

Effects of Rocket Engine Burns in Geospace

L. F. Chernogor, V. T. Rozumenko

Kharkiv V. N. Karazin National University, 4 Svoboda Square, 61022 Kharkiv, Ukraine

Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Введение. Исследованию физических процессов, вызванных стартами ракет (СР) и полётами космических аппаратов (КА), посвящено большое количество работ (см., например, [1]). Как правило, публикации посвящены описанию эффектов, регистрируемых вдоль активного участка траектории ракеты. Отличительной особенностью наших работ является исследование физических процессов в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ), вызванных удалёнными на $\sim 1 - 10$ тыс. км СР [2, 3]. Проанализированы эффекты примерно 5 тыс. СР, среди которых были и аварийные (32 событие), а также посадки КА типа Space Shuttle (54 события) и падений орбитальных станций (4 события).

Основные процессы. В ходе исследований установлено, что СР и полёты КА сопровождаются тепловым, динамическим, химическим, акустическим и электромагнитным воздействиями на подсистемы системы ЗАИМ. В результате такого воздействия в системе возникает целый комплекс физических, химических, оптических и других процессов. Схема, иллюстрирующая основные процессы в системе ЗАИМ, приведена на рис. 1. Видно, что СР и полёты КА сопровождаются возмущениями геофизических полей, атмосферно-ионосферного канала связи, изменениями условий распространения радиоволн различных диапазонов и вариациями их характеристик.

Для диагностики возмущений использовался арсенал радиофизических, оптических, магнитометрических и других методов. Средства диагностики размещены в Радиофизической обсерватории (РФО) Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина ($49^\circ 38' \text{N}$, $36^\circ 20' \text{E}$).

Диагностика возмущений при помощи метода частичных отражений (ЧО) [2 – 4]. Метод эффективен для обнаружения возмущений на высотах $z \approx 50 - 100$ км. Эффекты, сопровождающие СР, существенно зависели от времени суток, состояния нижней ионосферы и космической погоды. Их можно разделить на две группы: апериодические и квазипериодические. Аperiодические всплески интенсивности ЧО сигналов возникали в нижней ионосфере (чаще на высотах 80 – 90 км) со временем запаздывания $\Delta t_1 \approx 3 - 10$ мин, причём Δt_1 почти не зависело от расстояния между космодромом и РФО. Длительность всплесков составляла $\sim 1 - 10$ мин. Причиной появления таких всплесков, скорее всего, является высыпание электронов из магнитосферы с энергией $\sim 10 - 10^2$ кэВ и плотностью потока $10^7 - 10^9 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Квазипериодические возмущения имели кажущиеся скорости распространения $v \approx 0.3$ км с^{-1} и период $T \approx 10 - 20$ мин. Такие параметры свойственны акустико-гравитационным волнам (АГВ).

Диагностика возмущений при помощи метода доплеровского зондирования [2, 5 – 10]. Доплеровский ВЧ радар применяется для исследования средней ионосферы путём стробирования по высоте в диапазоне 100 – 400 км. СР сопровождались генерацией (усилением, реже ослаблением) волновых возмущений (ВВ) в ионосфере. Скорость $v \approx 0.3 - 0.7$ км с^{-1} на высоте $z \approx 100 - 300$ км, период волн $T \approx 15 - 30$ мин, продолжительность цуга — 1 – 2 ч. ВВ сопровождались деформацией доплеровских ежеминутных спектров, их "рассыпанием", появлением дополнительных мод и наклонных отражений. Перенос возмущений осуществлялся при помощи АГВ, которые

приводили к модуляции концентрации электронов N с относительной амплитудой $\delta_N \approx 1 - 10\%$. Реже наблюдались ВВ с v около 1 и $0.3 - 0.7 \text{ км с}^{-1}$, которые связаны с генерацией медленных МГД (ММГД) волн.

Диагностика возмущений при помощи метода вертикального зондирования (см., например, [11 – 13]). Данный метод применяется также для изучения средней ионосферы. СР сопровождались квазипериодическими вариациями f_oE и $f_{o,x}F2$ с периодом $T \approx 10 - 30$ мин, продолжительностью $\Delta T \approx 1 - 2$ ч и относительной амплитудой около $1 - 10\%$. Скорость ВВ составляла $0.3 - 0.4 \text{ км с}^{-1}$ для f_oE и $0.5 - 0.6$ (иногда $\sim 0.9 - 1.1$) км с^{-1} для $f_{o,x}F2$. Эпизодически СР сопровождался появлением спорадического слоя E, наклонных отражений в F-области ионосферы и диффузностью ионограмм по частоте и высоте.

Диагностика возмущений при помощи метода некогерентного рассеяния (НР) [2, 8, 9, 14 – 18]. Результаты исследования этим методом не только подтвердили результаты, полученные другими методами, но и позволили получить новые сведения о характере ВВ в широком диапазоне высот ($100 - 600 \text{ км}$). Установлено, что максимальные значения δ_N имеют место на высотах $200 - 300 \text{ км}$. Показано, что, кроме ВВ N , возникают квазипериодические вариации температур электронов и ионов с относительной амплитудой $\sim 1 - 10\%$. Методом НР наблюдались ВВ со скоростями $0.4 - 0.7$ (иногда ~ 1) и $2 - 3 \text{ км с}^{-1}$, периодами $T \approx 20 - 60$ мин и $\Delta T \approx 1 - 3$ ч.

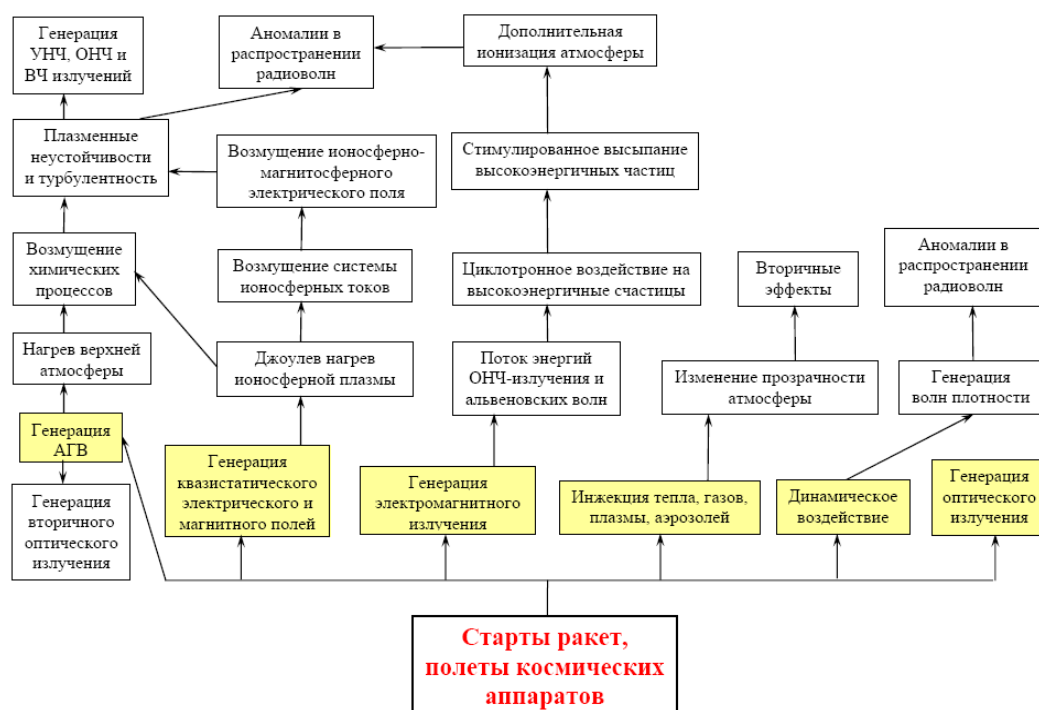


Рис. 1. Основные процессы в системе ЗАИМ при СР и полётах КА.

Геомагнитные эффекты стартов ракет [2, 19 – 24]. Проанализированы временные вариации уровня геомагнитных пульсаций в диапазоне $1 - 1000 \text{ с}$, которые сопровождали СР и полёты КА разных типов с различных космодромов мира в 2002 – 2013 гг. (всего 264 события). Удаления от космодромов составляло $1500 - 9500 \text{ км}$. Проведено спектральное оценивание преобладающих периодов ВВ ($6 - 14$ мин) и

амплитуд спектральных составляющих (1 – 3 нТл), а также статистический анализ. Выявлено три группы скоростей: около 0.6, 1.1 и 2.3 км с⁻¹. Продолжительность ВВ изменялась от 20 – 30 до 60 – 70 мин при увеличении дальности R от 1500 до 9500 км.

Выводы. На основе наблюдений за период 1970 – 2016 гг. нами экспериментально установлено и теоретически объяснено неизвестное ранее явление возникновения аperiodических и квазипериодических глобальных возмущений в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера (ЗАИМ), вызванных стартами ракет и полётами космических аппаратов; определены механизмы взаимодействия подсистем в системе ЗАИМ и типы волн, ответственные за перенос возмущений.

Литература

1. "Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду", под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова, АНКИЛ, М., 2000.
2. Л. Ф. Черногор, "Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет", ХНУ имени В. Н. Каразина, Харьков. 2009.
3. L. F. Chernogor, N. Blaunstein, Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment, Taylor and Francis Group, New York, 2013.
4. K. P. Garmash, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, A. M. Tsymbal, L. F. Chernogor, "Global Ionospheric Disturbances Caused by a Rocket Launch against a Background of a Magnetic Storm", Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 39, No 1, pp. 69 – 75, 1999.
5. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор, "Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 4, № 3, сс. 227 – 246, 1999.
6. V. P. Burmaka, L. S. Kostrov, L. F. Chernogor, "Statistics of Signals of the HF Doppler Radar Sensing the Bottomside Ionosphere Disturbed by Rocket Launches and Solar Terminator", Telecommunications and Radio Engineering, Vol. 61, No 2 – 6, pp. 150 – 177, 2004.
7. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор, "Доплеровское радиозондирование возмущений в E- и F-областях ионосферы при стартах и полетах космических аппаратов", Космічна наука і технологія. ДОДАТОК, Т. 9, № 2, сс. 132 – 143, 2003.
8. В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор, "Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 9, № 1, сс. 5 – 28, 2004.
9. V. P. Burmaka, V. I. Taran, L. F. Chernogor, "Ionospheric Wave Disturbances Accompanied by Rocket Launches against a Background of Natural Transient Processes", Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 44, No 4, pp. 476 – 491, 2004.
10. Л. Ф. Черногор, "Эффекты в геокосмосе, сопутствовавшие стартам группы ракет", Радиофизика и радиоастрономия, Т. 13, № 1, сс. 39 – 53, 2008.
11. Т. Г. Живолуп, Л. Ф. Черногор, "Ионосферные эффекты в течение полета ракеты "Протон": результаты вертикального зондирования", Космічна наука і технологія, Т. 16, № 3, сс. 25 – 31, 2010.

12. Т. Г. Живолуп, Л. Ф. Черногор, "Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты "Союз" в спокойных и магнитовозмущенных условиях", *Космічна наука і технологія*, Т. 16, № 3, сс. 32 – 41, 2010.
13. Л. Ф. Черногор, Т. Г. Живолуп, "Сравнительный анализ ионосферных эффектов в течение полетов ракеты "Протон" при различных состояниях космической погоды", *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 16, № 4, сс. 394 – 403, 2011.
14. В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор, "Радарные наблюдения волновых процессов в ионосфере, сопутствовавших полетам космических аппаратов", *Космічна наука і технологія*, Т. 10, № 5/6, сс. 113 – 117, 2004.
15. В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор, Ю. В. Черняк, "Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет "Союз" и "Протон"", *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 10, № 3, сс. 254 – 272, 2005.
16. V. P. Burmaka, Lysenko V. N., L. F. Chernogor, and Yu. V. Chernyak, "Wave-Like Processes in the Ionospheric F Region That Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site", *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 46, No 6, pp. 742 – 759, 2006.
17. В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор, "Комплексная диагностика ионосферной плазмы, возмущенной удаленными стартами ракет", *Радиофизика и радиоастрономия*, Т. 14, № 1, сс. 26 – 44, 2009.
18. V. P. Burmaka, L. F. Chernogor, "Complex Diagnostics of Disturbances in the Ionospheric Plasma Parameters Far from the Trajectories of Launched Rockets", *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 49, No 5, pp. 637 – 652, 2009.
19. К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Вариации геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам и полетам космических аппаратов", *Космічна наука і технологія*, Т. 13, № 6, сс. 87 – 98, 2007.
20. Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Волновые возмущения геомагнитного поля, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Плесецк", *Космічна наука і технологія*, Т. 14, № 3, сс. 29 – 38, 2008.
21. Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов КНР", *Космічна наука і технологія*, Т. 14, № 4, сс. 92 – 101, 2008.
22. Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с космодромов Мыс Канаверал и Куру", *Космічна наука і технологія*, Т. 14, № 6, сс. 89 – 98, 2008.
23. L. F. Chernogor, "Geomagnetic Field Fluctuations near Kharkov, which Accompanied Rocket Launches from the Baikonur Site", *Geomagnetism and Aeronomy*, Vol. 49, № 3, pp. 384 – 396, 2009.
24. К. П. Гармаш, С. Г. Леус, Л. Ф. Черногор, М. А. Шамота, "Геомагнитные пульсации, сопутствовавшие стартам ракет с различных космодромов мира", *Космічна наука і технологія*, Т. 15, № 1, сс. 31 – 43, 2009.
25. Живолуп Т. Г., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Возмущения критических частот F-области ионосферы, сопровождавшие старты ракеты "Союз" с космодрома Плесецк // *Вістник Національного технічного університету "ХПІ"*. – 2015. – № 35 (1146). – С. 94 – 99.