

## References

1. Kalinnikov V. V., Khutorova O. G., Teptin G. M. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana, 2012. Vol. 48, no. 6, p. 705–713.
2. Cheng S., Perissin D., Lin H., Chen F. Atmospheric delay analysis from GPS meteorology and InSAR APS, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, vol. 86, pp.71–82.
3. Afraimovich E. L. [and oth.] Seismoionosfernye i seismoelektromagnitnye processy v Baikal'skoy riftovoy

zone (Seismoionosfernye seismoelektromagnitnye and processes in the Baikal Rift Zone). Edited by G. A. Zherebtsov. Russ. Acad. of Sciences, Siberian Div., Inst. of Solar-Terr. Physics. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2012. 304 p.

4. Tsydypov Ch. Ts. Rasprostraneniye ultrakorotkih radiovoln v goristoy mestnosti (Distribution of ultrashort radio waves in the mountainous terrain). Novosibirsk, Nauka, 1977, 208 p.

© Башкуев Ю. Б., Дембелов М. Г.,  
Лухнев А. В., Саньков В. А., 2013

УДК 537; 629.784; 533.95

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ПЛАЗМА-ПРОГРЕСС» И «РАДАР-ПРОГРЕСС»\*

В. В. Хахинов, А. П. Потехин, В. П. Лебедев, Д. С. Кушнарев, С. С. Алсаткин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126а. E-mail: khakhin@iszf.irk.ru

*Проведены активные космические эксперименты по исследованию возмущений в ионосфере, генерируемые выхлопными газами двигателей космических аппаратов. Основные результаты, полученные методом некогерентного рассеяния, показали, что небольшие массы выхлопных газов вызывают снижение электронной концентрации до 40 % в областях с размерами десятки километров и временами существования до 20 минут.*

*Ключевые слова: ионосфера, электронной концентрация, активные космические эксперименты, космические аппараты, Иркутский радар некогерентного рассеяния*

## SOME RESULTS OF "PLASMA-PROGRESS" AND "RADAR-PROGRESS" ACTIVE SPACE EXPERIMENTS

V. V. Khakhinov, A. P. Potekhin, V. P. Lebedev, D. S. Kushnarev, S. S. Alsatkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Russian Academy of Sciences Siberian branch  
126a Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russia. E-mail: khakhin@iszf.irk.ru

*We carried out active space experiments for studying ionospheric disturbances generated by spacecraft engine exhaust. Incoherent scatter results showed that the small mass of the exhaust gases causes a decrease in the electron density up to 40 % with tens of kilometers in sizes and with up to 20 minutes in lifecycle.*

*Keywords: ionosphere, electron density, active space experiments, spacecraft, Irkutsk incoherent scatter radar.*

Начиная с 2007 г. ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королева, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» и Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) проводят активные космические эксперименты (КЭ) «Радар-Прогресс» (до 2010 г. «Плазма-Прогресс») по исследованию пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений, генерируемые высокоскоростной выхлопной струей жидкостных реактивных двигателей (ЖРД) транспортного грузового корабля (ТГК) серии «Прогресс». ТГК привлекаются к участию в КЭ в режиме автономного полета на высоте ~350–400 км

после отстыковки от международной космической станции. Используется наземный комплекс оптико-электронных и радиофизических инструментов ИСЗФ СО РАН. Основным исследовательским инструментом является Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [1].

Сеансы КЭ проводятся во время нахождения ТГК «Прогресс» в основном лепестке диаграммы направленности (ДН) ИРНР при определенном сочетании известных условий, таких как: гелио-геофизические обстановка, тип ЖРД, координаты ТГК, положение Солнца, направление скорости выхлопной струи ЖРД. К настоящему времени выполнено 12 сессий, в течение которых проведено 63 сеанса.

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (Государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашения № 8388 и 8699) и РФФИ (гранты № 13-05-00456-а и 13-0200957-а).

Длительность пролета ТГК в основном лепестке ДН составляет 15–20 с. Включались или одновременно 8 двигателей причаливания и ориентации с суммарным расходом топлива 376 г/с или один сближающе-корректирующий двигатель (СКД) с расходом 1 кг/с. Длительность работы варьировалась от 5 до 11 с.

Направления скорости выхлопной струи: по направлению движения ТГК («на торможение»); против направления движения ТГК («на ускорение»); на север в плоскости местного горизонта ТГК («на север»); навстречу радиолучу ИРНР («на РНР»).

С целью восстановления фоновых значений ионосферы ИРНР включается за несколько часов до сеанса КЭ. Для исследования пространственно-временных характеристик ионосферных возмущений вызванных высокоскоростной выхлопной струей ЖРД измерения на ИРНР продолжаются в течение нескольких часов после пролета ТГК. ИРНР работает в штатном режиме измерений высотного профиля электронной концентрации  $Ne(h)$  методом некогерентного рассеяния [1].

Отличительной особенностью КЭ «Плазма-Прогресс» и «Радар-Прогресс» является слабое техногенное воздействие на ионосферную плазму. В одном сеансе сжигается от 2 до 11 кг ракетного топлива. Выхлопная струя инжектируется в ионосферу на дуге орбиты ТГК до 90 км. Исследование отклика ионосферной плазмы на выбросы малых масс выхлопных газов представляет особый интерес. Изучаются процессы образования и эволюции, динамические характеристики искусственно создаваемых ионосферных возмущений в заданном месте и известное время. Результаты КЭ важны для разработки теоретических и математических моделей выхлопной струи ЖРД, процессов взаимодействия ее с ионосферной плазмой, проверки самих ионосферных моделей.

Уже первые сеансы КЭ «Плазма-Прогресс» выявили значимые эффекты воздействия малых масс выхлопных газов на ионосферную плазму [2]. После включения ЖРД в ионосфере образуется область пониженной концентрации электронов, своеобразная

«дыра», которая увеличивается по мере распространения продуктов выброса. Параметры «дыры» зависят от геометрии эксперимента, типа ЖРД, уровня фоновой концентрации электронов и массы инжектированных газов.

Наиболее эффективным для КЭ является направление выхлопной струи «на РНР», практически совпадающее с силовой линией геомагнитного поля. Например, 20.09.2007 г. при включении СКД с направлением выхлопной струи «на РНР» и расходом топлива 5,1 кг образовалась «дыра» с высоты орбиты ТГК (350 км) до 250 км с пониженной (до 40 % от фоновой) электронной концентрацией [2]. Время существования возмущения составило 20 мин.

Первые результаты КЭ показали прямую связь амплитуды возникающих неоднородностей от типа включаемого ЖРД: при включении более мощного СКД масштабы «дыры» были больше. Поэтому начиная с 2009 г. включается только СКД.

Результаты КЭ, полученные в 2008 и 2009 гг. подтвердили зависимость параметров «дыры» от уровня фоновой ионосферы. Это были годы затянувшегося минимума солнечной активности и низкого уровня фоновой  $Ne(h)$ . После включения ЖРД возникали очень слабые возмущения, регистрация которых затруднена из-за технических возможностей ИРНР.

Несколько неожиданным результатом стал тот факт, что в сеансах со схожими условиями КЭ (тип ЖРД, масса и направление инжекции выхлопных струй, время включения и длительность работы СКД) регистрировались совершенно разные по масштабам ионосферные возмущения. Обсудим это на примере проведенных измерений  $Ne(h)$  в сентябре 2010 г., когда во всех сеансах направление выхлопных струй было «на север».

$Ne(h)$  до и после работы СКД представлены на рис. 1. Максимальное снижение электронной концентрации 1.09.2010 г. составило ~40 % (рис. 1, а) и ~30 % 4.09.2010 г. (рис. 1, б).

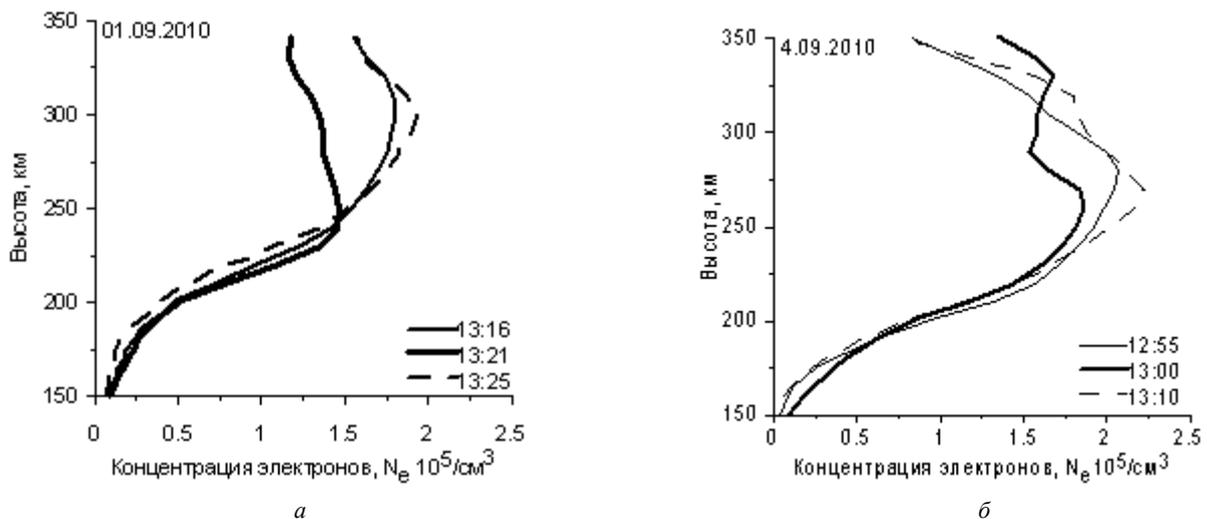


Рис. 1. Динамика  $Ne(h)$  при включении СКД «на север»: а – в 13:20:02 UT, расход топлива 7,5 кг; б – в 12:59:30 UT, расход топлива 7,44 кг

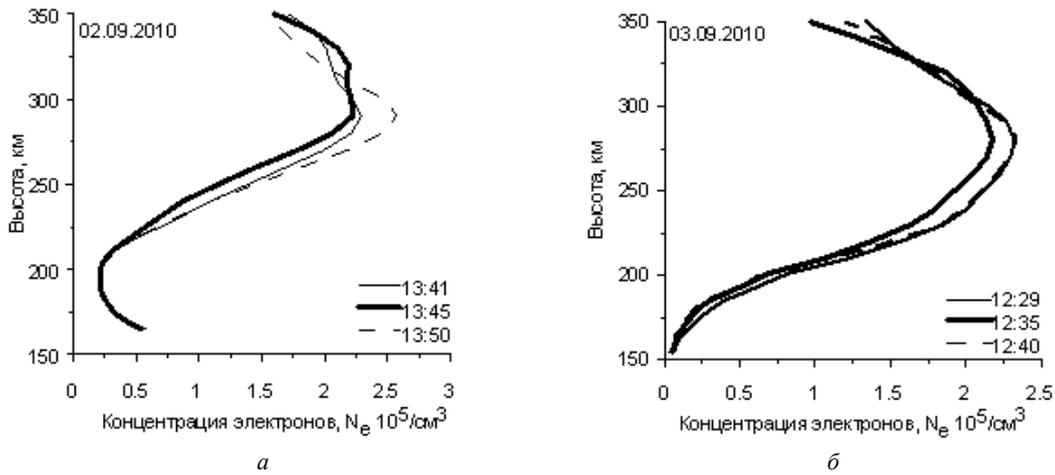


Рис. 2. Динамика  $Ne(h)$  при включении СКД «на север»:  
 а – в 13:44:57 UT, расход топлива 7,0 кг; б – в 12:34:42 UT, расход топлива 7,44 кг

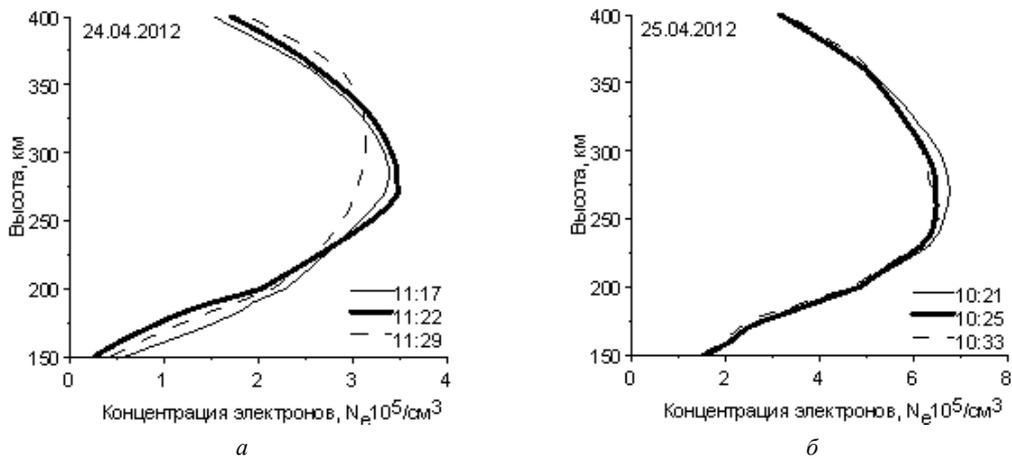


Рис. 3. Динамика  $Ne(h)$  при включении СКД «на РНР»:  
 а – в 11:19:22 UT, расход топлива 9,0 кг; б – в 10:23:55 UT, расход топлива 9,0 кг

На рис. 2 представлены  $Ne(h)$  при тех же условиях КЭ, что и на рис. 1. Различия между  $Ne(h)$  до и после включения СКД лежат в пределах статистической погрешности измерений.

В последние годы условия проведения КЭ ухудшаются из-за постоянного подъема орбиты МКС, а значит и ТГК «Прогресс». Если в 2007 г. средняя высота орбиты составляла 340 км, то в марте 2013 г. ее подняли до 410,4 км. А высота расположения максимума электронной концентрации располагается на высотах от 250 до 350 км (315 км в сеансе 20.09.2007 г. и 280 км 24.04.2012 г.). Получается, что в последних сеансах КЭ СКД включается на высотах, где электронная концентрация в 1,5–2 раза ниже, чем максимальное значение  $Ne(h)$ . Вследствие этого регистрируются или слабые ионосферные возмущения, или их не удается диагностировать (рис. 3). По результатам 2012 г. принято решение перед проведением КЭ снижать орбиту ТГК до высот 300–350 км.

Результаты проведенных сеансов КЭ показали, что выбросы небольших масс выхлопных газов могут генерировать отрицательные возмущения электронной концентрации с размерами десятки км и временами

существования от 10 до 20 мин. Амплитуды вариаций параметров ионосферных возмущений достигали от 20 до 40 % от фоновых значений. Наблюдаемость и параметры возмущений зависят от гелио-геофизических условий, ионосферных процессов, массы и направления скорости выхлопных струй. Наибольшие масштабы ионосферных возмущений наблюдались в сеансах при включении более мощного СКД и направлением выхлопных струй «на РНР», почти параллельным магнитным силовым линиям.

#### Библиографические ссылки

1. Потехин А. П., Медведев А. В., Заворин А. В. и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования, 2008. Т. 46, № 4. С. 356–362.
2. Радиофизические методы диагностики ионосферных возмущений, генерируемые бортовыми двигателями ТГК «Прогресс»: алгоритмы, инструменты и результаты / В. В. Хахинов, А. П. Потехин, В. П. Лебедев и др. // Журнал Радиоэлектроники. 2010. С. 555–571.