

Т.Г. ЖИВОЛУП, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы, Харьков
Л.Ф. ЧЕРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф., ХНУ имени В.Н. Каразина

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫХ СТАРТАМИ РАКЕТ “ПРОТОН” И “СОЮЗ”

Представлено результати спостережень за збуреннями в іоносфері, що виникали під час старту та польоту ракет “Протон” та “Союз”. Старти ракет з космодрому Байконур мали місце в 22:31 UT 29 березня 2005 р. та 12:34 UT 25 травня 2004 р. Знайдено часи запізнення та швидкості хвиль, що відповідають за перенесення збурень. Такі швидкості мають повільні МГД або магнітоградієнтні хвилі та внутрішні гравітаційні хвилі. При стартах ракет “Протон” і “Союз” близькими виявилися швидкості поширення збурень.

Представлены результаты наблюдений за возмущениями в ионосфере, которые возникали во время старта и полета ракет “Протон” и “Союз”. Старты ракет с космодрома Байконур произошли 29 марта 2005 г. в 22:31 UT и 25 мая 2004 г. в 12:34 UT. Найдены времена запаздывания и скорости волн, ответственных за перенос возмущений. Такие скорости имеют медленные МГД или магнитоградиентные волны и внутренние гравитационные волны. При стартах ракет “Протон” и “Союз” близкими оказались скорости распространения возмущений.

The results of observations of the disturbances in the ionosphere which arose during launching from Baikonur site and flight of rockets “Proton” and “Soyuz” are presented. The launching from Baikonur site occurred at 22:31 UT on 29 March 2005 and 12:34 UT on 25 May 2004. It is found times of delays and speeds of waves which are responsible for carry of disturbances. Such speeds could be attributed to slow MHD or magneto-gradient waves and internal gravitational waves. At starts of rockets “Proton” and “Soyuz” speeds of the disturbances propagation are almost equal.

Постановка задачи. Эффекты в ионосфере, возникающие при стартах и полетах мощных ракет с работающими двигателями, отличаются многообразием, зависят от типа ракеты и других факторов. Вообще говоря, не существует двух одинаковых реакций на старт двух одинаковых ракет. Поэтому исследование реакции среды на старты и полеты ракет остается актуальной задачей. Особенно интересен сравнительный анализ ионосферных эффектов при старте двух разных ракет: “Протон” и “Союз”.

Анализ литературы. Эффекты стартов ракет (СР) изучаются давно (см., например, монографии [1, 8, 9]). Несмотря на это, до сих пор до конца не поняты механизмы возникающих возмущений, не построены модели физических процессов, имеющих место на значительных (~ 1000 – 10000 км) удалениях от космодромов. Не до конца выявлена роль взаимодействия подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера [5, 7]. Недостаточно изучена зависимость эффектов СР от состояния космической погоды и степени возмущенности геокосмической среды.

В работе [4] проведен сравнительный анализ ионосферных эффектов СР “Союз”. При этом один из стартов имел место в спокойных условиях, а второй – в магнитовозмущенных. В [4] подтверждено, что даже умеренная

магнитная буря может существенно маскировать ионосферные эффекты СР. Не исключается и синергетическое взаимодействие эффектов СР и ионосферных бурь, их взаимное усиление или ослабление.

В данной работе проведен сравнительный анализ ионосферных эффектов при старте двух разных ракет: “Протон” и “Союз”. Как известно, ракета “Протон” примерно в два раза мощнее ракеты “Союз”.

Старты ракет “Протон” и “Союз” с космодрома Байконур произошли 29 марта 2005 г. в 22:31 и 25 мая 2004 г. в 12:34 (здесь и далее время UT).

Первый из них имел место на фоне весьма умеренной (по классификации [5, 7]) магнитной бури, а второй – в относительно спокойных условиях.

Цель статьи – изложение результатов сравнительного анализа ионосферных эффектов, сопровождавших старты ракет “Союз” и “Протон” в спокойных и слабо возмущенных условиях.

Гелиогеофизическая обстановка. День старта ракеты “Союз”, 25 мая 2004 г., был спокойным. Это обстоятельство существенно облегчало выделение возмущений, связанных со стартом ракеты.

Значения индекса AE не превышали 175 нТл. Индекс $D_{stmin} \approx -9.5$ нТл. Значения индекса K_p не превышали 2.

Изменения компоненты B_z межпланетного магнитного поля были в пределах ± 5 нТл.

Увеличение концентрации (от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$), температуры (от 10^5 до $2.4 \cdot 10^5$ К), скорости (от 350 до 550 км/с) и давления (от 1 до 2.5 нПа) солнечного ветра было незначительным. Значения функции Акасофу изменялись от 1 до 9 ГДж/с.

Остальные параметры, описывающие космическую погоду (P_{pr} , P_e , B_t , и H_p) изменялись незначительно.

В качестве фонового дня выбран день 19 мая 2004 г. В день, 19.05.2004 г., состояние космической погоды характеризовалось как спокойное. В частности, индекс K_p принимал значения 1 и 2.

В день старта ракеты “Протон” 29 марта 2005 г. около 18:00 имело место внезапное начало магнитной бури, главная фаза которой продолжалась примерно с 21:00 29 марта до 04:00 31 марта [3].

Буре предшествовало увеличение концентрации частиц, температуры и давления солнечного ветра соответственно от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$, от $5 \cdot 10^4$ до $1.5 \cdot 10^5$ К, от 0.1 до 0.2 нПа. Значения функции Акасофу увеличились до 10 ГДж/с. Компонента B_z межпланетного магнитного поля стала отрицательной примерно в момент наступления внезапного начала. Остальные параметры, описывающие космическую погоду (P_{pr} , P_e , B_t , и H_p) изменились незначительно.

Значения индексов было следующим: $AE_{max} \approx 300$ нТл, $D_{stmin} \approx -30$ нТл, $K_{pmax} = 4$.

Старт ракеты “Протон” пришелся на первые часы главной фазы магнитной бури. Учитывая, что согласно классификации, эта буря относилась к весьма умеренным, можно надеяться, что она не повлияла существенно на состояние ионосферы. Это облегчило поиск и идентификацию эффектов, связанных со стартом ракеты “Протон”.

В качестве фоновых суток выбраны сутки 28 марта. В ночь с 28 на 29 марта состояние космической погоды характеризовалось как спокойное. В частности, индекс K_p принимал значения 0 и 1.

Средства и методы наблюдения. Наблюдение за состоянием ионосферы осуществлялось при помощи модифицированного ионозонда “Базис”. Ионозонд Института ионосферы НАН и МОНМС Украины расположен в ионосферной обсерватории ($49^{\circ} 36' \text{ с.ш.}, 36^{\circ} 18' \text{ в.д.}$) вблизи г. Харькова. При вертикальном зондировании диапазон частот составляет 0.3 – 2.0 МГц, выходная мощность – 10 кВт, длительность излучаемых импульсов – 100 мкс, частота следования импульсов – 3.125 – 25 Гц. Ионограммы снимались с частотой 1 ионограмма в 15 мин. Погрешность отсчета критических частот F-области ионосферы ($f_{o,x}F2$) – 0.05 МГц.

Результаты наблюдений. Анализ *f*-графиков, полученных 29 – 30 марта 2005 г. Временные зависимости критических частот $f_oF2(t)$ и $f_xF2(t)$ показаны на рис. 1 и 2. Из рис. 1 видно, что за сутки до СР в ночь с 28 на 29 марта 2005 г. значения f_oF2 в интервале времени 21:00 – 01:00 изменялись незначительно. С 01:00 до 02:30 имело место падение f_oF2 , а затем ее рост. Это связано с предвосходными и восходными эффектами в ионосфере.

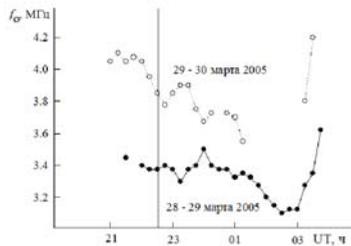


Рис. 1. Зависимость f_oF2 от времени в фоновый период (точки) и в период СР (кружки). На этом и следующих рисунках вертикальной линией показан момент запуска ракеты

В ночь с 29 на 30 марта 2005 г., т.е. в период СР, поведение f_oF2 было иным (см. рис. 1). Непосредственно перед СР наблюдалось некоторое (примерно на 0.2 МГц) уменьшение f_oF2 . Оно продолжалось и первые 15 мин после СР. Затем начался рост f_oF2 от 3.75 до 3.9 МГц. Рост продолжался в течение 45 мин. После 23:30 он сменился непродолжительным (около 30 мин) уменьшением f_oF2 . Далее в течение 30 мин наблюдалось уменьшение

f_oF2 от 3.9 до 3.7 МГц. За ним опять последовало увеличение f_oF2 примерно на 0.05 МГц. Затем в течение 45 мин течение f_oF2 оставалось почти неизменным, после этого наблюдалось уменьшение f_oF2 на 0.15 МГц. Далее из-за диффузности следа для О-волны определение f_oF2 в течение двух часов было невозможным.

Поведение $f_xF2(t)$ в интервале времени 21:00 – 01:15 было примерно таким же, как и поведение $f_oF2(t)$ (см. рис. 2). Определение f_xF2 оказалось возможным и в интервале времени 01:15 – 03:15.

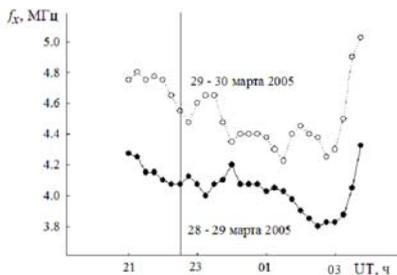


Рис. 2. Зависимость f_xF2 от времени в фоновый период (точки) и в период СР (кружки)

Вариации $f_xF2(t)$ в контрольные сутки были почти такими же, как и вариации $f_oF2(t)$.

Таким образом, анализ f -графиков показал, что временные изменения $f_{o,x}F2$ в контрольный интервал времени и в период СР существенно отличались. Изменения во временном ходе наступали с запаздываниями 14 – 29, 90 – 105 и 180 – 195 мин (напомним, что ионограммы снимались через каждые 15 мин).

Анализ f -графиков, полученных 19 и 25 мая 2004 г. Зависимость критической частоты О-волны f_oF2 от времени для 25 мая 2004 г. приведена на рис. 3. Из рис. 3 видно, что 19 мая 2004 г. с 11:45 до 14:00 f_oF2 монотонно уменьшалась с 6.95 до 6.2 МГц, с 14:00 до 15:00 f_oF2 монотонно возросла снова до 6.95 МГц и с 15:00 до 16:00 f_oF2 снова монотонно уменьшилась до 6.6 МГц.

25 мая 2004 г. с 11:45 до 16:00, особенно после 12:34 (т.е. в период старта и полета ракеты), вариации f_oF2 существенно отличались от вариаций f_oF2 19 мая 2004 г. 25 мая 2004 г. перед СР вариации f_oF2 были незначительными. С 12:15 до 13:15 значение f_oF2 уменьшилось с 6.9 до 6.2 МГц. После 13:15 началось увеличение f_oF2 . С 13:15 до 13:45 значение значения f_oF2 увеличилось до 6.6 МГц. После этого с 13:45 до 14:15 имело

место незначительное уменьшение f_0F2 (на 0.1 МГц), а затем – волнообразное увеличение f_0F2 от 6.5 до 7.3 МГц.

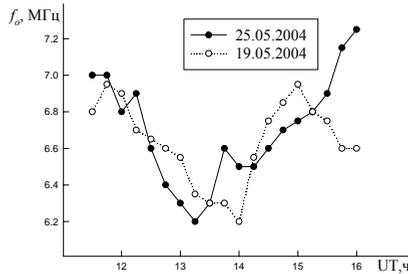


Рис. 3. Зависимость f_0F2 от времени в фоновый период 19 мая 2004 г. (кружки) и в период СР 25 мая 2004 г. (точки)

Результаты спектрального анализа. Временные зависимости $f_0F2(t)$ подверглись спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразования (ВП).

Необходимость применения системного спектрального анализа, использующего ОПФ, АПФ и ВП, обоснована в [2, 6]. Дело в том, что эти преобразования хорошо дополняют друг друга, компенсируя недостатки одного преобразования достоинствами другого. Кроме того, при конечном времени обработки совместное применение этих преобразований позволяет получить с большей точностью данные о время-периодной локализации искомого волнового процесса на фоне шумов.

Результаты спектрального анализа для 25 мая 2004 г. Временная зависимость $f_0F2(t)$ для 25 мая 2004 г. подверглась спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет – преобразования (ВП).

Сначала из зависимости $f_0F2(t)$ удалялся тренд $\langle f_0F2(t) \rangle$, вычисленный на интервале времени $T_t = 195$ мин с шагом скольжения $\Delta T_t = 15$ мин. Затем вычислялся временной ряд $\Delta f_0F2(t) = f_0F2(t) - \langle f_0F2(t) \rangle$, который и подвергался спектральному анализу в диапазоне периодов от 30 до 195 мин. Кроме спектров, вычислялись энергограммы, представляющие собой среднее распределение энергии колебаний по периодам.

Временная зависимость Δf_0F2 и спектрограммы для 25 мая 2004 г. приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что перед СР имело место квазипериодическое колебание с квазипериодом $T \approx 30$ мин $\Delta f_0F2 \approx 0.05 - 0.10$ МГц. Примерно через 26 мин после СР оно подавляется. В интервале времени 13:30 – 13:45 возникает новый квазипериодический процесс с $T \approx 100 - 120$ мин и $\Delta f_0F2 \approx 0.10 - 0.15$ МГц. Его продолжительность составляла не менее 2 – 2.5 часов. При этом $\delta_N \approx 3 - 5 \%$.

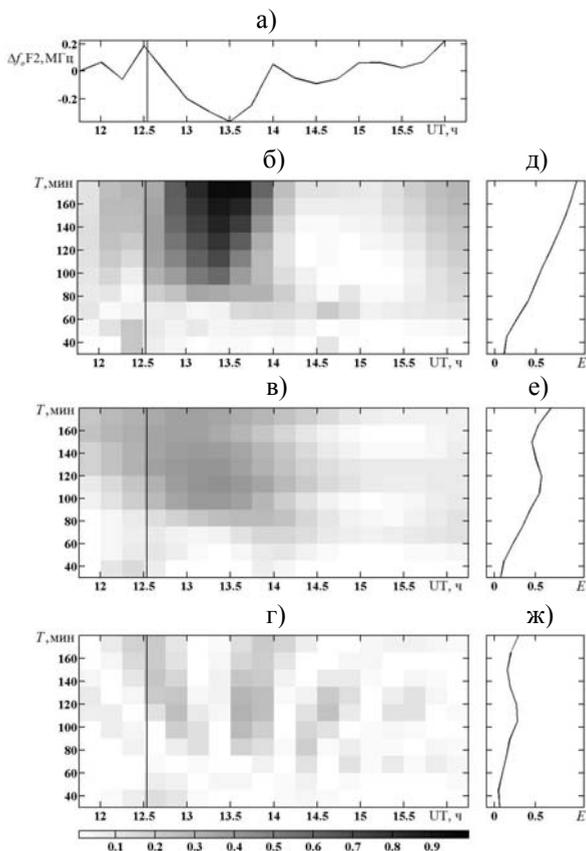


Рис. 4. Результаты спектрального анализа вариаций $\Delta f_0 F_2(t)$ для 25 мая 2004 г.: а) – исходная зависимость; б), в) и г) – спектрограммы, т. е. зависимости квадратов модуля спектральной плотности от периода, (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е) и ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ, и ВП в диапазоне периодов 30 – 180 мин. Интервал вычисления тренда составлял 195 мин

Результаты спектрального анализа для 29 – 30 марта 2005 г.
 Временная зависимость $f_0 F_2(t)$ для 29 – 30 марта 2005 г. подверглась спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет – преобразования (ВП).

Сначала из зависимости $f_0 F_2(t)$ удалялся тренд $\langle f_0 F_2(t) \rangle$, вычисленный на интервале времени $T_t = 105$ мин с шагом скольжения $\Delta T_t = 15$ мин. Затем вычислялся временной ряд $\Delta f_0 F_2(t) = f_0 F_2(t) - \langle f_0 F_2(t) \rangle$, который и подвергался спектральному анализу в диапазоне периодов от 30 до 105 мин.

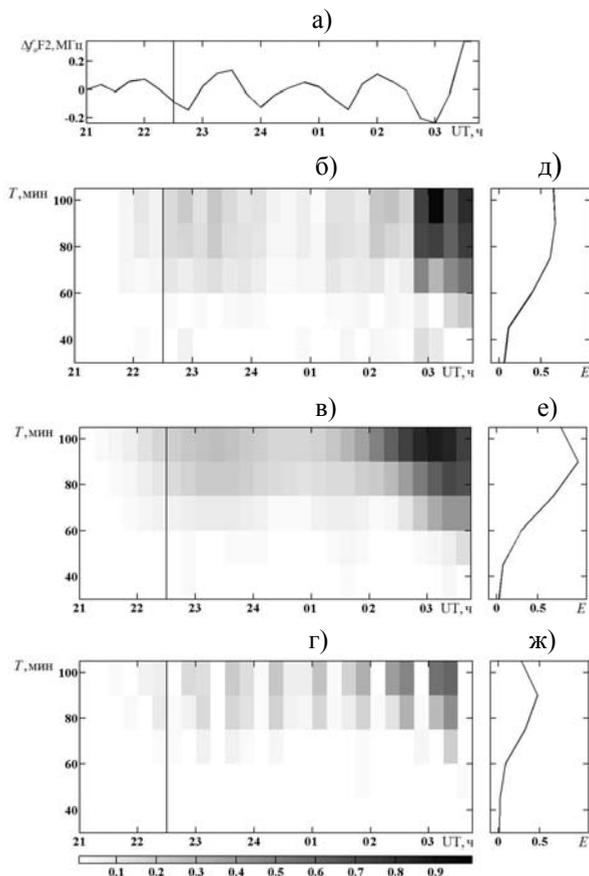


Рис. 5. Результаты спектрального анализа вариаций $\Delta f_0 F_2(t)$ для 29–30 марта 2005 г.: а) – исходная зависимость; б), в) и г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е) и ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ, и ВП в диапазоне периодов 30 – 105 мин. Интервал вычисления тренда составлял 105 мин.

Временная зависимость $\Delta f_0 F_2$ и спектрограммы для 29 – 30 марта 2005 г. приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что до СР в ионосфере существовали слабые неперiodические колебания с $\Delta f_0 F_2 \approx 0.05 - 0.10$ МГц. После СР стали наблюдаться четко выраженные квазипериодические колебания $\Delta f_0 F_2$ с $T \approx 90$ мин и $\Delta f_0 F_2 \approx 0.10 - 0.2$ МГц. Его продолжительность составляла не менее 4 часов. При этом $\delta_N \approx 2.5 - 5\%$.

Обсуждение. Не вызывает сомнений тот факт, что характер ионограмм и f -графики в контрольный интервал времени до СР и в период СР существенно отличались.

Старт ракеты “Протон”. Квазипериодические вариации $f_{o,x}F2$ вызываются прохождением ВГВ, которые модулируют N . Если эти вариации вызваны СР “Протон”, то по запаздыванию вариаций $f_{o,x}F2$ можно определить время распространения возмущений. Они оказались близки к 14 – 29, 90 – 105 и 180 – 195 мин. Точнее эти времена определить не удастся из-за низкой частоты регистрации ионограмм.

Легко показать, что при дискретности временных отсчетов $\tau = 15$ мин и равномерном законе распределения момента появления реакции на СР, средняя квадратическая ошибка определения задержки Δt реакции ионосферы составляет $\sigma_t = \tau / \sqrt{12} \approx 4.3$ мин.

Учитывая, что время движения ракеты “Протон” до области эффективной генерации ВГВ (около 120 – 130 км) составляет примерно 3 мин, скорректированные запаздывания составляют около 11 – 26, 87 – 102 и 177 – 192 мин. Им соответствуют кажущиеся скорости распространения возмущений от места генерации до места регистрации волн (расстояние между ними около 2300), равные 1.5 – 3.5 км/с, 375 – 440 и 200 – 220 м/с.

Скорость $v_1 = 1.5 - 3.5$ км/с (среднее значение $v_1 \approx 2.5$ км/с) неоднократно нами наблюдалась при изучении эффектов СР доплеровским методом, методом некогерентного рассеяния, магнитометрическим методом (см., например, [8] и ссылки там). Эту скорость имеют медленные магнитогидродинамические (ММГД) волны, а также магнитоградиентные (МГ) волны.

Скорость $v_2 \approx 375 - 440$ м/с свойственна ВГВ. Эти волны наблюдались различными методами практически после каждого СР (см., например, [8, 9] и ссылки там). Разумеется, проявления возмущений в каждом из методов обладает своей спецификой. Поэтому привлечение различных методов позволяет лучше понять сложную и многообразную картину физических явлений, сопровождающих СР.

Величина периода T при этом составляла около 90 мин, а длина волны – около 2000 – 2400 км. Такие периоды и длины волн, действительно, свойственны ВГВ.

Старт ракеты “Союз”. Со стартом ракеты, по-видимому, связано уменьшение f_oF2 , которое наступило примерно через 26 мин после старта и наложилось на естественный ход f_oF2 . Скорее всего, пришла отрицательная полуволна возмущения, вызванного стартом и полетом ракеты.

При $\sigma_t \approx 4.3$ мин имеем $\Delta t_1 \approx 26 \pm 4$ мин.

Следующее изменение во временной зависимости $f_oF2(t)$ имело место в 13:30. При этом $\Delta t_2 = 71 \pm 4$ мин. Время Δt_0 движения ракеты “Союз” до области эффективной генерации ионосферных возмущений (высоты 120 –

130 км) составляет около 3 мин. Ракета при этом находится на расстоянии около 2300 км от места наблюдения. Тогда скорректированные задержки составляли 23 ± 4 и 68 ± 4 мин. Им соответствовали скорректированные скорости $v_1' \approx 1.7 \pm 0.3$ км/с и $v_2' \approx 560 \pm 30$ м/с.

Выводы. 1. Старт мощной ракеты “Протон” сопровождался возникновением в F-области ионосферы двух типов возмущений. Они сопровождалась появлением наклонных отражений зондирующего сигнала, свидетельствующие о “взволнованности” области отражения радиоволны. Скорости распространения возмущений составляли 1.5 – 3.5 км/с и 375 – 440 м/с. Такие скорости свойственны ММГД или МГ волнам ВГВ соответственно.

Период, длина волны и относительная амплитуда волновых возмущений концентрации электронов, связанных с ВГВ, составляли 90 мин, 2000 – 2400 км и 2.5 – 5 %.

Возникшая примерно через 3 часа после СР диффузность в F-области ионосферы, скорее всего, является результатом воздействия на ионосферу геокосмической бури.

2. При старте ракеты “Союз” выявлены две группы возмущений, имевшие скорости распространения около 2 км/с и 600 м/с. Такие скорости, неоднократно наблюдаемые ранее, свойственны медленным МГД волнам и ВГВ соответственно.

Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов достигала 5 – 7 %, а величина квазипериода – около 2 – 3 час.

3. В целом эффекты СР “Протон” и “Союз” подобны, близкими оказались скорости распространения возмущений.

Список литературы: 1. *Афраймович Э.Я., Первалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с. 2. *Бурмака В.П., Панасенко С.В., Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 11. – С. 3 – 24. 3. *Живолуп Т.Г., Черногор Л.Ф.* Ионосферные эффекты в течение полета ракеты “Протон”: результаты вертикального зондирования // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 15 – 21. 4. *Живолуп Т.Г., Черногор Л.Ф.* Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты “Союз” в спокойных и магнитовозмущенных условиях // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 22 – 31. 5. *Черногор Л.Ф.* Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59 – 106. 6. *Черногор Л.Ф.* Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681 – 702. 7. *Черногор Л.Ф.* О нелинейности в природе и науке: Монография. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2008. – 528 с. 8. *Черногор Л.Ф.* Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2009. – 386 с. 9. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под общей редакцией Адушкина В.В., Козлова С.И. и Петрова Д.В. – М.: Анкил, 2000. – 640 с.

Поступила в редакцию 29.06.2011