

УДК 550.16 + 523.31 + 523.9 : 520.86, 550.388

Т. Г. Живолуп<sup>1</sup>, Л. Ф. Черногор<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут іоносфери Національної академії наук України і Міністерства освіти і науки України, Харків

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

## ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕЧЕНИЕ ПОЛЕТА РАКЕТЫ «ПРОТОН»: РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

---

*Представлено результати спостережень за збуреннями в іоносфері, що виникали під час старту та польоту ракети «Протон». Старт з космодрому Байконур мав місце в 22:31 UT 29 березня 2005 р. Ракета стартувала у період помірної магнітної бурі ( $K_{pmax} = 4$ ). Збурення від ракети і магнітної бурі наклалися. Зі стартом пов'язані збурення, що виникли в іоносфері із запізненнями 11...26 і 87...102 хв. Їм відповідали швидкості 1.5...3.5 км/с і 375...440 м/с. Такі швидкості мають повільні МГД- або магнітоградієнтні хвилі та внутрішні гравітаційні хвилі. Відносна амплітуда збурень концентрації електронів становила 2.5...5 %, період — 90 хв.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Эффекты в ионосфере, возникающие при стартах и полетах мощных ракет с работающими двигателями, изучаются около 40 лет [10, 11]. При этом установлено, что эффекты отличаются многообразием, существенно зависят от состояния космической погоды, удаления от космодрома, типа ракеты и других факторов. Строго говоря, нет двух одинаковых реакций на старт двух одинаковых ракет. Поэтому исследование реакции среды на старты и полеты ракет остается актуальной задачей.

Особое место в этих исследованиях занимает изучение крупномасштабных и глобальных возмущений. Их характерные размеры составляют около 1000 и 10000 км соответственно. Технологические возмущения от ракет, охватывая большую часть атмосферы и геокосмоса, способны заметно влиять на характеристики радиосигналов почти всех диапазонов радиоволн. В этом заключаются их практический и экологический аспекты.

Кроме того, исследование возмущений, вызываемых стартами и полетами ракет, имеет и общенаучный аспект. Изучение возмущений позволяет лучше понять динамику физических процессов в атмосфере и геокосмосе, взаимо-

действие подсистем в системе Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера [8, 9].

Для изучения эффектов стартов и полетов ракет применялись различные методы: доплеровского зондирования, вертикального и наклонного зондирования, некогерентного рассеяния, магнитометрический метод и другие [1—7, 10, 12]. В настоящей работе используется ионограммный метод, который ранее практически не использовался для изучения процессов в ионосфере, сопутствующих стартам и полетам ракет. Каждый метод диагностики ионосферы, основанный на определенном физическом явлении, открывает новые возможности в изучении особенностей возмущений той или иной природы.

При поиске эффектов стартов ракет, исследователи стремятся, как правило, вести измерения в условиях спокойной ионосферы, чтобы возмущения другой природы не накладывались на искомые эффекты. Мы усложним себе задачу и попытаемся выделить возмущения в ионосфере от стартующей ракеты на фоне возмущения естественной природы.

Целью настоящей работы является изложение результатов анализа ионограмм и состояния ионосферы накануне и после старта мощной ракеты. Важной особенностью этого старта было то, что запуск космического аппарата имел место на фоне главной фазы магнитной бури, что предо-

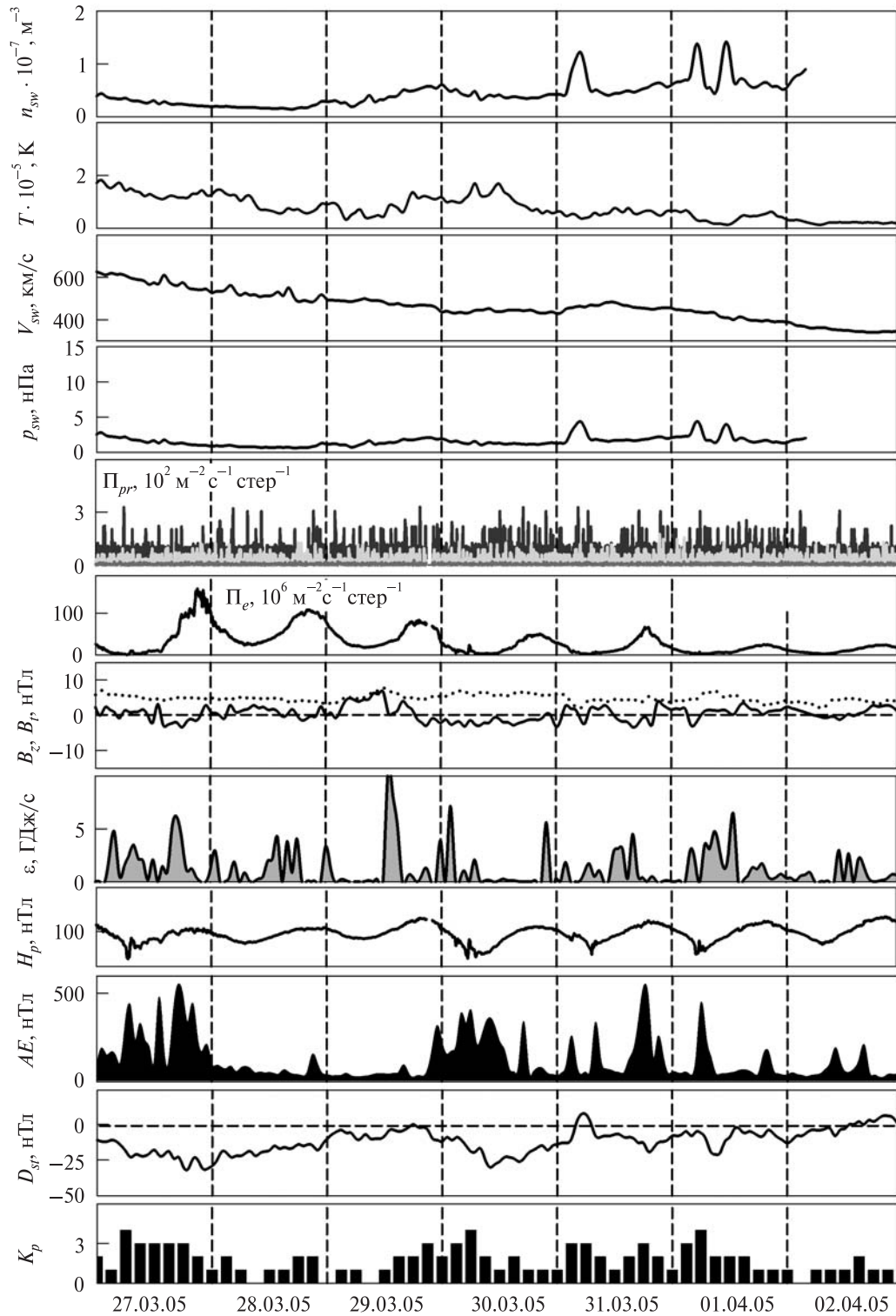


Рис. 1. Вариации параметров, описывающих состояние космической погоды с 27 марта по 2 апреля 2005 г. (см. текст)

пределило сложность селекции эффектов бури и полета ракеты.

Старт ракеты (СР) «Протон» с космодрома Байконур произошел 29 марта 2005 г. в 22:31 (здесь и далее время UT).

## СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

В дни, предшествующие СР, состояние космической погоды было спокойным (рис. 1).

На рис. 1 (сверху вниз) приведены временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации частиц  $n_{sw}$ , температуры  $T$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  (ACE Satellite — Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) и динамического давления  $p_{sw}$  (расчет); компонента  $B_z$ , модуля вектора  $B_l$  (точки) межпланетного магнитного поля (ACE Satellite — Magnetometer); плотностей потоков протонов  $\Pi_{pr}$  (GOES-8 (W75)) и электронов  $\Pi_e$  (GOES-12),  $\varepsilon$  — функции Акасофу (расчет);  $H_p$ -составляющей геомагнитного поля (GOES-12);  $AE$ -индекса авроральной активности (WDC Kyoto);  $D_{st}$ -индекса (WDC-C2 for Geomagnetism Kyoto University);  $K_p$ -индекса (Air Force Weather Agency).

Около 18:00 29 марта 2005 г. имело место внезапное начало магнитной бури, главная фаза которой продолжалась примерно с 21:00 29 марта до 04:00 31 марта. Буре предшествовало увеличение концентрации частиц, температуры и давления солнечного ветра соответственно от  $2 \cdot 10^6$  до  $6 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$ , от  $5 \cdot 10^4$  до  $1.5 \cdot 10^5 \text{ К}$ , от 0.1 до 0.2 нПа. Значения функции Акасофу увеличились до 10 ГДж/с. Составляющая  $B_z$  межпланетного магнитного поля стала отрицательной примерно в момент наступления внезапного начала. Остальные параметры, описывающие космическую погоду ( $\Pi_{pr}$ ,  $\Pi_e$ ,  $B_l$  и  $H_p$ ) изменились незначительно.

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

Старт ракеты пришелся на первые часы главной фазы магнитной бури. Учитывая, что согласно классификации [7, 8] эта буря относилась к весьма умеренным, можно надеяться, что она не повлияла существенно на состояние ионосферы. Это облегчило поиск и идентификацию эффектов, связанных с СР. Повторное возмущение космической погоды началось в ночь с 30 на 31 марта и продолжалось около двух суток.

В качестве фоновых 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 (см. рис. 1).

## ИСТОЧНИК ВОЗМУЩЕНИЙ И СРЕДСТВА ЗОНДИРОВАНИЯ

**Ракета «Протон».** В качестве источника возмущений в ионосфере рассматривался старт и полет 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. 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».

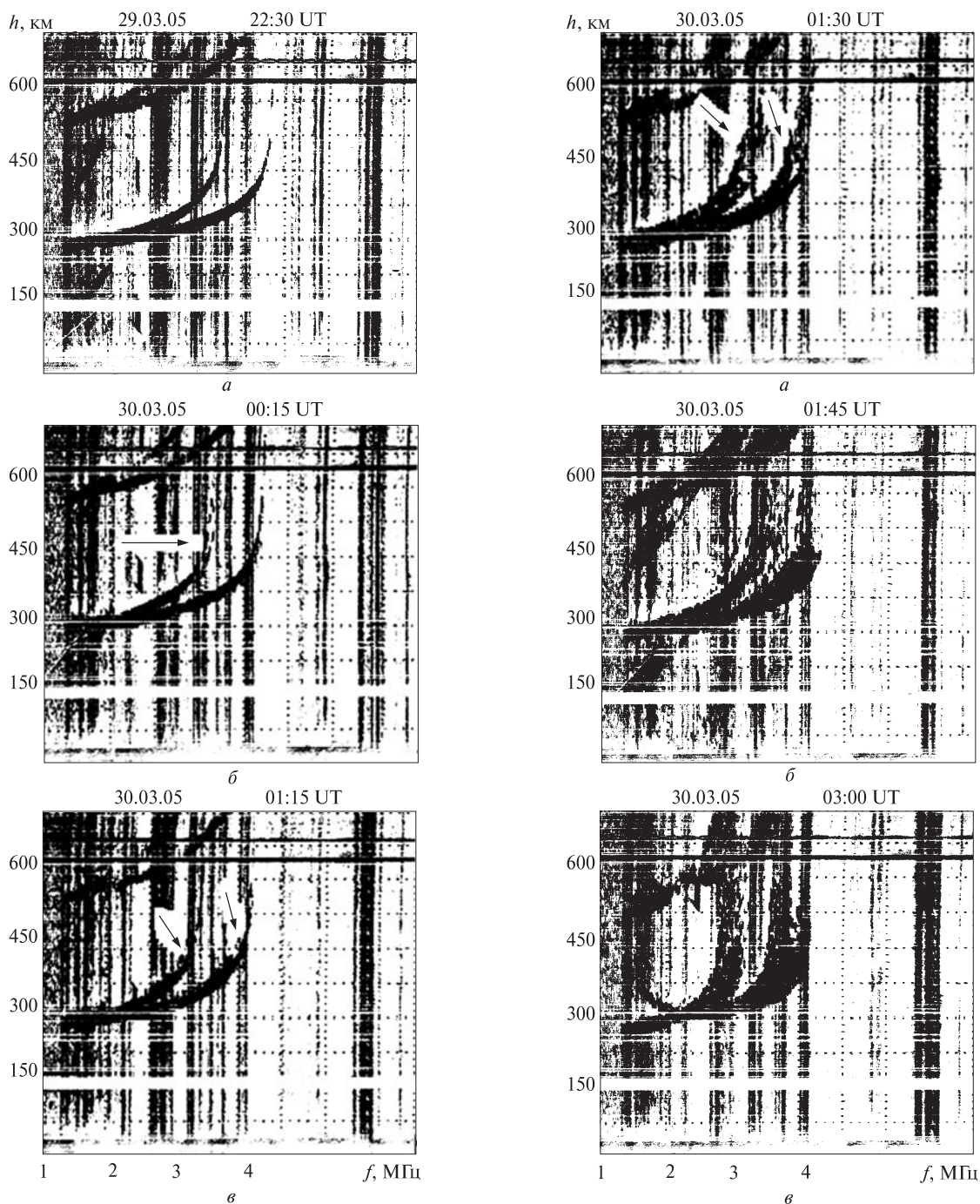
Ионозонд расположен в ионосферной обсерватории Института ионосферы ( $49^\circ 36'$  с. ш.,  $36^\circ 18'$  в. д.) вблизи г. Харькова. При вертикальном зондировании диапазон частот составляет 0.3...20 МГц, выходная мощность — 10 кВт, длительность излучаемых импульсов — 100 мкс, частота следования импульсов — 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 ионограмм.** Вид ионограммы в невозмущенных условиях накануне СР приведен на рис. 2, а. Видно, что четко наблюдается два следа, соответствующие обыкновенной ( $O$ ) и необыкновенной ( $X$ ) составляющим зондирующей волны. Первый след находится левее, второй — правее. Затухание зондирующей радиоволны в ионосфере было сравнительно небольшим, благодаря чему наблюдался «двукратный» сигнал, т. е. сигнал, отразившийся сначала от ионосферы, затем от поверхности Земли и снова от ионосферы.

Примерно через 90 мин после СР стали наблюдаться наклонные отражения  $O$ -, а потом и  $X$ -составляющей радиоволны. Как известно, по-



**Рис. 2.** Ионogramмы вертикального зондирования, зарегистрированные в характерные моменты времени: *а* — в 22:30 UT 29 марта (до СР), *б* — в 00:15 UT 30 марта (в момент прихода второго возмущения), *в* — в 01:15 UT 30 марта (в момент прихода третьего возмущения и возникновения диффузности). Здесь  $f$  — частота радиосигнала,  $h$  — действующая высота отражения сигнала. Стрелки указывают на появление наклонных отражений

**Рис. 3.** Ионogramмы вертикального зондирования, зарегистрированные в характерные моменты времени: *а* — в 01:30, *б* — в 01:45, *в* — в 03:00. Все ионogramмы отражают процесс усиления диффузности. Стрелки указывают на появление наклонных отражений



явление наклонных отражений свидетельствует об отражении радиоволн от «взволнованной» поверхности. Длина волны плотности в ионосфере при этом составляет многие сотни — тысячи километров.

Ионограмма, полученная примерно через 105 мин после СР, показана на рис. 2, б. На ней также видны наклонные отражения  $O$ -составляющей радиоволны. Эти отражения приводят к раздвоению следа, которое четко наблюдалось в диапазоне частот 3.3...3.4 МГц.

На ионограмме, полученной в 00:45, т. е. через 135 мин после СР, наблюдался загиб левого конца следа  $X$ -составляющей, соответствующий частотам 1.55...1.8 МГц.

Ионограмма, зарегистрированная примерно через 165 мин после СР, приведена на рис. 2, в. На ней уже видны наклонные отражения  $O$ - и  $X$ -составляющих.

Еще через 15 мин, т. е. в 01:30, следы  $O$ - и  $X$ -составляющих заметно расширились, как и следы наклонных отражений (рис. 3, а). Определение критической частоты  $f_oF2$  стало затруднительным.

В 01:45 следы на ионограмме продолжали расширяться (рис. 3, б). Это же относится и к «двукратному» сигналу. Определение критической частоты  $f_oF2$  стало весьма сложным.

На ионограмме, зарегистрированной в 03:00, наблюдались еще более широкие следы. «Двукратный» сигнал при этом отмечался неуверенно. Вторично наблюдался загиб левого конца следа  $X$ -составляющей, соответствующий частотам 1.8...2.2 МГц.

**Анализ  $f$ -графиков.** Временные зависимости критических частот  $f_oF2(t)$  и  $f_xF2(t)$  показаны на рис. 4. Из рис. 4, а 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 уменьшение величины  $f_oF2$ , а затем ее увеличение. Это связано с предвосходными и восходными эффектами в ионосфере. В ночь с 29 на 30 марта 2005 г., т. е. в период СР, поведение  $f_oF2$  было иным. Непосредственно перед СР наблюдалось некоторое (примерно на 0.2 МГц) уменьшение  $f_oF2$ . Оно продолжалось и первые 15 мин после СР. Затем началось увеличение  $f_oF2$  от 3.75 до

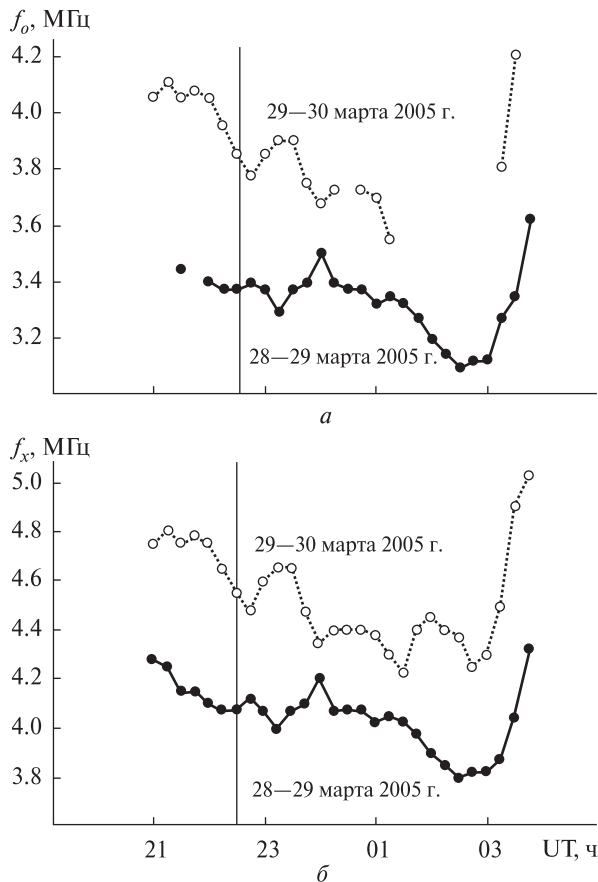


Рис. 4. Зависимость  $f_oF2$  (а) и  $f_xF2$  (б) от времени в фоновый период (точки) и в период СР (кружки). Вертикальной линией показан момент запуска ракеты

3.9 МГц. Увеличение продолжалось в течение 45 мин. После 23:30 оно сменилось 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  $O$ -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. 4, б). Определение  $f_xF2$  оказалось возможным и в интервале времени 01:15...03:15.

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 различались. Изменения во временном ходе наступали с запаздываниями 14...29, 90...105 и 180...195 мин (напомним, что ионограммы снимались через каждые 15 мин).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Не вызывает сомнений тот факт, что характер ионограмм и  $f$ -графики в контрольный интервал времени (за сутки до СР) и в период СР существенно различались. Но при этом было другим и состояние космической погоды, влияющей на состояние ионосферы. В ночь, когда произошел СР, наблюдалась весьма умеренная магнитная буря. Индекс  $AE$  и подвод энергии в магнитосферу в полярных областях (функция Акасофу  $\epsilon$ ) при этом увеличились в 5...7 раз (см. рис. 1).

Инжекция энергии приводит, в частности, к генерации в авроральных областях внутренних гравитационных волн (ВГВ), которые распространяются к средним широтам. Время их распространения до широты, где находилось средство диагностики, составляло около 1...2 ч. Если генерация ВГВ произошла в интервале времени 23:00...24:00 29 марта, до широты наблюдения волна дошла в 00:00...02:00. Диффузность (уширение следов) началась в 1:30 и продолжалась, усиливаясь, около 2 ч. Как известно, причиной диффузности, называемой также  $F$ -рассеянием, является рассеяние зондирующей радиоволны достаточно мелкомасштабными неоднородностями концентрации электронов  $N$ . Причиной их появления служит плазменная турбулентность, которая усиливается в периоды магнитных бурь.

Квазипериодические вариации  $f_{o,x} F2$  вызываются прохождением ВГВ, которые модулируют  $N$ . Если эти вариации вызваны СР, по запаздыванию вариаций  $f_{o,x} F2$  можно определить время распространения возмущений.

Выше оценены времена запаздывания  $\Delta t$ . Они близки к 14...29, 90...165 и 180...195 мин. Точнее эти времена определить не удастся из-за низкой частоты регистрации ионограмм. 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 км), 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, [10]). Эту скорость имеют медленные магнитогидродинамические волны, а также магнитоградиентные волны.

Скорость  $v_2 \approx 375...440$  м/с свойственна ВГВ. Эти волны наблюдались различными методами практически после каждого СР (см., например, [10, 11]). 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.

Добавим, что скорость 200...220 м/с не имеет самостоятельного значения. Она отражает факт периодичности ВГВ. Величина периода  $T$  при этом составляла около 90 мин, а длина волны — около 2000...2400 км. Такие периоды и длины волн, действительно, свойственны ВГВ.

Для исследования обсуждаемых эффектов, кроме ионозонда, использовался харьковский радар некогерентного рассеяния (НР) [1]. Целесообразно сравнить результаты, полученные при помощи двух независимых методов.

По данным метода НР примерно через  $\Delta t_1 \approx 20...30$  мин после СР произошло уменьшение  $N$  в диапазоне высот 260...320 км, которое затем сменилось ее увеличением. Максимальное значение  $N$  наблюдалось примерно через 60 мин после СР. Второй максимум в  $N$  начал проявляться через время  $\Delta t_2 \approx 100...110$  мин. Величина квазипериода составляла около 50 мин, а общая продолжительность возмущений — не менее 2.5 ч.

Скорректированные значения  $\Delta t_1 \approx 17...27$  мин,  $\Delta t_2 \approx 97...107$  мин. Им соответствовали  $v_1 = 1.4...2.3$  км/с и  $v_2 \approx 360...390$  м/с. Видно, что оба мето-

да для области высот вблизи максимума ионизации дают близкие результаты.

Полученные значения скоростей, периода колебаний и продолжительностей возмущений близки к тем, что наблюдались ранее как другими исследователями [11], так и нами [1–3, 6, 10]. Это обстоятельство позволяет с определенной степенью уверенности утверждать, что нами обнаружена реакция на СР «Протон». Особенностью этой реакции было то, что она проявлялась на фоне весьма умеренной магнитной бури.

## ВЫВОДЫ

1. Старт мощной ракеты «Протон» сопровождался возникновением в  $F$ -области ионосферы двух типов возмущений. Возмущения сопровождалось 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 медленным магнитогиродинамическим или магнитоградиентным волнам и ВГВ соответственно.

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

3. Возникшая примерно через 3 ч после старта ракеты диффузность в  $F$ -области ионосферы, скорее всего, является результатом воздействия на ионосферу геокосмической бури.

1. Бурмака В. П., Лысенко В. Н., Черногор Л. Ф., Черняк Ю. В. Волновые процессы в  $F$ -области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2006. — **46**, № 6. — С. 783–800.
2. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствующие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэронавигация. — 2004. — **44**, № 4. — С. 518–534.
3. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф. и др. Радиофизические исследования процессов в космической плазме, возмущенной высокоэнергетическими источниками // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. — 1999. — № 8. — С. 3–19.

4. Горельий С. И., Лампей В. К., Никольский А. В. Ионосферные эффекты стартов космических аппаратов // Геомагнетизм и аэронавигация. — 1994. — **4**, № 3. — С. 158–161.
5. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем // Космические исследования. — 1980. — **18**, № 2. — С. 266–277.
6. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. — 1999. — **4**, № 3. — С. 227–246.
7. Нагорский П. М. Анализ отклика КВ-сигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами // Изв. вузов. Радиофизика. — 1999. — **42**, № 1. — С. 36–44.
8. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. — 2003. — **8**, № 1. — С. 59–106.
9. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. — 528 с.
10. Черногор Л. Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. — Х.: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. — 386 с.
11. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, Д. В. Петрова. — М.: Анкил, 2000. — 640 с.
12. Mendillo M. The effects of rocket launches of the ionosphere // Adv. Space Res. — 1981. — **1**. — P. 275–290.

Надійшла до редакції 25.11.09

T. G. Zhivolup, L. F. Chernogor

## IONOSPHERIC EFFECTS DURING ROCKET «PROTON» FLIGHT: RESULTS OF VERTICAL SOUNDING

We present some results of observations of the ionosphere disturbances which arose during the launching site and flight of rocket the «Proton». The rocket was launched from the Baikonur site at 22:31 UT on 29 March 2005 during a moderate magnetic storm ( $K_{\text{max}} = 4$ ). Disturbances from the rocket were superimposed on disturbances caused by the magnetic storm. The disturbances which arose in the ionosphere with delays of 11–26 and 87–102 min were connected with the rocket launching. Velocities of 1.5–3.5 km/s and 375–440 m/s corresponded to these delays. Such velocities can be attributed to slow MHD or magneto-gradient waves and internal gravitational waves. The relative amplitude of disturbances of electron density and their period were equal to 2.5–5 % and 90 min, respectively.