УДК 550.388.2
DOI: 10.12737/22812

Поступила в редакцию 22.11.2016
Принята к публикации 20.01.2017

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ИОНОСФЕРЫ НА ПРОДУКТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА ПРИ РАБОТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ ГРУЗОВЫХ КОРАБЛЕЙ СЕРИИ «ПРОГРЕСС» ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

INVESTIGATING THE IONOSPHERE RESPONSE TO EXHAUST PRODUCTS OF "PROGRESS" CARGO SPACECRAFT ENGINES ON THE BASIS OF IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR DATA

Б.Г. Шпынев
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, shpynev@iszf.irk.ru

С.С. Алсаткин
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, alss@iszf.irk.ru

В.В. Хахинов
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, khakhin@iszf.irk.ru

В.П. Лебедев
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, lebedev@iszf.irk.ru

B.G. Shpynev
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, shpynev@iszf.irk.ru

S.S. Alsatkin
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, alss@iszf.irk.ru

V.V. Khakhinov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, khakhin@iszf.irk.ru

V.P. Lebedev
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, lebedev@iszf.irk.ru

Аннотация. В рамках совместной работы ФГУП ЦНИИмаш, РКК «Энергия» и ИСЗФ СО РАН в 2007–2015 гг. проводился активный космический эксперимент «Радар–Прогресс» (до 2010 г. «Плазма–Прогресс»). На Иркутском радаре некогерентного рассеяния проводились исследования пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений, возникающих вследствие инжекции в ионосферную плазму выхлопных газов бортовых двигателей транспортных грузовых космических кораблей серии «Прогресс». В качестве основного эффекта при инжекции продуктов горения в ионосферную плазму рассматривается возникновение новых очагов рекомбинации ионов атомарного кислорода O^+ на молекулах воды и углекислого газа, что приводит к образованию области пониженной концентрации плазмы («дыры» ионизации). В условиях ночной ионосферы данная область заполняется ионами водорода из плазмосферы, что меняет ионный состав плазмы и характеристики сигналов некогерентного рассеяния. При наблюдении процессов формирования и релаксации области пониженной концентрации плазмы критическими факторами являются степень заполнения диаграммы направленности радара продуктами горения и скорость термосферного нейтрального ветра, который выносит молекулярные фракции выброса из диаграммы направленности радара. Влияние этих факторов приводит к низкой повторяемости успешных наблюдений эффекта. В успешных экспериментах зарегистрированы уменьшение электронной концентрации до 35 % и длительность существования «дыры» ионизации до 30 мин. Время существования на месте «дыры» области с высоким содержанием ионов H^+ может составлять до одного часа.

Ключевые слова: ионосфера, электронная концентрация, активные космические эксперименты, выброс продуктов горения в ионосферную плазму.

Abstract. The FSUE Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash), Rocket and Space Corporation "Energia", and Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS) jointly conducted the active space experiment "Radar-Progress" in 2007–2015. During this experiment, we used the Irkutsk Incoherent Scatter Radar to study space-time characteristics of ionospheric disturbances generated by exhaust products of "Progress" cargo spacecraft engines. As the basic effect during exhaust product injection we consider the formation of new centers for recombination of ambient ionospheric ions O^+ on molecules of water and carbon dioxide. This produces an ionization "hole" in the region of injection. In nighttime conditions when the majority of experiments were performed, this hole was filled by hydrogen ions from the plasmasphere, thus the ion composition in the vicinity of the hole and incoherent scatter spectra were changed. For successful observation of the ionization hole dynamics, the critical factors are the degree of radar antenna diagram filling by exhaust products and the velocity of the thermospheric neutral wind, which makes exhaust gases move from the antenna diagram. These two factors lead to poor repeatability of successful experiments. Successful experiments recorded a decrease in electron density up to 35 % in the hole that existed for 30 min. The lifetime of the region with high concentration of H^+ ions can be as long as one hour.

Keywords: ionosphere, electron density, active space experiments, exhaust product injection into ionospheric plasma.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 2007 г. в рамках активных космических экспериментов (КЭ) «Радар–Прогресс» (до 2010 г. «Плазма–Прогресс») [Potekhin et al., 2009; Khakhinov et al., 2012; Хахинов и др., 2012, 2013] на Иркутском радаре некогерентного рассеяния (ИРНР) [Жеребцов и др., 2002] проводились исследования ионосферных неоднородностей, генерируемых выхлопными газами бортовых жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) транспортных грузовых кораблей (ТГК) серии «Прогресс». В 2007–2015 гг. был проведен 91 сеанс КЭ. ИРНР использовался для исследования радиолокационных сигналов как от неоднородностей, генерируемых струей выхлопных газов, так и от ионосферных неоднородностей, возникающих вследствие химической реакции этих выбросов с частицами плазмы.

Активные эксперименты проводились в режиме автономного полета ТГК, после завершения программы работ и отстыковки его от международной космической станции (МКС), и имели следующие особенности:

- относительно малое количество продуктов горения, инжектируемых в ионосферу (скорость сжигания топлива варьирует от 376 г/с до 1 кг/с, длительность работы ЖРД — от 5 до 11 с);
- разные внешние условия экспериментов, такие как фоновая концентрация электронов, гелиогеофизическая обстановка, высота и ориентация ТГК на орбите, тип ЖРД и направление струи выхлопных газов.

Для исследования пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений, генерируемых продуктами горения при работе ЖРД, ИРНР включался за несколько часов до сеанса КЭ с целью определения фоновых параметров ионосферной плазмы в области пролета ТГК и продолжал измерения в течение нескольких часов после сеанса КЭ.

Ионосферные эффекты исследовались по методикам, изложенным в работах [Shpynev, 2004; Медведев и др., 2004; Лебедев и др., 2008; Хахинов и др., 2010], в двух частотных каналах для одновременного измерения профиля мощности и спектральных характеристик сигналов некогерентного рассеяния (НР). В спектральном канале измерений использовался прямоугольный импульс длительностью 750 мкс. В канале регистрации профиля мощности в период низкой солнечной активности 2007–2008 гг. для зондирования ионосферы применялся прямоугольный импульс длительностью 150–200 мкс, с 2009 г. — фазоманипулированный импульс (использующий 5- или 11-элементный код Баркера) суммарной длительностью 200 мкс с последующим согласованным приемом. Кроме этого, начиная с 2009 г. в экспериментах использовался режим двух разнесенных в меридиональной плоскости лучей для определения динамики возмущенной области.

МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ НА ИОНОСФЕРУ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «РАДАР–ПРОГРЕСС»

Эксперименты, проведенные в разные годы, различались по состоянию солнечной активности и по параметрам орбиты ТГК, на которой происходила работа двигателей. Наиболее успешными были эксперименты при низкой солнечной активности в 2007–2009 гг., когда орбита МКС–ТГК находилась на высотах ~340–360 км и продукты горения ЖРД появлялись вблизи максимума электронной концентрации. При этом фоновые значения электронного содержания были низкими (порядка 10^5 см$^{-3}$), что обеспечивало больший процент частиц продуктов горения, вступивших в реакцию с фоновой ионосферной плазмой.

Для описания геометрии эксперимента мы используем стандартный в радиолокации термин «диаграмма направленности» (ДН) антенной системы, под которой подразумевается форма основного луча радара по половинной мощности. В экспериментах 2007–2009 гг. низкая высота орбиты позволяла обеспечить лучшее заполнение ДН антенны ИРНР продуктами горения. Этот фактор является очень важным условием КЭ, поскольку сигнал НР формируется всем объемом луча ДН, и если продукты горения попадают только в небольшую часть основного луча ДН, то их влияние на полный сигнал НР будет малозначимым. Для иллюстрации эффекта заполнения ДН радара на рис. 1 приведена геометрия двух экспериментов 2 и 3 сентября 2009 г., из которых хорошо видна суть проблемы заполнения ДН продуктами горения ЖРД. Проекция диаграммы направленности ИРНР на высоте 300 км имеет вид эллипса с угловыми размерами 0.5° в направлении приблизительно север–юг и 10° в направлении восток–запад. Прямоугольник в начале координат схематически показывает расположение волноводно-щелевой антенны относительно географических координат. Цена деления по осям координат составляет 2°. Принцип работы антенной системы ИРНР позволяет проводить сканирование эллипсом ДН в направлении приблизительно север–юг путем изменения несущей частоты передатчиков (154–162 МГц). Сектор сканирования показан соответствующими эллипсами на рис. 1. При используемых параметрах орбиты «Прогресс» попадает в сектор сканирования

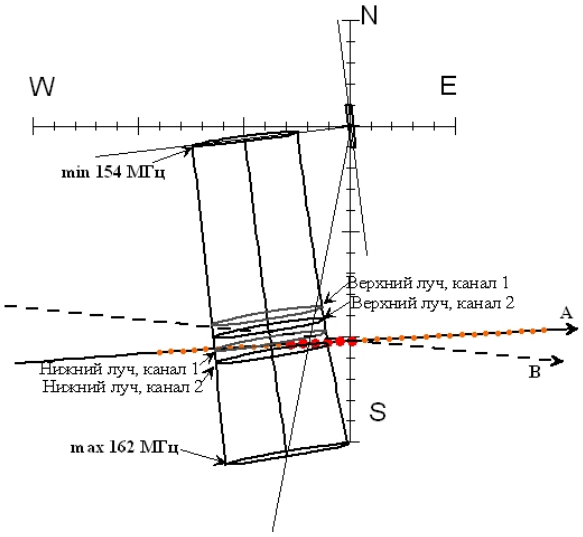

Рис. 1. Геометрия прохождения ТГК «Прогресс» через диаграмму направленности ИРНР: А — 02.09.2008, В — 03.09.2008

ИРНР один, максимум два раза в сутки, и из сравнения траекторий А и В на рис. 1, (сплошная и штриховая линии со стрелками) видно, что в двух последовательных экспериментах угол между эллипсом ДН и траекторией орбиты существенно различается. Оптимальной траекторией пролета было бы ее совпадение с длинной осью эллипса ДН, но такой случай практически не был реализован ни в одном из сеансов КЭ.

Для измерения радиолокационных характеристик ТГК непосредственно во время пролета (в течение нескольких десятков секунд) в эксперименте проводилось сканирование ДН по нескольким направлениям. В свою очередь, для измерения сигналов некогерентного рассеяния до и после пролета ТГК диаграмма направленности устанавливалась обычно в центр области пролета и оставалась постоянной все время измерений методом НР. Очевидно, что при достаточной локализации области выбросов в эксперименте для траектории А на рис. 1, степень заполнения ДН продуктами горения будет гораздо выше, и эффект при измерении сигналов НР будет проявлен сильнее. В экспериментах после 2009 г. для каждого канала измерений использовались два луча ДН (верхний и нижний луч на рис. 1), которые устанавливались вблизи левой и правой границ траектории пролета ТГК. В связи с указанными особенностями геометрии экспериментов в большой части пролетов ТГК достичь оптимальной траектории пролета не удалось, коэффициент заполнения ДН был незначительным и существенных вариаций ионосферной плотности не наблюдалось.

Вторым фактором, влияющим на результаты экспериментов, является наличие в термосфере нейтрального ветра, который сносит струю выхлопных газов из створа ДН радара. Простые оценки показывают, что при поперечной ширине ДН 5 км на высоте 300 км и горизонтальной скорости нейтрального ветра 50 м/с продукты горения покидают ДН за две минуты, поэтому реальный эффект может возникнуть только при слабом ветре в ночной ионосфере. Если струя успевает прореагировать с плазмой, то эффект может быть зарегистрирован, поскольку заряженные частицы вморожены в магнитное поле Земли и лишь частично увлекаются нейтральным потоком вдоль силовых линий магнитного поля. Поскольку экспериментальные измерения нейтрального ветра на высотах термосферы практически невозможны, то этот фактор дает существенную неопределенность в постановке эксперимента при определении места и времени включения двигателей ТГК.

Следующим фактором, который влияет на степень заполнения ДН радара продуктами горения ЖРД, является квадратичная геометрическая расходимость ДН. Этот фактор сыграл негативную роль в 2012–2013 гг., когда орбита МКС была поднята с 350 до 410 км. В этом случае поперечное сечение ДН увеличилось в 1.4 раза и, с учетом квадратичного уменьшения мощности сигнала НР с высотой, соотношение сигнал/шум для ионосферных эффектов ухудшилось вдвое.

Реальные параметры струи выхлопных газов и образуемого ей облака молекулярных частиц также неизвестны, поэтому определить истинный коэффициент заполнения ДН на больших высотах весьма затруднительно. Наши оценки показывают, что в принципе число частиц в выхлопной струе ТГК достаточно велико для заполнения большого пространства с размерами в несколько десятков кубических километров, однако такие оценки не учитывают эффект конденсации паров воды и их превращения в ледяные кристаллы. При работе ЖРД дисперсные частицы могут образовываться в основном в результате конденсации паров воды и углекислого газа в выхлопной струе двигателей вследствие резкого падения температуры продуктов горения при их расширении.

Конденсация паров воды в продуктах горения при работе ракетных двигателей космических аппаратов (КА) рассматривалась разными авторами (наиболее подробно в работе [Wu, 1975]). Во всех этих работах полагалось, что продукты конденсации находятся в тепловом равновесии с газовой фазой продуктов горения, что в реальных условиях является скорее исключением, чем правилом. Скрытая теплота конденсации, приходящаяся на одну молекулу, более чем на порядок превосходит среднюю кинетическую энергию молекул продуктов горения. При конденсации паров происходит нагрев частиц, и для поддержания их в тепловом равновесии с окружающим газом необходимо наличие интенсивного теплоотвода.

В работах [Платов и др., 2004, 2005] описаны условия образования водяного и углекислого льда на высотах нижней термосферы, что позволяет весьма реалистично рассмотреть процессы конденсации частиц выхлопных газов на высотах ионосферы. В случаях, когда плотность среды, в которой происходит конденсация, достаточно велика и парциальное давление паров воды мало по сравнению с давлением продуктов горения в выхлопной струе, тепловое равновесие эффективно поддерживается путем столкновительного теплообмена с окружающей средой. При работе последних ступеней ракетоносителей и бортовых двигателей КА давление продуктов горения в выхлопной струе на порядок меньше, чем у стартовых двигателей, работающих в нижних слоях атмосферы, поэтому скорость теплообмена в этих условиях тоже может уменьшаться на порядок величины. В таком случае предположение о тепловом равновесии оказывается неприемлемым и не вполне ясно, насколько данный механизм справедлив для высот ионосферы.

Из особенностей эксперимента следует, что при анализе данных конкретных КЭ «Радар–Прогресс» необходим учет большого числа факторов, часть из которых не может быть проконтролирована. Этим, вероятно, и определяется низкая повторяемость наблюдаемых эффектов.

Как уже говорилось, характер воздействия работы двигателей ТГК на ионосферу определяется двумя механизмами. Первый — создание локальной области возмущения с нестандартным для ионосферы химическим составом. Второй — изменение химического состава и концентрации ионов плазмы

вследствие реакции с продуктами горения. Основной причиной изменения состояния ионосферной плазмы при работе двигателей КА является создание очагов рекомбинации, которые в большом пространственном объеме создают зону пониженной концентрации атомарного кислорода. Молекулы H_2O, CO_2 и H_2 имеют в 100–1000 раз более высокую скорость реакции с ионами кислорода O^+ [Кринберг, Тащилин, 1984], чем естественные для ионосферы тяжелые молекулы N_2 и O_2. Поскольку основной продукт выбросов — пары H_2O, а основной компонент ионосферной плазмы на данных высотах — атомарный кислород, то наиболее значимыми химическими реакциями являются:

- реакция обмена $H_2O+O^+ \rightarrow H_2O^+ + O$; (1)
- реакция диссоциациативной рекомбинации $H_2O^+ + e^- \rightarrow OH + H$; (2)
- аналогичные реакции для CO_2 и H_2.

Реакции (1)–(2) и соответствующие реакции для молекул CO_2 и H_2 реализуют условия для создания в некотором объеме ионосферной плазмы области низкой концентрации ионов кислорода, которая заполняется ионами атомарного водорода, приходящими вдоль силовых линий геомагнитного поля из плазмосферы. Источником атомарного водорода являются протоны солнечного ветра, захваченные магнитосферой Земли [Кринберг, Тащилин, 1984]. В условиях низкой солнечной активности содержание атомарного водорода на высотах выше 400 км может быть значительным (40–70 %), поэтому динамика ионосферы выше максимума ионизации в значительной степени определяется относительным содержанием атомарного кислорода и атомарного водорода. Основной реакцией, которая определяет состав плазмосферы, является реакция обмена:

$$O^+ + H \Leftrightarrow O + H^+. \quad (3)$$

Скорости прямой и обратной реакции (3) невысоки, поэтому изменение ионного состава во внешней ионосфере является процессом инерционным и резкое понижение во время КЭ концентрации атомарного кислорода вследствие реакций (1)–(2) не может быть быстро восстановлено в результате притока ионов H^+ из плазмосферы. Перенос частиц в ночной ионосфере обусловлен притоком протонов из плазмосферного резервуара, но скорость переноса ограничена скоростью звука, и процесс заполнения образовавшейся «дыры» концентрации плазмы до исходного состояния занимает интервал времени до 15–20 мин. Восстановление же исходного ионного состава вследствие реакции (3) занимает еще больше времени. Следовательно, реакции (1)–(3) могут существенным образом изменить процентное соотношение этих ионов, что сказывается на форме спектров НР, наблюдаемых в эксперименте. В стационарном состоянии приток ионов водорода порождает ионизацию атомарного кислорода, согласно обратной реакции (3), а ионы O^+, двигаясь вниз, рекомбинируют в нижней ионосфере. Этот стационарный процесс определяет равновесную высоту перехода ионного состава плазмы, которая в рамках КЭ должна уменьшаться. Аналогичные оценки времени восстановления «дыры» ионизации были получены при проведении активных экспериментов в экваториальной ионосфере, где магнитное поле направлено горизонтально и приток ионов происходит из соседних вдоль меридиана горизонтальных областей [Bernhardt et al., 2001]. Очевидно, что в таких условиях не происходит изменения ионного состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Как уже говорилось выше, большинство удачных экспериментов, в которых наблюдались вариации электронной плотности, относится к периоду низкой солнечной активности, когда орбита ТГК в эксперименте располагалась вблизи 350 км, т. е. для существующих тогда фоновых значений электронной концентрации практически в самом максимуме ионизации. Наиболее успешным был эксперимент в сентябре 2007 г., когда в трех сеансах измерений из шести был зафиксирован эффект создания «дыры» ионизации.

На рис. 2–4 приводятся результаты нескольких экспериментов, в которых основной эффект воздействия выхлопных газов ЖРД ТГК «Прогресс» можно связать с кратковременным понижением $N_e(h)$ в течение от нескольких минут до получаса. На рис. 2 приводятся результаты измерений $N_e(h)$ в эксперименте 21.09.2007. Центральной вершиной треугольника на рисунке показаны высота и время включения двигателей ТГК (здесь и далее цвет треугольника выбирается по контрасту с фоном рисунка). В данном случае область низкой электронной концентрации образовалась на высотах 260–330 км. Уменьшение N_e в этой области составляло ~35 % от фонового значения. Длительность процесса восстановления ~10 мин.

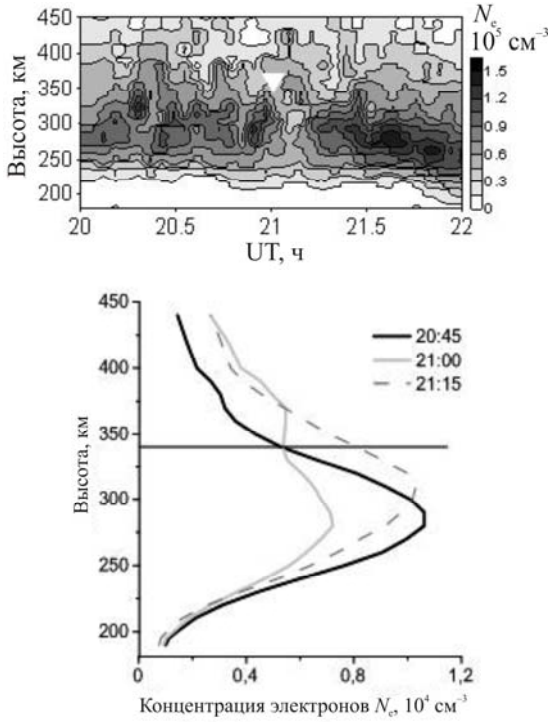

Рис. 2. Результаты ионосферных измерений 21.09.2007. Время работы ЖРД «на торможение» — 21:00:13–21:00:18, высота пролета — 341.56 км

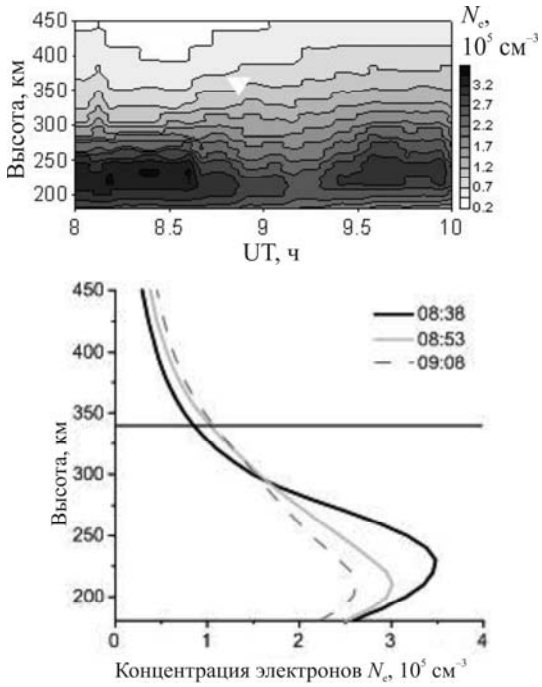

Рис. 3. Результаты ионосферных измерений 25.09.2009. Выхлопная струя направлена на север. Время работы ЖРД — 08:53:39–08:53:49, высота пролета — 345.06 км

На рис. 3 в эксперименте 25.09.2009 область низкой концентрации электронов образовалась на высотах ниже 200–270 км. Уменьшение N_e в этой области составляло ~30 % от фонового значения. Длительность процесса восстановления составляла до получаса. Заметим, что это был один из немногих экспериментов, в котором в вечернее время значение N_e достигало $3 \cdot 10^5$ см$^{-3}$.

С 2009 г. в КЭ стал использоваться режим измерений двумя разнесенными лучами. При постоянной тактовой частоте ИРНР 24.4 Гц статистическое накопление сигнала НР в каждом информационном канале уменьшилось вдвое, что привело к увеличению дисперсии экспериментальных данных НР. Такой режим работы был обусловлен проведением измерений вектора скорости плазмы, но при измерении сигналов НР в ходе КЭ это привело к ухудшению временного разрешения. Заметное уменьшение полной мощности зондирующего сигнала было вызвано также использованием фазоманипулированного сигнала в канале измерения электронной концентрации. Поскольку ИРНР работает по принципу частотного сканирования, то в процессе перехода между кодовыми посылками в коде Баркера сигнал излучается в направлении, отличном от основного лепестка ДН радара. В зависимости от фазового кода потери мощности могут достигать десяти и более процентов.

На рис. 4 приведены вариации N_e для верхнего луча на частоте 159.3 МГц (*а*, *б*) и для нижнего луча на частоте 160.2 МГц (*в*, *г*) в эксперименте 31.08.2010. Первоначально эффект был зарегистрирован верхним лучом на высотах 280–330 км, где уменьшение N_e составляло ~25 % от фонового значения. На нижнем луче, область зондирования которого удалена к югу на ~50 км, эффект был слабее и наблюдался с задержкой около 10 мин. Длитель-

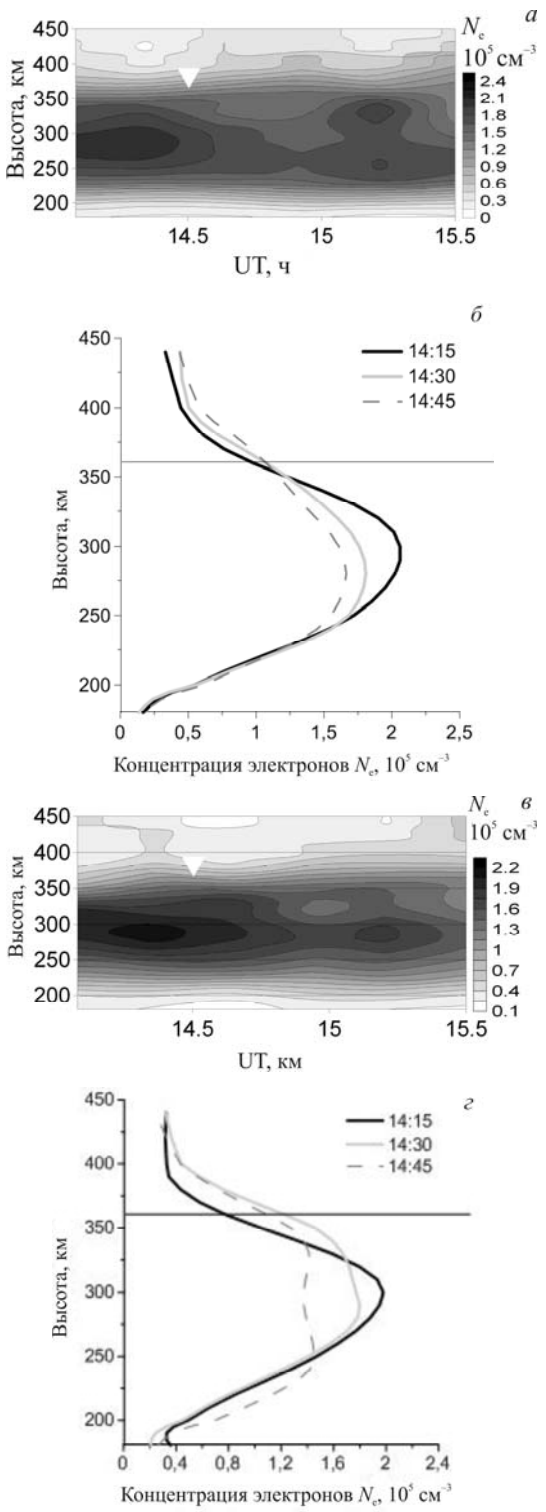

Рис. 4. Результаты ионосферных измерений 31.08.2010: *а*, *б* — 159.3 МГц; *в*, *г* — 160.2 МГц. Время работы ЖРД «на торможение» — 14:30:05–14:30:11, высота пролета — 365 км

ность процесса восстановления на первом луче составляла около получаса.

С повышением солнечной активности в 2010–2013 гг. орбита МКС постоянно поднималась ЦУП для предотвращения торможения станции в расширяющейся нейтральной атмосфере. В 2012 г. высота орбиты ТГК составляла уже 410 км, и, как уже говорилось выше, связанный с этим эффект расширения ДН снижал результативность экспериментов. Для большинства экспериментов в этот период мы уже не

можем (с использованием критериев статистической значимости) утверждать наличие эффекта отрицательных вариаций N_e при работе двигателей ТГК.

В приведенных вариациях электронной концентрации максимальная реакция ионосферы на продукты работы ЖРД всегда происходит ниже высоты орбиты ТГК, даже если выхлопная струя направлена горизонтально. Этот эффект может быть связан с двумя механизмами. Первый — это естественная диффузия вниз более тяжелых молекул воды и углекислоты, причем здесь также должно происходить диффузионное разделение этих примесей. Второй и, скорее всего, основной механизм — это направленный вниз поток плазмосферных ионов, который как раз и формирует ночную ионосферу. Фактически область выбросов перекрывает установившийся плазмосферный поток ионов, находящиеся ниже ионы опускаются и рекомбинируют в нижней ионосфере, и на их месте образуется область пониженной концентрации. Нижняя граница ионосферной «дыры» определяется высотой, на которой ион-нейтральные соударения нарушают «вмороженность» ионов в геомагнитное поле, и заполнение «дыры» происходит из соседних горизонтальных областей.

До настоящего момента мы рассматривали режим измерений профиля мощности, который используется для определения электронной концентрации на основе эффекта Фарадея. В экспериментах по программе «Радар–Прогресс» второй канал спектральных измерений часто использовался для исследований по новым методикам, однако в первых экспериментах использовался режим стандартных спектральных измерений методом НР. В этих измерениях мощность рассеяния была существенно выше, поскольку использовался длинный прямоугольный импульс ~750 мкс, обеспечивающий необходимое частотное разрешение. Однако разрешить эффекты КЭ по высоте в этом режиме сложнее, так как зондирующий импульс занимает ~110 км на развертке дальности радиолокационного сигнала. В данном случае продукты горения должны заполнить не только горизонтальное сечение ДН, но и весь высотный интервал ~110 км, который формирует сигнал НР.

Чтобы продемонстрировать ионосферные вариации, которые могут регистрироваться в канале спектральных измерений, рассмотрим эксперименты 19 и 21 сентября 2007 г., в которых эффект образования «дыры» ионизации однозначно наблюдался в канале измерения фарадеевского вращения. Необходимо заметить, что регистрация сигналов НР в канале профиля мощности и в канале спектральных измерений проводится на разных частотах и по принципу частотного сканирования, используемому на ИРНР, лучи ДН в двух режимах разнесены в пространстве на несколько градусов (см. рис. 1). По этой причине эффект может наблюдаться в одном канале и не наблюдаться в другом.

На рис. 5 приведена динамика ионосферных вариаций в эксперименте 19.09.2007. Сверху вниз показаны вариации электронной концентрации, электронной температуры, ионной температуры и процентное

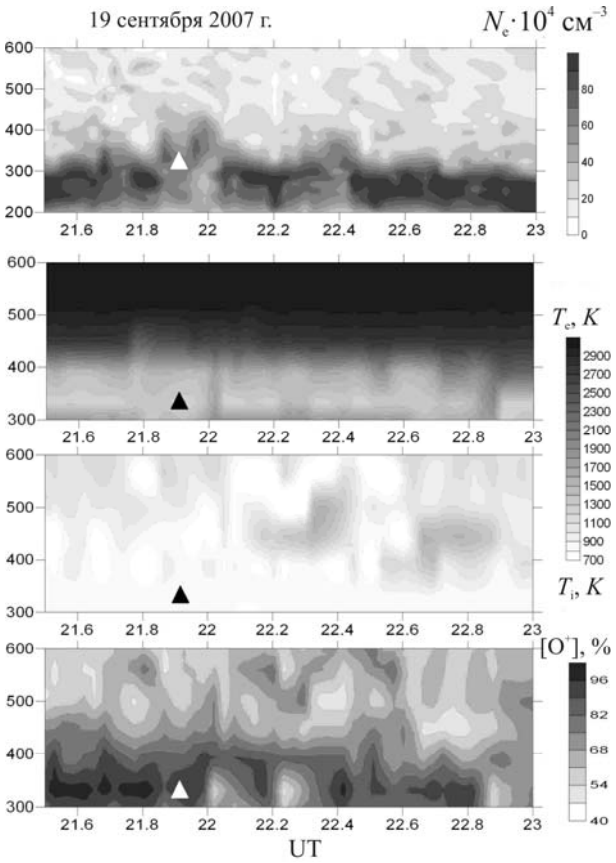

Рис. 5. Сверху вниз: вариации электронной концентрации, электронной температуры, ионной температуры и ионного состава в эксперименте 19 сентября 2007 г.

отношение ионов в плазме. На рассматриваемых высотах плазма состоит только из ионов атомарного кислорода и атомарного водорода, и градациями серого на рис. 5 показан процентный состав ионов [O^+] к полной концентрации ионов. Провал ионизации на высотах 300–350 км явно наблюдается в вариациях N_e, однако присутствие вариаций совсем не очевидно в вариациях остальных параметров. В вариациях температуры электронов (T_e) и ионов (T_i) к эффекту можно было бы отнести небольшое, почти синхронное повышение на высотах 300–400 км после 22 UT. В вариациях концентрации [O^+] для рассматриваемого интервала времени можно отнести небольшое уменьшение на высотах 500–550 км, что соответствует механизму притока ионов H^+ из плазмосферы, т. е. если эффекты и присутствуют в данных по T_e и T_i, то они малы по сравнению с эффектом изменения N_e.

Другой тип реакции ионосферы представлен на рис. 6 для эксперимента 21.09.2007, когда в период образования провала ионизации наблюдались также и вариации в спектрах некогерентного рассеяния. В данном эксперименте спустя несколько минут после выключения ЖРД проявились сначала небольшое уменьшение T_i на высотах 450–550 км, а затем положительные вариации T_i и T_e на высотах 400–500 км, вероятно связанные с притоком более теплой водородной плазмы из плазмосферы. Наиболее интересная реакция в данном эксперименте наблюдалась в вариациях парциального состава [O^+], когда в течение получаса область повышенного содержания ионов H^+ опускалась до высот ~350 км.

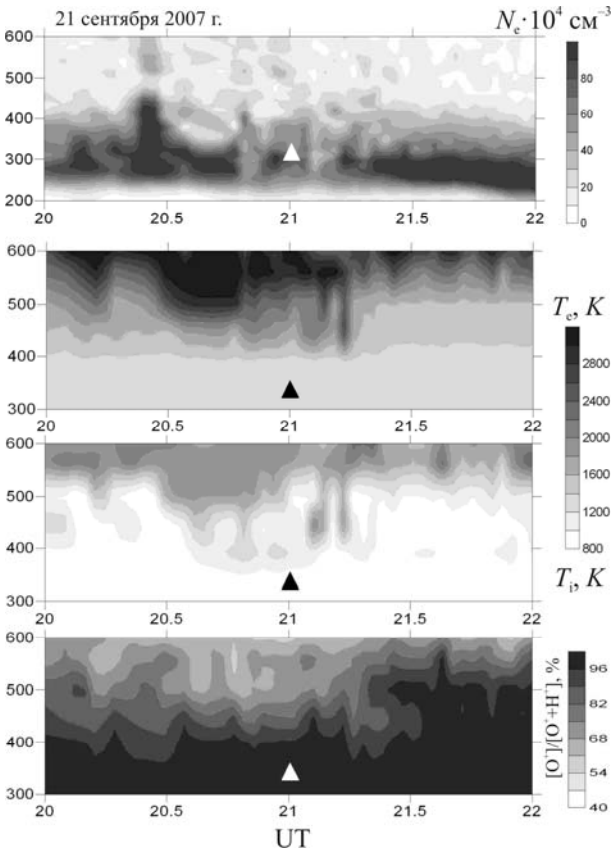

Рис. 6. Сверху вниз: вариации электронной концентрации, электронной температуры, ионной температуры и ионного состава в эксперименте 21 сентября 2007 г.

Этот эффект хорошо демонстрирует описанный выше механизм заполнения «дыры» ионизации ионами водорода из плазмосферы с последующей передачей заряда вследствие реакции резонансной перезарядки $O+H^+ \rightarrow O^+ + H$. Поскольку скорость этой реакции невелика, поток протонов из внешней ионосферы, который заполняет область ионосферной «дыры», создает на высотах максимума ионизации регион с высоким процентным содержанием ионов H^+. Этот регион существует намного дольше, чем существует сама «дыра» ионизации.

Подобный эффект наблюдался также в сентябрьском эксперименте 2008 г., когда для регистрации использовались два разнесенных луча ДН. На рис. 7 приведены вариации электронной концентрации и ионного состава во время эксперимента 04.09.2008. Треугольниками на графиках обозначены высота и время включения двигателей ТГК. В проводимых экспериментах формировались два слабо разнесенных луча ДН, причем большая частота соответствует большему наклону ДН к югу (нижний луч). Относительные вариации параметров ионосферы на двух лучах позволяют судить о пространственном распределении области неоднородностей. Вариации электронной концентрации на рисунках носят спорадический характер вследствие низкого отношения сигнал/шум, поэтому сделать однозначный вывод о степени уменьшения N_e в данном эксперименте весьма проблематично. Однако вследствие гораздо большей мощности, излучаемой длинным импульсом в канале спектральных измерений, вариации ионного состава позволяют проследить ярко выраженную область увеличенной концентрации H^+ на 20–25 %, которая наблюдается выше зоны выброса продуктов горения и затем опускается вниз, т. е. это такой же эффект, как на рис. 5, но вариации ионного состава здесь сильнее выражены, и эффект наблюдается более получаса.

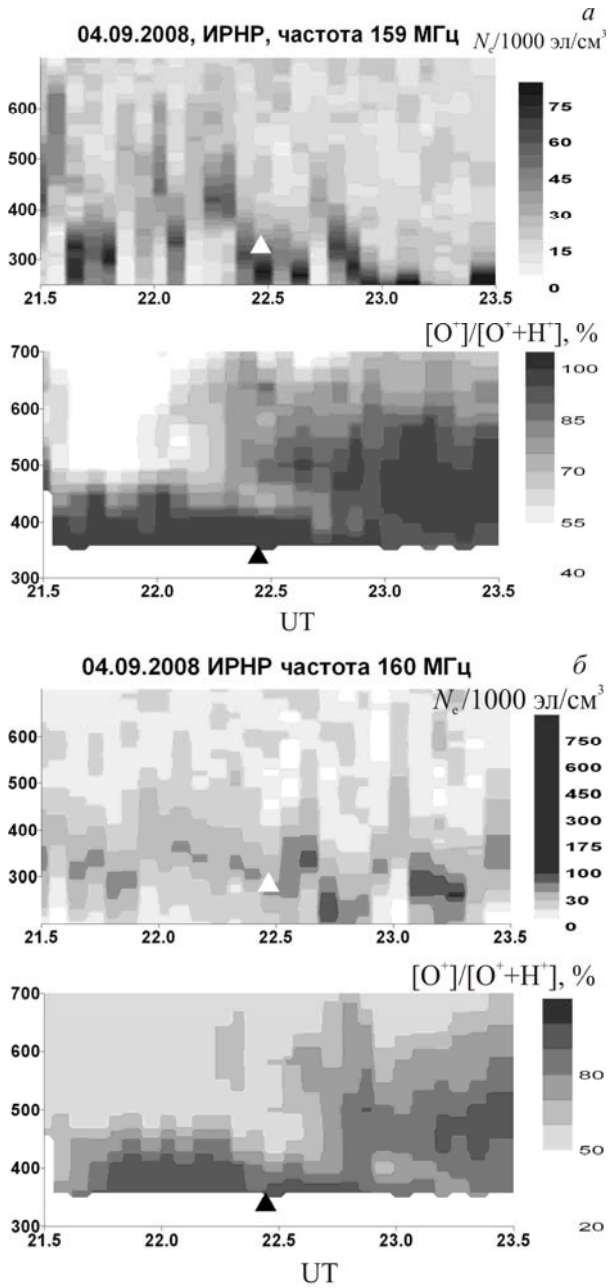

Рис. 7. Вариации ионного состава после пролета ТГК: *а* — верхний луч; *б* — нижний луч. Область высокого содержания ионов H^+ опускается в течение получаса

В данном эксперименте выхлопная струя из двигателей ТГК была направлена на север, но более выраженная реакция наблюдалась на южном луче. Такой эффект появляется, вероятно, вследствие преобладающего меридионального ветра, который ночью на средних широтах обычно направлен на юг. Скорость преобладающего меридионального ночного ветра на средних широтах может составлять 30–50 м/с [Kazimirovsky et al., 1988; Вергасова, Казимировский, 1994]. Таким образом, несмотря на северное направление струи выброса, область неоднородностей, обусловленная выбросами, дрейфует к

югу и наибольшее понижение концентрации O^+ наблюдается на южном луче, причем в некоторые моменты времени это понижение составляет ~40 %. По вариациям ионного состава на рис. 7 можно оценить, что область повышенной концентрации H^+ смещается вниз со скоростью ~35 м/с (перемещение на ~100 км за ~45 мин). Неожиданным по сравнению с предыдущими экспериментами и с результатами работ [Bernhardt et al., 1998, 2001] является большое время существования неоднородностей ионного состава. Вероятнее всего, это обусловлено вмороженностью ионов водорода в геомагнитное поле, которое дает им возможность долго оставаться в пределах ДН ИРНР. В серии экспериментов 2008 г. аналогичный эффект был зафиксирован 06.09.2008, когда выброс из ЖРД также производился на север, но по степени реакции ионосферы на этот выброс эффект оказался значительно слабее. Следует заметить, что эффект существования области с высоким содержанием ионов водорода может быть реализован только в условиях низкой солнечной активности, когда граница перехода $[O^+]/[H^+]$ в ночное время опускается до высоты 500–600 км. В дневной ионосфере и при высокой солнечной активности «дыру» ионизации заполнят ионы кислорода, которые составляют ионосферу до высоты 1000 км и более, так что различить основные и пришедшие ионы будет невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа имела целью систематизацию результатов ионосферных исследований, полученных при проведении экспериментов по программе «Радар–Прогресс». Важно было установить как характерные ионосферные эффекты, связанные с работой ЖРД, так и причины низкой повторяемости успешных экспериментов. Подводя итоги исследований искусственных ионосферных возмущений, можно констатировать следующие основные особенности проводимых экспериментов.

1. При существующей ДН ИРНР для проведения активных КЭ достаточно серьезной проблемой является соответствие параметров орбиты ТГК и траектории выбросов продуктов горения ракетного топлива геометрии области зондирования, определяемой ДН радара. Эта задача имеет несколько неопределенных параметров:

а) форма струи выбросов ТГК и скорость ее распространения;

б) процент частиц выбросов, превращающихся в водяной и углекислый лед и не участвующих в реакции с ионами атомарного кислорода ионосферы;

в) степень перекрытия поперечника ДН ИРНР продуктами горения, которая в большой степени определяет наличие отклика в измерениях методом НР;

г) величина нейтрального термосферного ветра в области выброса, который выносит выхлопную струю из ДН ИРНР.

2. Недостаточный потенциал ИРНР (мощность, частота повторения импульсов) для проведения измерений сигналов НР двумя лучами с временным разрешением 1–3 мин, что необходимо для данного типа исследований.

3. Большая высота орбиты ТГК в экспериментах после 2009 г., что сильно уменьшило степень заполнения ДН и соотношение сигнал/шум в эксперименте.

Несмотря на указанные проблемы при реализации активных КЭ, в них удалось подтвердить возможность формирования локальной «дыры» ионизации, характеристики которой согласуются с результатами проведенных ранее исследований [Bernhardt et al., 1998, 2001]. Размер области провала ионизации составляет ~100 км по вертикали вдоль направления линий геомагнитного поля, и время существования «дыры» ионизации составляет 10–20 мин.

По сравнению с предшествующими результатами ионосферных исследований по программе «Радар–Прогресс», о которых сообщалось в работах [Хахинов и др., 2012, 2013], в настоящей работе впервые рассмотрены случаи наблюдения вариаций температуры плазмы, а также интересный и малоизученный эффект образования на месте «дыры» ионизации области с высоким содержанием ионов H^+. Образующаяся неоднородность ионного состава обладает гораздо большим временем жизни, чем сама «дыра» ионизации (более получаса), что может быть использовано при моделировании для оценки скоростей химических реакций, протекающих на разных высотах ионосферы.

Хотя основной целью эксперимента «Радар–Прогресс» было исследование характеристик радиолокационных сигналов от ТГК, его часть, связанная с исследованием ионосферных откликов, также имеет определенную научную ценность и практическую значимость для понимания сути происходящих физических явлений и планирования будущих активных экспериментов.

Работа выполнена на уникальной научной установке «Иркутский радар некогерентного рассеяния» (рег. номер 01-28) в рамках проекта II.16.1.2 Программы фундаментальных научных исследований РАН, а также поддержана грантом РФФИ № 15-05-05387 и грантом № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вергасова Г.В., Казимировский Э.С. Крупномасштабные вариации преобладающего ветра в нижней термосфере // Изв. АН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30, № 1. С. 31–38.

Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В. и др. Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 11. С. 1339–1345.

Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 1984. 187 с.

Лебедев В.П., Хахинов В.В., Габдуллин Ф.Ф. и др. Исследование методами радиозондирования характеристик плазменного окружения низкоорбитальных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 1 (50). С. 51–60.

Медведев А.В., Заворин А.В., Кушнарев Д.С., Шпынев Б.Г. Модернизация аппаратно-программного комплекса Иркутского радара НР. Основные элементы новой многоканальной системы регистрации // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 5. С. 107–110.

Платов Ю.В., Семенов А.И., Филиппов Б.П. Сублимация ледяных частиц в условиях верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 3. С. 419–423.

Платов Ю.В., Семенов А.И., Филиппов Б.П. Сублимация твердой углекислоты в условиях верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 3. С. 416–420.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Радиофизические методы диагностики ионосферных возмущений, генерируемых бортовыми двигателями ТГК «Прогресс»: алгоритмы, инструменты и результаты // Росс. науч. конф. «Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой». 06–10.09.2010, Улан-Удэ: сб. докладов. 2010. С. 553–569. URL: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/s2_35.pdf (дата обращения 17 ноября 2016 г.).

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Результаты дистанционного зондирования ионосферных возмущений в активных космических экспериментах «Радар–Прогресс» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 199–208.

Хахинов В.В., Потехин А.П., Лебедев В.П. и др. Некоторые результаты активных космических экспериментов «Плазма–Прогресс» и «Радар–Прогресс» // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. 2013. Спец. вып. 5 (51). С. 160–163.

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. Geophys. Res. 1998. V. 103, N A2. P. 2239–2251.

Bernhardt P.T., Huba J.D., Kudeki E., et al. Lifetime of a depression in the plasma density over Jicamarca produced by space shuttle exhaust in the ionosphere // Radio Sci. 2001. V. 36, N 5. P. 1209–1220.

Kazimirovsky E.S., Manson A.H., Meek C.E. Winds and waves in the middle atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1988. V. 50, N 3. P. 243–250.

Khakhinov V.V., Shpynev B.G., Lebedev V.P., et al. Radiosounding of ionospheric disturbances generated by exhaust streams of the transport spacecraft “Progress” engines // The 32nd Progress in Electromagnetics Research Symposium. The Electromagnetics Academy, 2012. P. 1168–1171.

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., et al. Active space experiments with the use of the transport spacecraft “Progress” and Irkutsk IS Radar // The 26nd Progress in Electromagnetics Research Symposium. 2009. P. 223–227.

Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // Radio Sci. 2004. V. 39, N 3. RS3001. DOI: 10.1029/2001RS002523.

Wu B.J.C. Possible water vapor condensation in rocket exhaust plume // American Institute of Aeronautics and Astronautics J. 1975. V. 13, N 6. P. 797–802.

REFERENCES

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. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, no. A2, pp. 2239–2251.

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 Sci.* 2001, vol. 36, no. 5, pp. 1209–1220.

Kazimirovsky E.S., Manson A.H., Meek C.E., Winds and waves in the middle atmosphere. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1988, vol. 50, no. 3, pp. 243–250.

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Shpynev B.G., Zarudnev V.E., Alsatkin S.S., Ratovsky K.G., Podlesny A.V., Bryn’ko I.G. Radiophysical methods of diagnostics of ionospheric disturbances generated by board engines of TCS “Progress”: Algorithms, instruments and results. *Rossiiskaya nauchnaya konferentsiya “Zondirovanie zemnykh pokrovov radarami s sintezirovannoi aperturoi”* [National Scientific Conference “Sounding of earth surface by radars with synthetic aperture”]. Ulan-Ude, September 6–10, 2010: Proc. 2010, pp. 553–569. (In Russian). URL: http://jre.cplire.ru/jre/library/Ulan-Ude-2010/pdffiles/s2_35.pdf (accessed November 17, 2017).

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Alsatkin S.S., Ratovsky K.G., Kushnarev D.S., Tverdokhlebova E.M., Kurshakov M.Yu., Manzhelei A.I., Timofeeva N.I. Results of remote sounding of ionospheric disturbances in active space experiments “Radar–Progress”. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth From Space]. 2012, vol. 9, no. 3, pp. 199–208. (In Russian).

Khakhinov V.V., Shpynev B.G., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S., Khabituev D.S. Radiosounding of ionospheric disturbances generated by exhaust streams of the transport spacecraft “Progress” engines. *The 32nd Progress in Electromagnetics Research Symposium*. The Electromagnetics Academy Publ., 2012, pp. 1168–1171.

Khakhinov V.V., Potekhin A.P., Lebedev V.P., Kushnarev D.S., Alsatkin S.S. Some results of active space experiments “Plasma–Progress” and “Radar–Progress”. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni M.F. Reshetnev*a [Bull. of M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University]. 2013, special iss. 5 (51), pp. 160–163. (In Russian).

Krinberg I.A., Taschilin A.V. *Ionosfera i plazmosfera* [Ionosphere and plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 187 p. (In Russian).

Lebedev V.P., Gabdullin F.F., Khakhinov V.V., Korsun A.G., Tverdokhlebova E.M., Laletina E.A., Manzhelei A.I. Reseach into characteristics of plasma surrounding of low-orbit spacecraft by radio sounding methods. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering]. 2008, no. 1 (50), pp. 51–60. (In Russian).

Medvedev A.V., Zavorin A.V., Kushnarev D.S., Shpynev B.G. Modernization of hardware-software complex of Irkutsk Incoherent Scatter Radar. The basic elements of new multi-channel registration. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Phys.]. 2004, iss. 5, pp. 107–110. (In Russian).

Platov Yu.V., Semenov A.I., Filipov B.P. Sublimation of ice particles in upper atmosphere conditions. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2004, vol. 44, no. 3, pp. 419–423. (In Russian).

Platov Yu.V., Semenov A.I., Filippov B.P. Sublimation of carbon dioxide ice particles in upper atmosphere conditions // *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2005, vol. 45, no. 3, pp. 416–420. (In Russian).

Potekhin A.P., Khakhinov V.V., Medvedev A.V., Kushnarev D.S., Lebedev V.A., Shpynev B.G. Active space experiments with the use of the transport spacecraft “Progress” and Irkutsk IS Radar. *The 26tn Progress in Electromagnetics Research Symposium*. 2009, pp. 223–227.

Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization. *Radio Sci*. 2004, vol. 39, no. 3, RS3001. DOI: 10.1029/2001RS002523.

Vergasova G.V., Kazimirovsky E.S. The large scale variation of dominant wind in lower thermosphere. *Izvestiya AN. FAO.* [Izvestiya. FAO]. 1994, vol. 30, no. 1, pp. 31–38. (In Russian).

Wu B.J.C. Possible water vap or condensation in rocket exhaust plume. *American Institute of Aeronautics and Astronautics J.* 1975, vol. 13, no. 6, pp. 797–802.

Zherebtsov G.A., Zavorin A.V., Medvedev A.V., Nosov V.E., Potekhin A.P., Shpynev B.G. Irkutsk Incoherent Scatter Radar. *Radiotekhnika i Elektronika* [J. Communications Technology and Electronics]. 2002, vol. 47, no. 11, pp. 1339–1345. (In Russian).