

Сравнительный анализ ионосферных эффектов в течение полетов ракеты “Протон” при различных состояниях космической погоды

Л. Ф. Черногор, Т. Г. Живолуп¹

*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

*¹Институт ионосферы НАН и МОНМС Украины,
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, ГСП, Украина*

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2011 г.

Представлены результаты наблюдений за возмущениями в ионосфере, сопровождавшими старт и полет ракеты “Протон” 29 марта 2005 г. и 14 декабря 2009 г. Со стартами ракет связаны возмущения, возникающие через 10 ÷ 30 и 90 ÷ 110 мин. Первым регистрировалось отрицательное возмущение концентрации электронов N , имеющее среднюю скорость около 2 км/с. Второе возмущение было квазипериодическим и имело скорость около 400 м/с. Величина относительных вариаций N достигала 26 %.

Ключевые слова: ионосферные возмущения, старты ракет, магнитная буря, магнитогидродинамические волны, внутренние гравитационные волны

1. Введение

Эффекты стартов ракет (СР) изучаются давно (см., например, монографии [1-3]). Несмотря на это, до сих пор не поняты до конца механизмы возникающих возмущений, не построены модели физических процессов, имеющих место на значительных (~ 1000 ÷ 10000 км) удалениях от космодромов. Не выявлена также роль взаимодействия подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера [4-6]. Недостаточно изучена зависимость эффектов СР от состояния космической погоды, от степени возмущенности геокосмической среды.

В работах [7, 8] обсуждаются крупномасштабные (~ 10000 км) ионосферные эффекты СР на фоне магнитной бури. В статье [9] предпринята попытка разделить магнито-ионосферные эффекты, сопутствовавшие старту космического аппарата “Spacelab-2”. Авторы работ

[7-9] приходят к выводу, что однозначная селекция эффектов стартов ракет на фоне магнитной бури затруднена.

В работе [10] проведен сравнительный анализ ионосферных эффектов СР “Союз”, имевших место на космодроме Байконур. При этом один из стартов происходил в спокойных условиях, а второй – в магнитовозмущенных. В [10] продемонстрировано, что даже умеренная магнитная буря может существенно маскировать ионосферные эффекты СР. Не исключается и синергетическое взаимодействие эффектов СР и ионосферных бурь, их взаимное усиление.

В настоящей работе проведен сравнительный анализ ионосферных эффектов при старте с космодрома Байконур двух одинаковых ракет “Протон”. Как известно, “Протон” примерно в два раза мощнее ракеты “Союз”. Ракеты отличаются силой тяги, видом топлива, циклограммой и траекторными данными.

СР “Протон” произошли 29 марта 2005 г. в 22:31 и 14 декабря 2009 г. в 10:38 (здесь и далее время UT).

Первый из них имел место на фоне весьма умеренной (по классификации, приведенной в [4, 5]) магнитной бури, а второй – в относительно спокойных условиях. Представляет интерес выяснение степени влияния возмущений, сопровождавших бурю, на эффекты СР.

Целью настоящей работы является изложение результатов сравнительного анализа ионосферных эффектов, сопровождавших СР “Протон” в спокойных и слабо возмущенных условиях. Анализ направлен на выявление общих закономерностей при СР в спокойных и магнитовозмущенных условиях, а также на выяснение возможности разделения эффектов СР и магнитных бурь.

2. Состояние космической погоды

В дни, предшествующие СР “Протон”, состояние космической погоды характеризовалось как спокойное.

29 марта 2005 г., когда был осуществлен запуск, около 18:00 имело место внезапное начало магнитной бури, главная фаза которой продолжалась примерно с 21:00 29 марта до 04:00 31 марта [11].

Буре предшествовало увеличение концентрации частиц, температуры и давления солнечного ветра соответственно от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6$ м^{-3} , от $5 \cdot 10^4$ до $1.5 \cdot 10^5$ К, от 0.1 до 0.2 нПа. Величина внедряемой энергии в магнитосферу (значение функции Акасофу) увеличилась до 10 ГДж/с.

Компонента B_z межпланетного магнитного поля (ММП) стала отрицательной примерно в момент наступления внезапного начала магнитной бури.

Остальные параметры, описывающие космическую погоду (плотность потока протонов Π_p , плотность потока электронов Π_e , модуль ММП B_r , и измеряемая на ИСЗ компонента геомагнитного поля H_p) изменялись несущественно.

Значения геомагнитных индексов были следующими: $K_{p\max} = 4$, $D_{st\min} \approx -30$ нТл, $AE_{\max} \approx 300$ нТл.

СР пришелся на первые часы главной фазы магнитной бури. Учитывая, что эта буря от-

носилась к весьма умеренным, можно считать, что она не повлияла существенно на состояние ионосферы. Это облегчило поиск и идентификацию эффектов, связанных с СР.

Опишем состояние космической погоды 13 и 14 декабря 2009 г., т. е. в сутки, предшествовавшие второму СР, и в день старта.

13 декабря вариации плотности потока протонов были незначительными. В диапазонах энергий $E_p > 1$ МэВ, $E_p > 10$ МэВ и $E_p > 100$ МэВ плотность потока протонов Π_p по данным спутника GOES-11 составляла около $4 \cdot 10^4$, $2 \cdot 10^3$ и $5 \cdot 10^2$ $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ соответственно. Плотность потока электронов Π_e изменялась также незначительно и примерно равнялась 10^7 и $4 \cdot 10^3$ $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ для диапазонов энергий $E_e > 0.6$ МэВ и $E_e > 2$ МэВ соответственно. По данным мировых центров сбора наземных геомагнитных данных, а именно WDC-C2 в Киото, Японии (D_{st} -индекс) и AFWA, США (K_p -индекс), значения индекса D_{st} флуктуировали в пределах ± 9 нТл, индекс K_p изменялся от 0 до 1. В период 13:30 – 14:00 значения индекса AE достигали ~ 300 нТл. В остальное время суток индекс AE не превышал 100 нТл.

День СР, 14 декабря 2009 г., был спокойным. Максимальное значение K_p -индекса наблюдалось в начале суток (с 3:00 до 6:00) и составляло 3. Вблизи момента СР $K_p = 1 \div 2$. Минимальное значение индекса D_{st} наблюдалось около 09:00 и равнялась -18 нТл. Индекс AE в период времени с 5:30 до 6:00 был ~ 500 нТл, а в период с 9:00 до 10:00 – около 300 нТл. В остальное время суток индекс AE в основном не превышал 50 нТл. Значения Π_p и Π_e были примерно такими же, как и 13 декабря 2009 г.

3. Средства и методы

Ракета “Протон”. В качестве источника возмущений в ионосфере рассматривались старты и полеты ракеты “Протон”. Эта ракета относится к самым тяжелым российским ракетам. Ее полная масса составляет 711 т, начальная тяга – 8.84 МН, высота – 59 м, низкоорбитная полезная нагрузка – около 20 т на высоте 200 км. Ракета имеет четыре ступени, время работы которых составляет 124, 206, 238 и 600 с соответственно (всего около 20 мин).

Ионозонд. Наблюдение за состоянием ионосферы осуществлялось при помощи модифицированного ионозонда “Базис”.

Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы НАН и МОН Украины ($49^{\circ}36'$ с. ш., $36^{\circ}18'$ в. д.) вблизи г. Харькова. При вертикальном зондировании диапазон частот составляет $0.3 \div 20$ МГц, выходная мощность – 10 кВт, длительность излучаемых импульсов – 100 мкс, частота следования импульсов – $3.125 \div 25$ Гц. Ионограммы снимались с частотой 1 ионограмма в 15 мин.

Погрешность отсчета критических частот F-области ионосферы $f_{o,x}F2$, соответствующих обыкновенной (o) и необыкновенной (x) компонентам зондирующей волны, составляла 0.05 МГц.

Спектральный анализ. Временные зависимости $f_oF2(t)$ подвергались спектральному анализу при помощи оконного преобразования Фурье (ОПФ), адаптивного преобразования Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразования (ВП).

Сначала из зависимости $f_oF2(t)$ удалялся тренд $\langle f_oF2(t) \rangle$, вычисленный на интервале времени $T_i = 105$ мин с шагом скольжения $\Delta t_i = 15$ мин. Затем вычислялся временной ряд $\Delta f_oF2(t) = f_oF2(t) - \langle f_oF2(t) \rangle$, который и подвергался спектральному анализу в диапазоне периодов от 30 до 105 мин.

Подробная методика спектрального анализа и формат представления данных описаны в работах [12, 13].

4. Результаты наблюдений

Сначала кратко опишем ионосферные эффекты, сопровождавшие СР 29 марта 2005 г., на фоне весьма умеренной магнитной бури (подробнее см. в [11]).

Старту и полету космического аппарата сопутствовали зарегистрированные возмущения в ионосфере трех типов: появление на ионограммах наклонных отражений, свидетельствовавших о “взволнованности” области отражения радиоволны, и диффузности, а также квазипериодических вариаций (или “пиков”) критических частот $f_{o,x}F2$ с временами запаздывания, равными $14 \div 29$, $90 \div 165$ и $180 \div 195$ мин. Все три типа возмущений могли быть вызваны как СР, так и магнитной бурей. В работе [11] появление квазипериодических вариаций $f_{o,x}F2$ и наклонных отражений объяснялось приходом от траектории ра-

кеты возмущений с кажущимися скоростями $1.5 \div 3.5$ км/с и $375 \div 440$ м/с. Время запаздывания $180 \div 195$ мин, как отмечалось в [11], самостоятельного значения не имело, оно отражало периодичность процесса с меньшей кажущейся скоростью. В пользу того, что вариации $f_{o,x}F2$ и наклонные отражения вызваны СР свидетельствует близость значений кажущихся скоростей распространения возмущений, найденных из ионограмм и данных метода некогерентного рассеяния [11].

Возникновение диффузного характера ионограмм в [11] объясняется влиянием магнитной бури.

Далее проанализируем процессы, сопровождавшие СР 14 декабря 2009 г.

Анализ ионограмм. Рассмотрим ионограмму, полученную в 10:00, т. е. накануне СР (рис. 1, верхняя панель). Четко наблюдались два следа, соответствующие обыкновенной и необыкновенной компонентам зондирующей волны. На ионограмме виден небольшой след, образовавшийся при отражении от спорадического слоя E_s , граничная частота которого равна 4.45 МГц. Поглощение зондирующей радиоволны в ионосфере было сравнительно небольшим, благодаря чему наблюдались “двухкратник” и “трехкратник”.

Примерно через 7 мин после СР, в 10:45, исчез слой E_s и второй “многократник” (рис. 1, средняя панель). Последний появился снова в 11:15 (рис. 1, нижняя панель).

На ионограммах, полученных в 12:30 и 12:45, т. е. через 112 и 127 мин после СР, регистрировались серпообразные следы o -компоненты радиоволны (рис. 2, верхняя и средняя панели). Скорее всего, они связаны с искривлением горизонтальной структуры ионосферы. След x -компоненты зондирующей волны исчез.

В 13:00 серпообразный след o -компоненты зондирующей волны уже не наблюдался, и с этого момента времени ионограммы приняли свой привычный вид (рис. 2, нижняя панель).

Анализ f -графиков. Зависимости критической частоты f_oF2 от времени для 13 и 14 декабря 2009 г. приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что в контрольный день 13 декабря f_oF2 , несколько флуктуируя, в среднем уменьшалась в интервале времени от 10:00 до 14:00. Примерно с 11:00 до 11:45 имело место значительное (на $1 \div 1.5$ МГц) возраста-

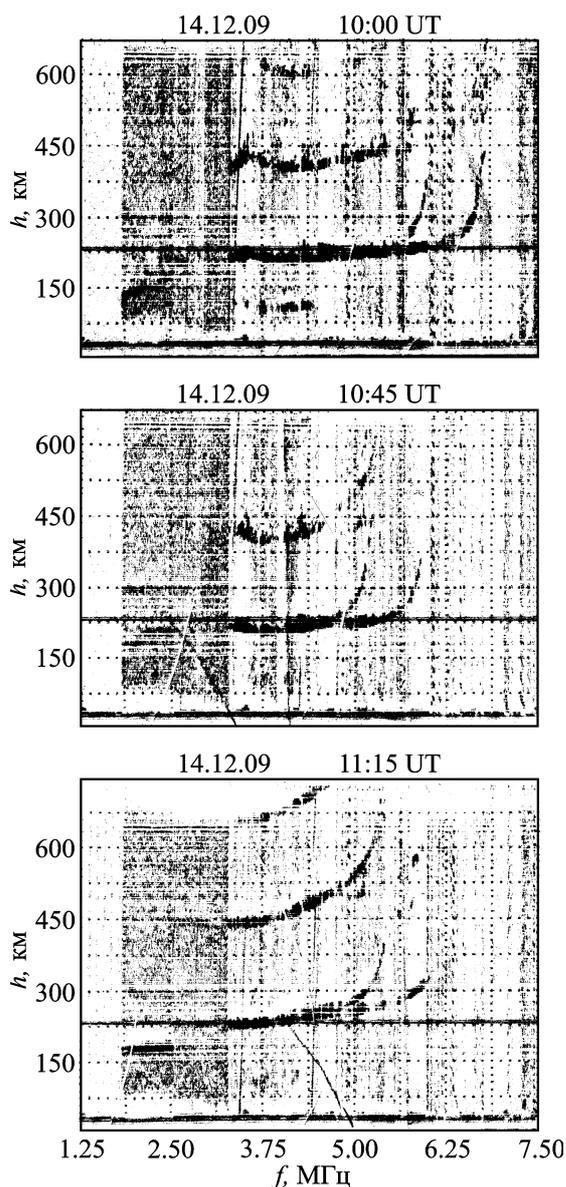


Рис. 1. Ионограммы вертикального зондирования, зарегистрированные в характерные моменты времени 14 декабря 2009 г.: в 10:00 (верхняя панель) – до СР; в 10:45 (средняя панель) – в момент исчезновения слоя E_s и второго “многократника”; в 11:15 (нижняя панель) – в момент появления второго “многократника”. Здесь и далее f – частота радиосигнала, h – действующая высота отражения сигнала

ние f_oF2 . Природу этого возмущения установить не удалось.

В день СР поведение f_oF2 в среднем было примерно таким же, как и в контрольный день. Вскоре после СР имело место некоторое уменьшение f_oF2 , которое затем сменилось ее уве-

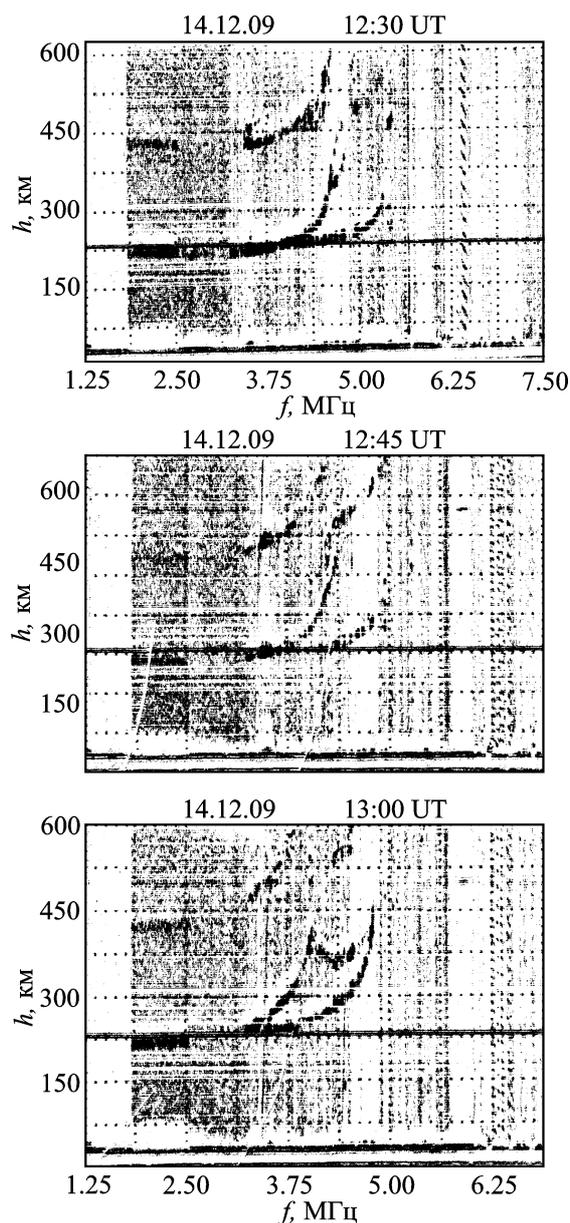


Рис. 2. Ионограммы вертикального зондирования, зарегистрированные в характерные моменты времени 14 декабря 2009 г.: в 12:30 (верхняя панель) и в 12:45 (средняя панель) – процесс образования серпообразных отражений; в 13:00 (нижняя панель) – в момент исчезновения серпообразных отражений

личением (первый “пик”). Максимальное значение f_oF2 наблюдалось в 11:45. После этого значение f_oF2 стремительно уменьшилось от 6 до 4.2 МГц. В интервале времени 13:00 – 14:00 опять имело место увеличение f_oF2 на 1.1 МГц (второй “пик”).

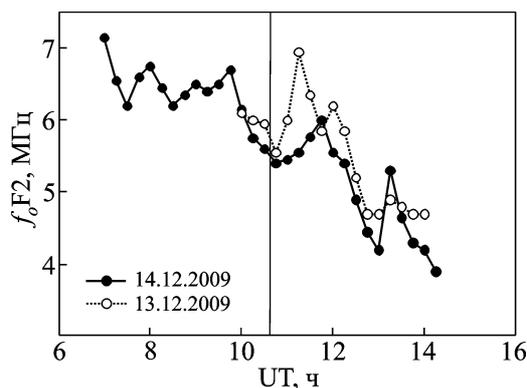


Рис. 3. Зависимость критической частоты f_oF2 от времени в контрольные сутки 13 декабря 2009 г. и в период СР 14 декабря 2009 г. Вертикальной линией здесь и далее показан момент СР

Результаты спектрального анализа. Временная зависимость f_oF2 и спектрограммы для 14 декабря 2009 г. приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что до СР в ионосфере преобладало волновое возмущение (ВВ) с квазипериодом около 60 мин и средней амплитудой $\Delta f_oF2 \approx 0.22$ МГц. При $\langle f_oF2 \rangle \approx 6.5$ МГц амплитуда относительного возмущения концентрации электронов

$$\delta_{Nm} = \frac{\Delta N}{N} = 2 \frac{\Delta f_oF2}{\langle f_oF2 \rangle}$$

составляла около 0.07.

Вскоре после СР существовавшее ВВ было разрушено: по-видимому, пришло однополярное возмущение примерно с такой же амплитудой, но сдвинутое по фазе практически на 180° . Его продолжительность была около 30 ÷ 40 мин.

Примерно в 12:15 точки наблюдения достигло второе возмущение, которое усилило ВВ, имевшее место до СР. Амплитуда квазипериодического процесса увеличилась до 0.6 МГц, его квазипериод $T \approx 60$ мин. При $\langle f_oF2 \rangle = 4.7$ МГц получаем $\delta_{Nm} \approx 0.26$.

Опишем поведение Δf_oF2 и спектрограмм в контрольный день 13 декабря 2009 г. (см. рис. 5). Из рисунка видно, что в интервале времени 11:00 – 14:00 в ионосфере наблюдалось ВВ с периодом $T \approx 60$ мин. Его ам-

плитуда изменялась в пределах $0.3 \div 0.6$ МГц при $\langle f_oF2 \rangle \approx 4.5 \div 6.5$ МГц. При этом $\delta_{Nm} \approx 0.13 \div 0.20$.

В целом поведение $\Delta f_oF2(t)$ и спектрограммы в контрольный день и день СР заметно отличалось.

Обнаружение возмущений. Для выделения возмущений наряду с визуальным анализом использовалась следующая методика.

До СР в зависимости $f_oF2(t)$ наблюдался четко выраженный квазипериодический процесс. При помощи метода наименьших квадратов он аппроксимировался процессом $\Delta f_o'F2(t)$ (пунктир на рис. 6). Зависимость $\Delta f_o'F2(t)$ имела вид:

$$\Delta f_o'F2(t) = A \cos(2\pi t/T + \phi_0),$$

где A – амплитуда, ϕ_0 – начальная фаза.

Оценка его параметров на интервале времени 07:00 – 10:30 привела к таким значениям процесса: $A \approx 0.22$ МГц, $T \approx 55$ мин и $\phi_0 \approx 0$. Далее из зависимости $\Delta f_o'F2(t)$ вычиталась зависимость $\Delta f_o'F2(t)$ и таким образом строилась зависимость $\delta f_oF2(t)$ (рис. 6, средняя панель). По зависимости $\delta f_oF2(t)$ на интервале 105 мин вычислялась дисперсия σ^2 . Зависимость $\sigma(t)$ также показана на рис. 6 (нижняя панель). До СР $\sigma \approx 0.10 \div 0.15$ МГц, а после него σ достигает 0.4 МГц.

Из рис. 6 (средняя панель) видно, что после СР с временем запаздывания, примерно равным 22 мин, пришло первое возмущение. Далее на него наложилось второе возмущение, время запаздывания которого составляло около 97 мин. Появление второго возмущения сопровождалось увеличением σ примерно от 0.2 до 0.4 МГц.

5. Обсуждение

После СР, скорее всего, наблюдалось два типа возмущений. Первое из них, имевшее время запаздывания Δt_1 около 22 мин, привело к подавлению существовавшего волнового процесса. Продолжительность этого типа возмущений не превышала 60 мин.

Второе возмущение имело время запаздывания $\Delta t_2 \approx 97$ мин. Продолжительность второго процесса составляла около 90 мин.

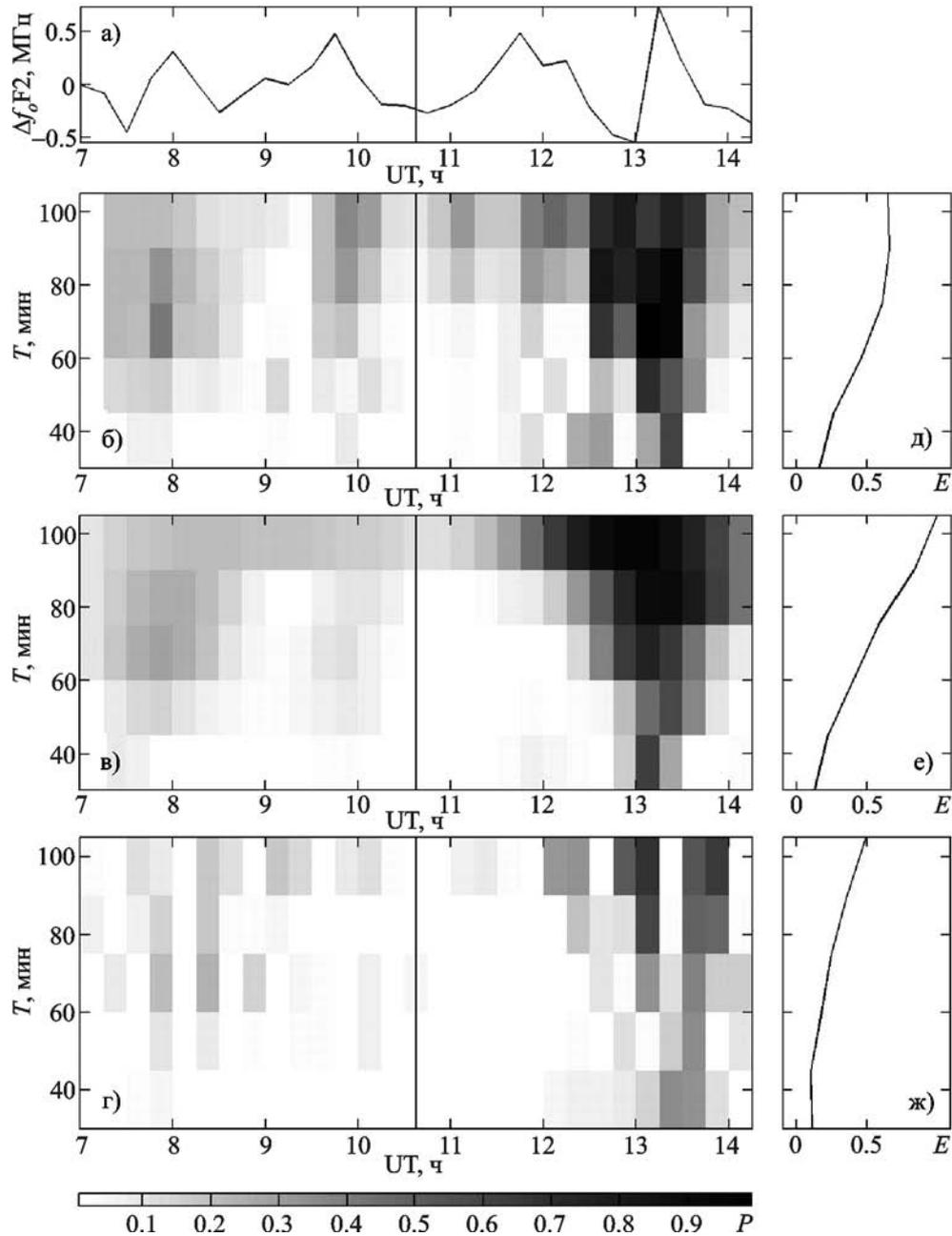


Рис. 4. Результаты спектрального анализа вариаций $\Delta f_0 F_2(t)$ 14 декабря 2009 г.: а) – исходная зависимость; б), в) и г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е) и ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП в диапазоне периодов $T = 30 \div 105$ мин. Интервал вычисления тренда составлял 105 мин. Здесь и далее P – интенсивность спектральных составляющих

Учитывая, что время движения ракеты “Протон” до области эффективной генерации ВВ составляет около 3 мин, скорректированные значения времен запаздывания равнялись 19 и 94 мин.

Из-за дискретного характера зондирования неопределенность измерения времени запаздывания составляла [10]:

$$\Delta t = \tau / \sqrt{12},$$

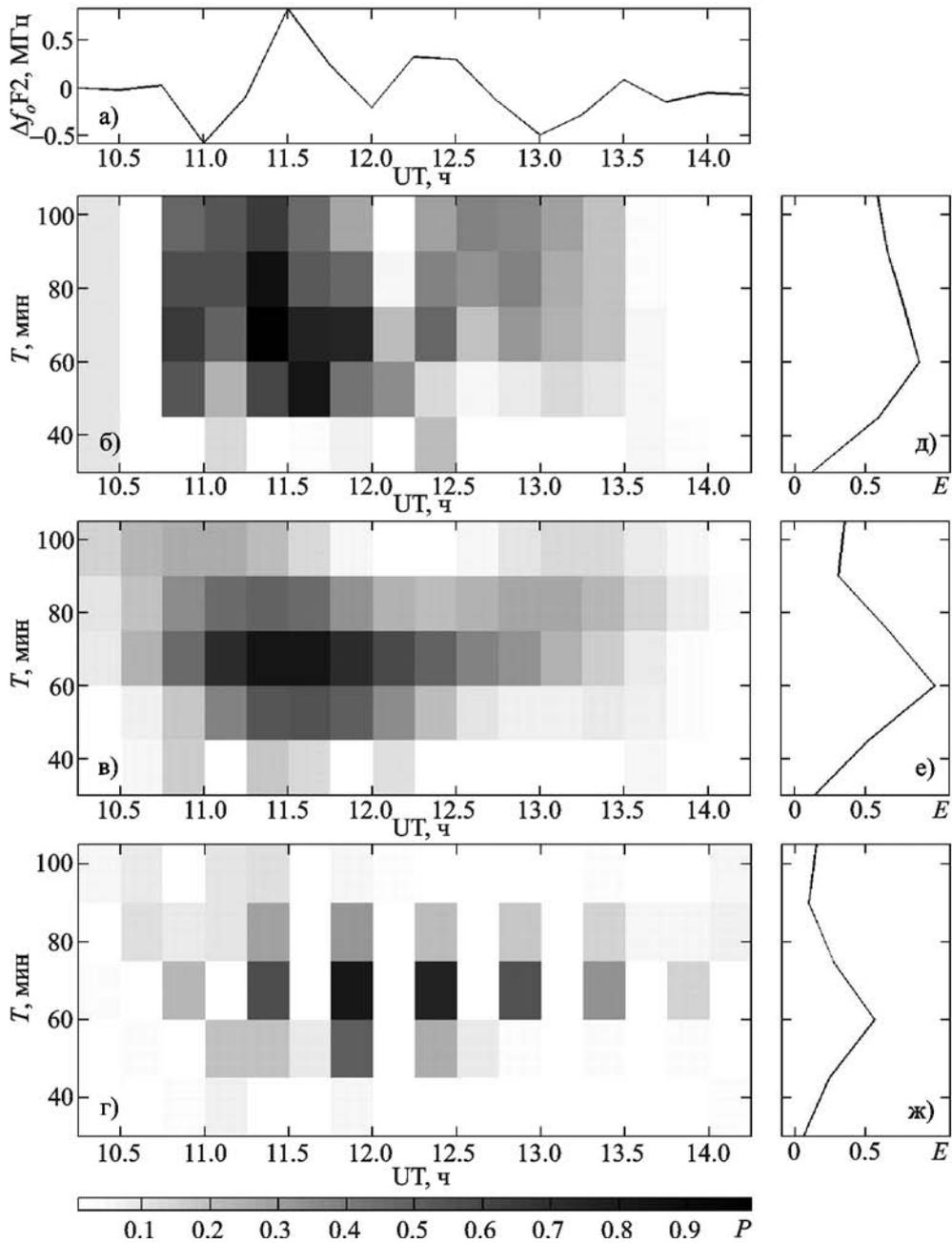


Рис. 5. Результаты спектрального анализа вариаций $\Delta f_0 F2(t)$ 13 декабря 2009 г.: а) – исходная зависимость; б), в) и г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е) и ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП в диапазоне периодов $T = 30 \div 105$ мин. Интервал вычисления тренда составлял 105 мин

где $\tau = 15$ мин. Тогда $\Delta t \approx \pm 4$ мин. При этом скорректированные значения времен запаздывания возмущений $\Delta t'_1 \approx 19 \pm 4$ мин, $\Delta t'_2 \approx 94 \pm 4$ мин. Таким временам запаздывания соответствуют скорректированные значения скоростей

$$v' = R' / \Delta t',$$

где R' – расстояние от места генерации возмущений до места их наблюдения. При $R' \approx 2300$ км имеем $v'_1 \approx 1.7 \div 2.6$ км/с, $v'_2 \approx$

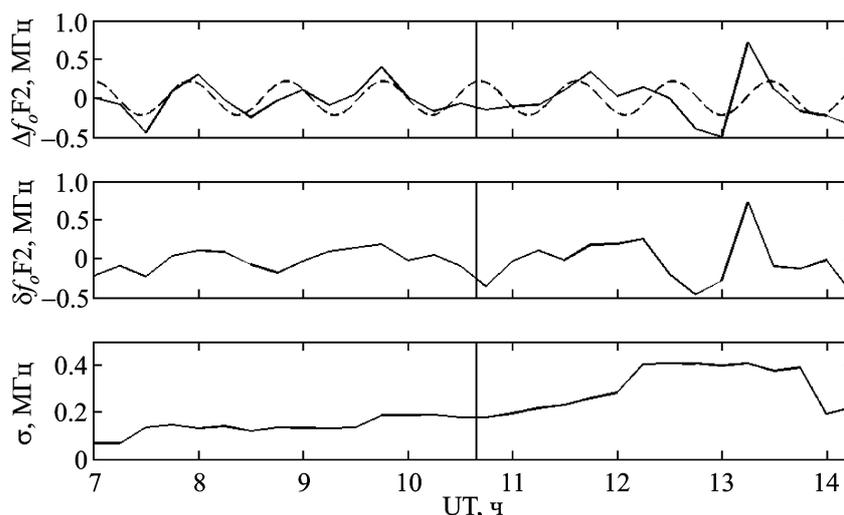


Рис. 6. Временные зависимости анализируемого сигнала $\Delta f_0 F_2(t)$, полученного после вычитания тренда на интервале времени, равном 75 мин, и его модели $\Delta f_0' F_2(t)$, показанной штриховой линией (верхняя панель), а также разностного сигнала $\delta f_0 F_2(t) = \Delta f_0 F_2(t) - \Delta f_0' F_2(t)$ (средняя панель) и среднеквадратичного отклонения сигнала $\delta f_0 F_2(t)$ (нижняя панель)

390 ÷ 425 м/с или $v_1' \approx (2.0 \pm 0.4)$ км/с и $v_2' \approx (410 \pm 16)$ м/с.

Сравним теперь результаты наблюдения эффектов СР “Протон”, имевших место 14 декабря 2009 г. и 29 марта 2005 г. (рис. 7). Из сравнения рис. 4 и рис. 7 следует, что через 20 ÷ 30 мин после СР наблюдалось уменьшение $f_0 F_2$, которое продолжалось 40 ÷ 60 мин. Затем имело место второе возмущение продолжительностью около 1 ÷ 2 ч. Величина квазипериода ВВ в обоих случаях составляла 60 ÷ 90 мин.

Скорректированные значения скоростей 29 марта 2005 г. составляли около 1.5 ÷ 3.5 км/с и 375 ÷ 440 м/с или $v_1' \approx (2.5 \pm 1.0)$ км/с и $v_2' \approx (400 \pm 35)$ м/с [3]. Видно, что значения двух групп скоростей для 14 декабря и 29 марта близки между собой. Они также близки к скоростям медленных магнитогидродинамических (или магнитоградиентных) волн и внутренних гравитационных волн соответственно [3]. Важно, что близкие значения скоростей наблюдались другими авторами [1, 2] и нами [3]. Все это свидетельствует в пользу того, что описываемые возмущения связаны с СР.

Подобие характера ионосферных процессов, сопутствовавших СР, и близость их параметров свидетельствуют о том, что весьма

умеренная магнитная буря существенно не повлияла на возможность селекции возмущений естественного и антропогенного происхождения. Для более успешного решения вопроса о селекции возмущений требуется создание более детального “портрета” искомым возмущений для большего числа СР. Сейчас же можно утверждать, что существует принципиальная возможность различения эффектов СР и весьма умеренных магнитных бурь. Полученные в настоящей работе результаты подтверждают выводы, сделанные в статье [10], где анализировались ионосферные эффекты, сопутствовавшие СР “Союз”.

6. Выводы

1. Проанализированы эффекты СР “Протон”, который имел место практически в спокойных магнито-ионосферных условиях.

2. Показано, что СР 14 декабря 2009 г. сопровождался сначала отрицательным, а затем квазипериодическим возмущением критической частоты $f_0 F_2$, а значит и концентрации электронов N . Относительные вариации N достигали ± 0.26 .

3. Суммарная продолжительность обоих возмущений составляла не менее 2 ÷ 3 ч.

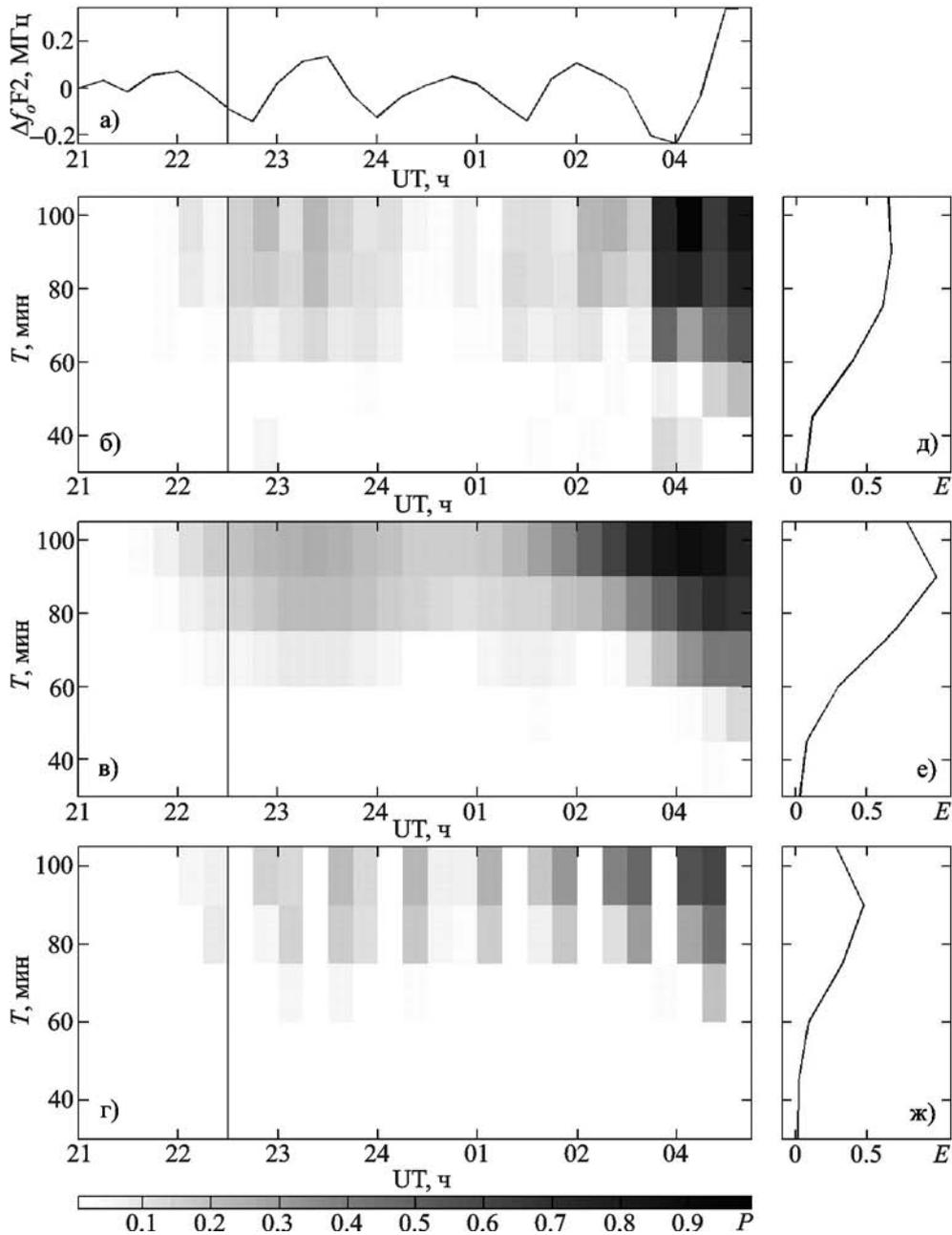


Рис. 7. Результаты спектрального анализа вариаций $\Delta f_o F2(t)$ 29 марта 2005 г.: а) – исходная зависимость; б), в) и г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е) и ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП в диапазоне периодов $T = 30 \div 105$ мин. Интервал вычисления тренда составлял 105 мин

4. Сравнительный анализ ионосферных эффектов показал, что возмущения, сопровождавшие СР 29 марта 2005 г. и 14 декабря 2009 г., подобны и имеют близкие параметры. Это означает, что эффекты СР 29 марта 2005 г. удалось идентифицировать, несмотря на маскирующее действие эффектов весьма умеренной магнитной бури.

5. Характерные скорости распространения возмущений для обоих стартов близки к $2.0 \div 2.5$ км/с и $400 \div 410$ м/с.

Перенос возмущений осуществлялся, по-видимому, за счет медленных магнитогидродинамических (или магнитоградиентных) волн, а также внутренних гравитационных волн. Проявления таких волн неоднократно наблюдались и ранее.

6. Для селекции эффектов СР на фоне магнитных бурь требуется создание детального “портрета” искомым возмущений. Элементами этого “портрета” служат скорости распространения возмущений, их амплитуды и периоды.

Литература

1. Афраймович Э. Я., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. – 480 с.
2. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Под общей ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова и Д. В. Петрова. – М.: Анкил, 2000. – 640 с.
3. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. – 386 с.
4. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №1. – С. 59-106.
5. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
6. Chernogor L. F. The Earth-atmosphere-geospace system: main properties and processes // Int. J. Rem. Sens. – 2011. – Vol. 32, No. 11. – P. 3199-3218.
7. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyurnov O. F., and Tsymbal A. M. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching // Radiofizika i Radioastronomia. – 1998. – Vol. 3, No. 2. – P. 181-190.
8. Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyurnov O. F., Tsymbal A. M., and Chernogor L. F. Global Ionospheric Disturbances Caused by a Rocket Launch against a Background of a Magnetic Storm // Geomagnetism and Aeronomy. – 1999. – Vol. 39, No. 1. – P. 69-75.
9. Foster J. C., Holt J. M., and Lanzerotti L. J. Mid-latitude ionospheric perturbation associated with Spacelab-2 plasma depletion experiment at Millstone Hill // Ann. Geophys. – 2000. – Vol. 18. – P. 111-120.
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэронаука. – 2008. – Т. 48, №5. – С. 681-702.

Порівняльний аналіз іоносферних ефектів протягом польотів ракети “Протон” за різних станів космічної погоди

Л. Ф. Черногор, Т. Г. Живолуп

Надаються результати спостережень за збуреннями в іоносфері, що супроводжували старт і політ ракети “Протон” 29 березня 2005 р. та 14 грудня 2009 р. Зі стартами ракет пов’язані збурення, що виникали через 10 ÷ 30 та 90 ÷ 110 хв. Першим реєструвалося негативне збурення концентрації електронів N з середньою швидкістю близько 2 км/с. Друге збурення було квазіперіодичним і мало швидкість близько 400 м/с. Величина відносних варіацій N сягала 26 %.

Comparative Analysis of Ionospheric Effects During “Proton” Rocket Flights under Different States of Space Weather

L. F. Chernogor and T. G. Zhivolup

The observations of disturbances in the ionosphere which accompanied the “Proton” rocket launch and flight on 29 March 2005 and 14 December 2009 are presented. Disturbances which arose with delays of 10 ÷ 30 and 90 ÷ 110 minutes were connected with rocket launching. The first to be recorded was the negative disturbance of electron density N with average speed about 2 km/s. The second disturbance was quasi-periodic and had speed about 400 m/s. The N relative variations reached 26 %.