Однако необходимо отметить, что в некоторых сеансах со схожими условиями КЭ (тип ДУ, масса и направление инъекции выхлопных струй, время включения и длительность работы СКД) значимых ионосферных возмущений диагностировать не удалось. На рис. 3а, б представлены  $Ne(h)$  при тех же условиях КЭ, что и на рис. 2а, б. Различия между  $Ne(h)$  до и после включения СКД лежат в пределах статистической погрешности измерений. Такие же

результаты радиозондирования были получены в апреле 2010 г. В каждом из пяти сеансов включался СКД с направлениями «на торможение» или «на ИРНР» и расходом топлива от 5,7 до 9,8 кг. Интервал включения СКД от 17:32:46 до 19:39:35 UT. Однозначно диагностировать связанные с работой СКД ионосферные неоднородности не удалось.

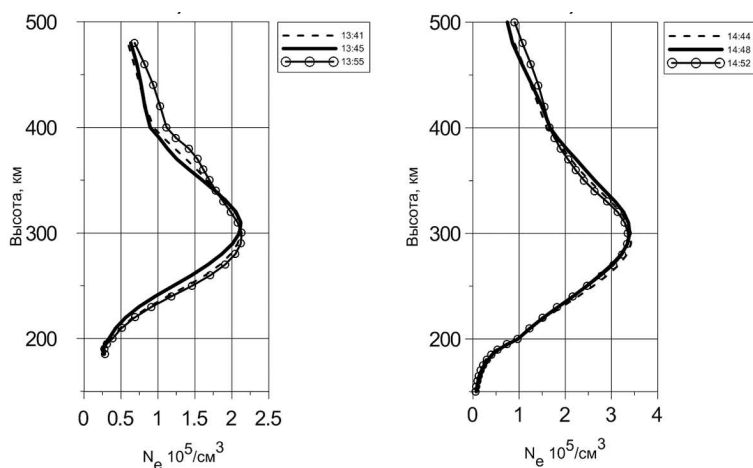


Рис. 3. Динамика профиля  $N_e(h)$ : а — 02.09.2010. СКД «на север» 13:44:57–13:45:04 UT, расход 7,0 кг; б — 22.04.2011. СКД «на торможение» 14:48:09–14:48:17 UT, расход 7,8 кг

### Результаты зондирования ионосферных возмущений на ионозонде DPS-4

В качестве дополнительного радиофизического средства был привлечен цифровой ионозонд DPS-4 (Ратовский и др., 2004). Измерения проводились в режимах вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы и регистрации доплеровских спектров на четырех разнесенных приемных антеннах ионозонда. Измерения на разнесенных антеннах позволяют получать углы прихода зондирующих сигналов отраженных от ионосферных неоднородностей с помощью фазоразностного метода. Ионозонд имеет пространственное ограничение измерений до высот расположения максимума электронной концентрации. По техническим возможностям ионозонд работал либо в режиме угломерных измерений, либо в режиме учащенной регистрации ионограмм ВЗ (каждые 3 мин).

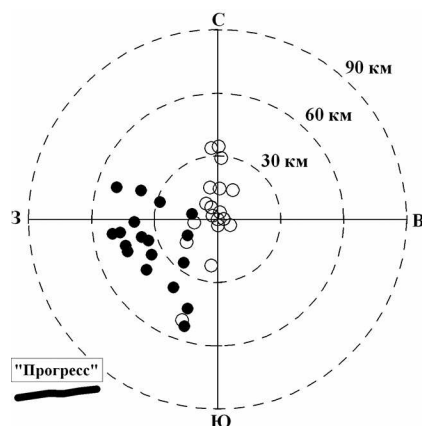


Рис. 4. Области отражений до включения СКД (белые кружки) и после (черные кружки)

На рис. 4 показаны локальные области отражения зондирующих сигналов – «светящиеся точки», зарегистрированные 20.09.2007 г. в интервале 20:21:41–20:50:38 UT до (белые кружки) и после (черные кружки) включения СКД. Участок орбиты ТГК с работающим СКД показан толстой сплошной линией. До включения СКД «светящиеся точки» ориентированы

вдоль направления север-юг, что является типичной картиной, так как локальные области отражения обусловлены перемещающимися ионосферными возмущениями аврорального происхождения распространяющимися с севера на юг. После включения СКД «светящиеся точки» наблюдаются в юго-западном секторе, где пролетал ТКК. Это можно объяснить отражением от неоднородностей сгенерированных работой СКД.

При анализе ионограмм ВЗ были получены интересные результаты. Ионограмма ВЗ представляет собой высотно-частотную матрицу амплитуд отраженных ионосферой радиоволн, т. е. растровое изображение результата одного сеанса работы ионозонда. Анализ ионограмм позволяет получить зависимость кажущейся высоты отражения радиосигнала в ионосфере от частоты зондирования или, другими словами, высотно-частотную характеристику (ВЧХ) ионосферного радиоканала, которая используется для построения  $Ne(h)$ .

При ВЗ ионосферы зондирующий радиосигнал может многократно отражаться от ионосферы и поверхности Земли. Этот процесс на ионограмме отображается так называемыми «кратниками»: наиболее низкий по высоте первый «кратник» соответствует однократному отражению от ионосферы, второй — двукратному отражению от ионосферы и однократному от Земли и т. д. Нормальной считается ситуация, когда присутствие на ионограмме второго «кратника» автоматически подразумевает наличие первого.

Особенность ионограмм, полученных 10 и 11 февраля 2008 г., заключается в отсутствии первого «кратника» при наличии второго на интервалах зондирующих частот: от 1,5 до 2 МГц 10 февраля и от 1,8 до 3 МГц 11 февраля. В обоих сеансах — 10 февраля с 11:12:59 UT и 11 февраля с 10:00:36 UT — в течение 5 с работал СКД в направлении «на ИРНР». В это время излучались частоты от 2,39 до 2,53 МГц и от 2,0 до 2,17 МГц, соответственно. На рис. 5 представлены ионограммы ВЗ 11.02.2008. По горизонтальной оси отложена зондирующая частота (МГц), по вертикальной — высота отражения радиоволн (км). Сплошной линией представлен восстановленный  $Ne(h)$ . Начало сеанса прописано в верхнем левом углу каждой ионограммы. Овалом отмечена вышеописанная особенность ионограмм.

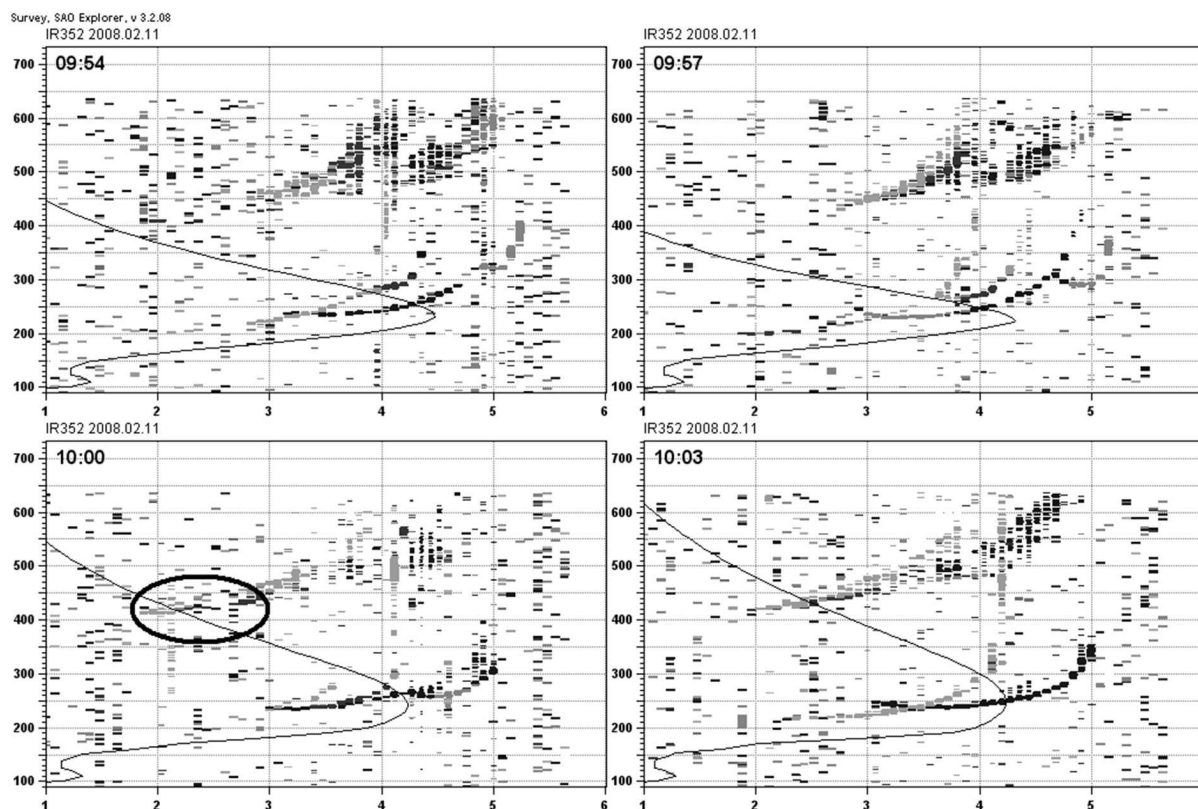


Рис. 5. Ионограммы ВЗ 11.02.2008. СКД «на ИРНР» 10:00:36–10:00:42 UT

Были отмечены и другие «аномальные» ионограммы, на которых после работы СКД наблюдались или дополнительные отражения от высот выше и ниже расположения максимума  $Ne(h)$  или дополнительные слои  $F1$ , критические частоты которых заметно превышают критические частоты регулярного слоя  $F1$ . Моделирование (Веснин, Ратовский, 2010) показало, что причиной появления дополнительных ионосферных слоев  $F1$  могут быть возникшие ионосферные возмущения, распространяющиеся сверху вниз.

### Заключение

Результаты проведенных сеансов активного КЭ «Радар-Прогресс» показали, что выбросы небольших масс выхлопных газов, инжектируемые бортовыми ДУ ТГК «Прогресс», могут сопровождаться отрицательными возмущениями электронной концентрации. Размеры возмущенных областей могут составлять десятки километров, времена существования от 10 до 20 мин. Амплитуды вариаций параметров ионосферных возмущений достигали от 20 до 40 % от фоновых значений.

Наблюдаемость и пространственно-временные характеристики возмущений зависят от геофизических условий, ионосферных процессов, направления скорости и массы выхлопных струй, геомагнитного поля, диаграммы направленности ИРНР и ионозонда DPS-4. Наибольшие масштабы ионосферных возмущений наблюдались в сеансах при включении более мощного СКД и направлением выхлопных струй «на ИРНР», которое почти параллельно силовым линиям геомагнитного поля.

Работа выполнена по заказу Роскосмоса в рамках государственного контракта № 851-5383 в 2007–2011 гг., а также при поддержке министерства образования и науки РФ (госконтракты № 14.740.11.0078 и № 16.518.11.7097) и РФФИ (проекты № 10-05-01099 и 11-05-00698).

### Литература

1. *Веснин А.М., Ратовский К.Г.* Моделирование явления «кажущегося слоя F1», наблюдавшегося в эксперименте «Радар-Прогресс», с помощью программного обеспечения автоматической обработки ионограмм вертикального зондирования // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 136–142.
2. *Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В., Носов В.Е., Потехин А.П., Шпынев Б.Г.* Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 11. С. 1339–1345.
3. *Лебедев В.П., Хахинов В.В., Габдуллин Ф.Ф., Корсун А.Г., Твердохлебова Е.М., Лалетина Е.А., Манжелей А.И.* Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 50(1). С. 51–60.
4. *Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В., Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Шпынев Б.Г.* Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космич. исслед. 2008. Т. 46. № 4. С. 356–362.
5. *Ратовский К.Г., Потехин А.П., Медведев А.В., Куркин В.И.* Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности // Солнечно-земная физика. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2004. Вып. 5(118). С. 102–104.
6. *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.* Радиофизические методы диагностики ионосферных возмущений, генерируемые бортовыми двигателями ТГК «Прогресс»: алгоритмы, инструменты и результаты // Журн. радиоэлектроники. 2010. С. 555–571.

7. *Bernhardt P.T., Huba J.D., Swartz W.E., Kelly M.C.* Incoherent scatter from space shuttle and rocket engine plumps in the ionosphere // *J. Geophysical Research*. 1998. V. 103. N. A2. P. 2239–2251.
8. *Bernhardt P.T., Huba J.D., Kudeki E., Woodman R.F., Condori L., Villanueva F.* Lifetime of a depression in the  $f_{120e}$  plasma density over Jicamarca produced by space shuttle exhaust in the ionosphere // *Radio Science*. 2001. V. 36. N. 5. P. 1209–1220.
9. *Foster J.C., Holt J.M., Lanzerotti L.J.* Mid-Latitude Ionospheric Perturbation associated with the Spacelab-2 Plasma Depletion Experiment at Millstone Hill // *Annales de Geophysique*. 2000. V. 18. P. 111–119.
10. *Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.P., Shpynev B.G.* Active space experiments with the use of the transport spacecraft “Progress” and Irkutsk IS Radar // *Progress in Electromagnetics Research Symposium: Proc. M., 2009*. P. 217–221.
11. *Shpynev B.G., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Tverdokhlebova E.M., Manzheley A.I.* Ionospheric perturbation associated with the “Plasma-Progress” experiment at Irkutsk // *Proc. 29 URSI General Assembly*. Chicago, USA. 2008. P. GP2-05.3.
- 12.

### **Results of remote sounding of ionospheric disturbances during active experiments “Radar-Progress”**

**V.V. Khakhinov<sup>1</sup>, A.P. Potekhin<sup>1</sup>, V.P. Lebedev<sup>1</sup>, S.S. Alsatkin<sup>1</sup>, K.G. Ratovsky<sup>1</sup>,  
D.S. Kushnarev<sup>1</sup>, E.M. Tverdokhlebova<sup>2</sup>, M.Yu. Kurshakov<sup>2</sup>, A.I. Manzheley<sup>3</sup>,  
N.I. Timofeeva<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics of SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontova, 126-a,  
e-mail: khakhin@iszf.irk.ru*

<sup>2</sup> *FSUE Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash),  
141070, Moscow reg., Korolev, Pionerskaya, 4  
e-mail: katya.tverdokhlebova@gmail.com*

<sup>3</sup> *S.P. Korolev SRC “Energia”, 141070, Moscow reg., Korolev, Lenina, 4a,  
e-mail: mmc@sfoc.ru*

S.P. Korolev SRC «Energia», and the FSUE «Central Research Institute of Machine Building», and the Institute of Solar-Terrestrial Physics of SB RAS are carried out active space experiment. The goal of the experiment is to study spatial-temporal characteristics of the plasma disturbances caused by the engine burns of orbital maneuvering subsystem engines of automatic transport cargo spacecraft Progress. The main research tool is the Irkutsk incoherent scattering radar. Results have shown that small weights of exhaust gases of onboard engines TGK generate ionospheric indignations with the sizes of ten kilometers and times of existence to 20 minutes. Amplitude of variations of parameters ionospheric indignations reached to 40 % from background values.

**Keywords:** ionosphere, incoherent scattering radar, digisonde, active space experiment.