

Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет “Союз” и “Протон”

В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор¹, Ю. В. Черняк

*Институт ионосферы НАНУ и МОНУ,
ул. Краснознаменная, 16, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: iion@kpi.kharkov.ua*

*¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61077, Украина
E-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2005 г.

Описаны результаты наблюдений реакции ионосферы на старты ракет (СР), имевших место в 2003-2004 гг. (всего девять событий). Уверенно наблюдались возмущения со скоростью перемещения $560 \div 740$ м/с. Более быстрые ($1 \div 5$ км/с) возмущения отмечались неуверенно. Вызванные СР возмущения наиболее четко выражены на высотах $150 \div 350$ км. СР приводили в одних случаях к усилению волновых возмущений в ионосфере, а в других – к их подавлению. Относительная амплитуда волновых процессов изменялась в пределах от нескольких единиц до нескольких десятков процентов.

Введение

Эффекты в атмосфере и геокосмосе, вызванные стартами и полетами ракетно-космической техники, изучаются более 40 лет (см., например, [1]). В многочисленных работах описаны эффекты, которые возникают вдоль траектории полета космического аппарата. Исследованию возможных процессов на большом (тысячи километров) удалении от траектории летательного аппарата посвящены лишь отдельные работы (см., например, [2-10]). В этом случае само существование эффектов является проблематичным. Для их поиска целесообразно вначале провести наблюдения возможных эффектов при стартах достаточно мощных ракет с ближайших к месту регистрации (вблизи г. Харькова) космодромов. Такими космодромами являются Плесецк и Байконур. На первом из них объявленные пуски ракет осуществляются сравни-

тельно редко, и мощность стартующих ракет несколько меньше. Поэтому в настоящей работе описаны результаты наблюдений возмущений в ионосфере, сопутствовавших стартам ракет (СР) “Союз” и “Протон” с космодрома Байконур в 2003-2004 гг. Для наблюдений использовался харьковский радар некогерентного рассеяния [11]. Основное внимание уделялось поиску волновых возмущений (ВВ) в ионосфере на высотах $z \approx 100 \div 500$ км. Исследование ВВ в атмосфере и геокосмосе представляет самостоятельную значимость (см., например, [12-15]). Дело в том, что ВВ почти всегда присутствуют в околоземной среде. Они играют значительную роль в переносе энергии и импульса из одних областей атмосферы и геокосмоса в другие и ответственны за взаимодействие подсистем в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера [14]. ВВ существенно влияют на функционирование радиотехнических и теле-

коммуникационных систем, заметно ограничивая их потенциальные возможности. С другой стороны, сами ВВ могут использоваться для дистанционной диагностики околоземной среды. Все это предопределяет повышенный интерес к ВВ. Идея изучения ВВ, вызванных стартами и полетами космических аппаратов, оказывается весьма плодотворной. В этом случае хорошо известно место и время энергосвечения, мощность источника достигает $10^{11} \div 10^{12}$ Вт, его энергия составляет $10^{13} \div 10^{14}$ Дж [8, 14].

Целью настоящей работы является изложение и обсуждение результатов наблюдений ВВ в ионосфере, сопутствовавших стартам девяти ракет типа “Союз” и “Протон” с космодрома Байконур в 2003-2004 гг.

Средства радиозондирования геокосмоса

Радар некогерентного рассеяния (НР). Единственный в среднеширотной Европе радар НР расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы (49°36′ с. ш., 36°18′ в. д.) [11]. Основные параметры радара следующие: рабочая частота – 158 МГц, диаметр параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – около 3700 м², коэффициент усиления антенны – около 10^4 , ширина основного лепестка вертикально ориентированной диаграммы направленности на уровне половинной мощности – около 1°, импульсная мощность радиопередающего устройства – $P_i = 3.6$ МВт, его средняя мощность – 100 кВт, длительность импульса – $\tau = 65 \div 800$ мкс, частота повторения импульсов – 24.4 Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет $\Delta f = 5.5 \div 9.5$ кГц. Эффективная шумовая температура системы зависит от времени суток, сезона и уровня промышленных помех и изменяется в пределах 1300 ÷ 1800 К.

Радар НР подключен к локальной вычислительной сети, образуя измерительно-вычислительный комплекс, который осуществ-

ляет предварительную обработку НР-сигнала в реальном масштабе времени.

Ионозонд. Стандартный ионозонд “БАЗИС” предназначен для общего контроля состояния ионосферы и калибровки мощности НР-сигналов. Погрешность измерения критической частоты области F ионосферы составляет около $0.05 \div 0.1$ МГц, мощность радиопередающего устройства – 10 кВт, диапазон частот – $1 \div 40$ МГц, период получения одной ионограммы – $1 \div 60$ мин. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории рядом с радаром НР.

Краткие сведения о ракетах

Российская ракета “Союз” относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет 305 т, начальная тяга – 4.14 МН, высота – 46.1 м, низкоорбитная полезная нагрузка – 6855 кг на высоте 200 км. Параметры нулевой ступени следующие: масса – 4×44.4 т, тяга – 4×1.02 МН, диаметр – 2.7 м, высота – 19.6 м, время работы – 120 с. Параметры первой ступени такие: масса – 105.4 т, тяга – 1 МН, диаметр – 3 м, высота – 27.8 м, время работы – 286 с. Вторая ступень имеет следующие параметры: масса – 25.2 т, тяга – 0.3 МН, диаметр – 2.7 м, высота – 6.7 м, время работы – 300 с.

Ракета “Протон” относится к самым тяжелым российским ракетам. Ее полная масса составляет 711 т, начальная тяга – 8.84 МН, высота – 59 м, низкоорбитная полезная нагрузка – 19.76 т на высоте 200 км. Параметры первой ступени: масса – 450.5 т, тяга – 10.46 МН, диаметр – 4.2 м, высота – 21.2 м, время работы – 124 с. Параметры второй ступени: масса – 167.8 т, тяга – 2.4 МН, диаметр – 4.2 м, высота – 14 м, время работы – 206 с. Третья ступень имеет следующие параметры: масса – 50.7 т, тяга – 0.63 МН, диаметр – 4.2 м, высота – 6.5 м, время работы – 238 с. Параметры четвертой ступени: масса – 17.3 т, тяга – 0.085 МН, диаметр – 3.7 м, высота – 7.1 м, время работы – 600 с.

Методика выявления квазипериодических процессов

В настоящей работе использовалась методика выявления ВВ, описанная авторами в [9, 10]. Она предполагает статистическое усреднение массивов данных смеси НР сигнал + шум и шума с целью получения базовых оценок мощностей сигнала P_s и шума P_n на интервале времени $\Delta T_0 = 1 \div 1.5$ мин. После удаления тренда \bar{P}_s , вычисляемого на интервале времени $n_1 \Delta T_0$ с шагом скольжения ΔT_0 (обычно $n_1 = 40 \div 60$), находились временные ряды значений $\delta P_s = P_s - \bar{P}_s$. Для обеспечения возможности сравнения амплитуд ВВ на разных высотах z учитывалась зависимость $P_s \sim z^{-2}$ (или зависимость отношения сигнал/шум $q \sim z^{-2}$). При этом исключалась также зависимость P_s от $(1 + T_e/T_i)$, где T_e и T_i – температуры электронов и ионов. К рядам δP_s применялось сглаживание на интервале времени $n_2 \Delta T_0$ с шагом скольжения ΔT_0 (обычно $n_2 = 10 \div 15$). Полученные таким образом сглаженные значения $\overline{\delta P_s}$ пропорциональны абсолютным значениям вариаций ΔN электронной концентрации N на данной высоте. При этом относительные амплитуды $\delta_N = \Delta N/N \approx \overline{\delta P_s}/P_s$.

Зависимость P_s содержит нерегулярную и регулярную (квазипериодическую) составляющие. Применение сглаживания на интервале времени $n_2 \Delta T_0$ позволяет обнаружить ВВ, если его амплитуда существенно ниже амплитуды среднего квадратического отклонения нерегулярной составляющей. Выигрыш в отношении “сигнал/шум” при этом обеспечивается малостью интервала корреляции τ_c нерегулярной составляющей (“шума”), равного ΔT_0 , по сравнению с периодом T регулярной составляющей (“сигнала”). Обычно $T/\tau_c \approx 30 \div 100$, а $n_2 \Delta T_0/\tau_c = n_2 = 10 \div 15$. Работоспособность описанной методики фильтрации иллюстрируется в Приложении.

Для возможности сравнения амплитуд ВВ в разных измерительных кампаниях формировались безразмерные величины $\overline{\delta q} = \overline{\delta P_s}/P_n$, где P_n – среднее за время на-

блюдения (обычно за сутки) значение мощности шума. Если в разных измерительных кампаниях использовались различные значения P_i , τ и Δf , отношения $\overline{\delta q}$ приводились к одним и тем же значениям указанных параметров.

Необходимость нормирования на $\overline{P_n}$ связана с тем, что в методе НР, как известно, проводятся измерения P_s и P_n в относительных единицах. Получаемый из этих данных профиль концентрации электронов нормируется при помощи ионозондовых измерений. Измерение P_s и P_n в абсолютных единицах было бы возможным при наличии калибратора. Из-за его отсутствия нами изучались суточные и сезонные вариации статистических характеристик P_n . Знание последних позволило обосновать возможность нормировки P_s и δP_s на $\overline{P_n}$.

Для выявления ВВ с преобладающими амплитудами производился спектральный анализ временных рядов значений $\overline{\delta q}(t)$ и $\delta_N(t)$.

Если до СР имели место квазипериодические вариации $\overline{\delta q}(t)$, то оценивались их средняя амплитуда и средний период и формировался процесс $\delta q_0(t)$. Амплитуда и период оценивались по временной зависимости, а также при помощи спектрального анализа на интервале времени, равном двум искомым периодам $2T$ или превышающем значение $2T$. Мерой влияния СР на ВВ в ионосфере был процесс $s_q(t) = \overline{\delta q}(t) - \delta q_0(t)$. Очевидно, что большим отклонениям значений сигнала $s_q(t)$ от нуля соответствовала более интенсивная реакция среды на СР.

Старт ракеты “Союз”

18 октября 2003 г.

Целью наблюдений был поиск ВВ в утреннее время. Представление о магнитной активности во время этого и последующих СР можно получить из табл. 1. Параметры радара обеспечивали значения отношения сигнал/шум q около 0.1 и 5 в ночное и дневное время соответственно. При этом минимальное значение δ_N , определяемое с заданной относительной погрешностью ($\pm 50\%$), $\delta_{N\min} \approx 8 \div 1\%$.

Таблица 1. Геомагнитная обстановка во время измерений

Дата	Время набл. UT, ч	K_p								A_p
		0 ÷ 3	3 ÷ 6	6 ÷ 9	9 ÷ 12	12 ÷ 15	15 ÷ 18	18 ÷ 21	21 ÷ 24	
18.10.03	02 ÷ 14	4	5	4	4	4	3	4	4	27
10.12.03	14 ÷ 24	5	4	5	6	5	5	5	4	42
11.12.03	00 ÷ 02	5	5	6	5	4	5	3	4	40
27.12.03	15 ÷ 24	3	3	2	3	3	3	3	4	12
28.12.03	00 ÷ 03	3	3	2	3	3	3	3	2	12
29.01.04	11 ÷ 17	1	2	2	4	4	3	2	2	10
15.03.04	21 ÷ 24	4	3	2	3	3	3	3	2	13
16.03.04	00 ÷ 03	3	2	1	3	2	3	2	2	8
25.05.04	11 ÷ 16	2	1	3	3	3	2	2	2	8
17.06.04	21 ÷ 24	1	3	2	2	2	2	3	2	7
18.06.04	00 ÷ 03	1	2	2	3	2	3	2	2	8
29.10.04	18 ÷ 24	0	0	1	3	3	2	3	1	7
30.10.04	00 ÷ 03	4	3	3	4	3	3	2	3	17
08.11.04	12 ÷ 24	9	9	9	8	6	3	4	5	189

СР имел место в 05:37 (здесь и далее UT). Измерения для диапазона высот 125 ÷ 1000 км выполнены с 21:00 17 октября до 15:00 18 октября 2003 г. (интервал времени, представленный на рисунках, может быть меньше времени измерений). СР пришелся на утреннее время, отношение q в средней (до 300 км) и внешней ионосфере составляло 3 ÷ 5 и 0.3 ÷ 1 соответственно. При этом $\delta_{N\min} \approx 3 \div 1 \%$. Характеристики режимов работы радара приведены в табл. 2.

Эффекты от утреннего терминатора в этот день были слабыми. К моменту СР их проявления не наблюдались.

Через 3 ÷ 4 часа после восхода Солнца электронная концентрация в ионосфере заметно возросла на всех высотах. При этом также увеличилась в 5 ÷ 10 раз абсолютная амплитуда ΔN ВВ (рис. 1). Колебания δq стали более упорядоченными. На высотах $z \approx 140 \div 180$ км период основных колебаний составлял 40 ÷ 45 мин. В то же время на высотах 200 ÷ 500 км, кроме указанного периода, был хорошо выражен период $T \approx 110$ мин. Продолжительность процесса с $T \approx 110$ мин была около 5 часов. Заметим, что этот про-

цесс стал проявляться через 13 ÷ 20 мин после СР. Изменение характера сигнала после 6:00 хорошо видно из временного поведения процесса $s_q(t)$ на высоте 320 км (см. рис. 1). Амплитуда вариаций s_{qm} увеличивалась примерно втрое.

Относительная амплитуда δ_N до СР была 2 ÷ 4 %, а после него возросла до 3 ÷ 5 %

Таблица 2. Характеристики режимов работы радара (интервал предварительной обработки $\Delta T_0 = 1$ мин и шаг по высоте $\Delta z_0 = 18$ км, диапазон исследуемых высот 125 ÷ 1005 км)

Дата	P_i , МВт	τ , мкс	Δf , кГц
18 октября 2003 г.	2.1	135	6
10-11 декабря 2003 г.	2.2	135	6
27-28 декабря 2003 г.	2	780	9.5
29 января 2004 г.	2	780	9.5
15-16 марта 2004 г.	1.8	780	9.5
25 мая 2004 г.	1.8	640	9.5
17-18 июня 2004 г.	1.8	640	9.5
29-30 октября 2004 г.	2	640	9.5
8 ноября 2004 г.	2	640	9.5

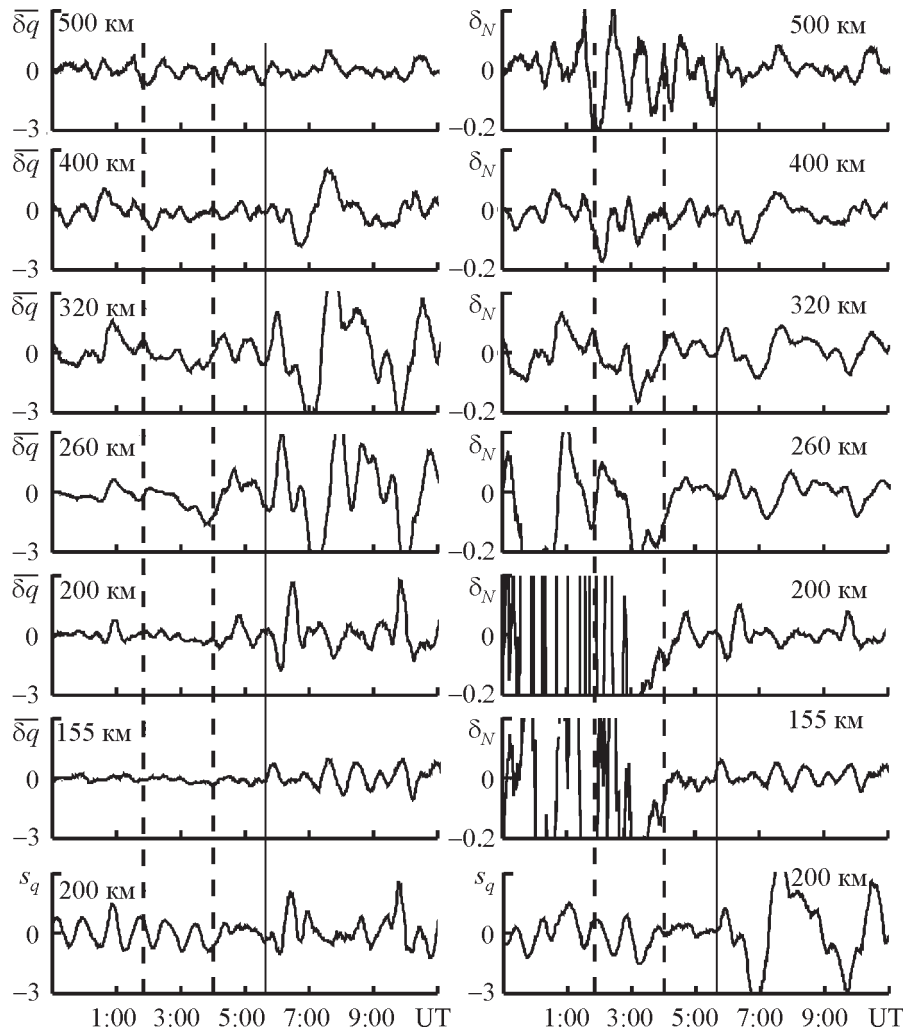


Рис. 1. Временные вариации амплитуд (левая панель) и относительных амплитуд (правая панель) ВВ электронной концентрации, сопровождавших СР “Союз” 18 октября 2003 г. (здесь и далее момент старта отмечен сплошной вертикальной линией). Вертикальными пунктирными линиями (здесь и далее) отмечен момент восхода Солнца на высоте 450 км и на уровне земли по наблюдениям в обсерватории вблизи г. Харьков

(см. рис. 1). Для колебания с $T \approx 110$ мин $\delta_N \approx 10\%$.

Старт ракеты “Протон” 10 декабря 2003 г.

СР произошёл в 17:42 с космодрома Байконур.

Целью этого наблюдения было изучение возможности обнаружения ВВ, вызываемых СР, в ночное время зимой. При этом значения электронной концентрации были дос-

точно низкими ($N \leq 10^{11} \text{ м}^{-3}$), что привело к низким значениям q .

Измерения выполнены в диапазоне высот $125 \div 1000$ км с 14:00 10 декабря до 6:00 11 декабря 2003 г. Характеристики режимов работы радара приведены в табл. 2. Поскольку СР имел место в ночное время, приемлемые значения отношения сигнал/шум ($q \geq 0.1 \div 0.2$) были лишь в диапазоне высот $z \approx 290 \div 455$ км. Важно, что зимой ночью P_s выше, чем в переходное

время суток. Особенно четко это проявляется на высотах $z > 350$ км. Такое поведение $P_s(t)$ обусловлено ночными потоками плазмы из плазмосферы.

ВВ в ионосфере наблюдались как до, так и после СР (рис. 2). Абсолютные значения их амплитуд изменялись во времени сравнительно слабо. После СР значения относительной амплитуды на высотах $z \leq 350$ км несколько увеличились. Со СР, по-видимому, связаны изменения характера сигнала, имеющие задержки $\Delta t_1 = 15 \div 20$ мин и $\Delta t_2 = 60 \div 70$ мин. Лучше всего эти изменения $\overline{\delta q}(t)$ наблюдались на высотах $308 \div 418$ км, в том числе и на высоте 320 км (см. рис. 2).

Старт ракеты “Союз” 27 декабря 2003 г.

СР имел место в 21:30. Целью наблюдения было изучение возможности выявления ВВ, вызванных СР в ночное время вскоре после зимнего солнцестояния. Для обеспечения достаточных значений q использовались импульсы длительностью 780 мкс (см. табл. 2). При этом в зависимости от высоты и времени наблюдения $q \approx 0.2 \div 10$, $\delta_{N\min} \approx 4 \div 0.8$ %.

Измерения для диапазона высот $125 \div 1000$ км выполнены в интервале времени 15:00 27 декабря – 04:00 28 декабря 2003 г.

Временные вариации $\overline{\delta q}$ и δ_N показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что значительное увеличение амплитуд $\overline{\delta q}$ имело место на высотах $250 \div 350$ км вскоре после СР. Эти

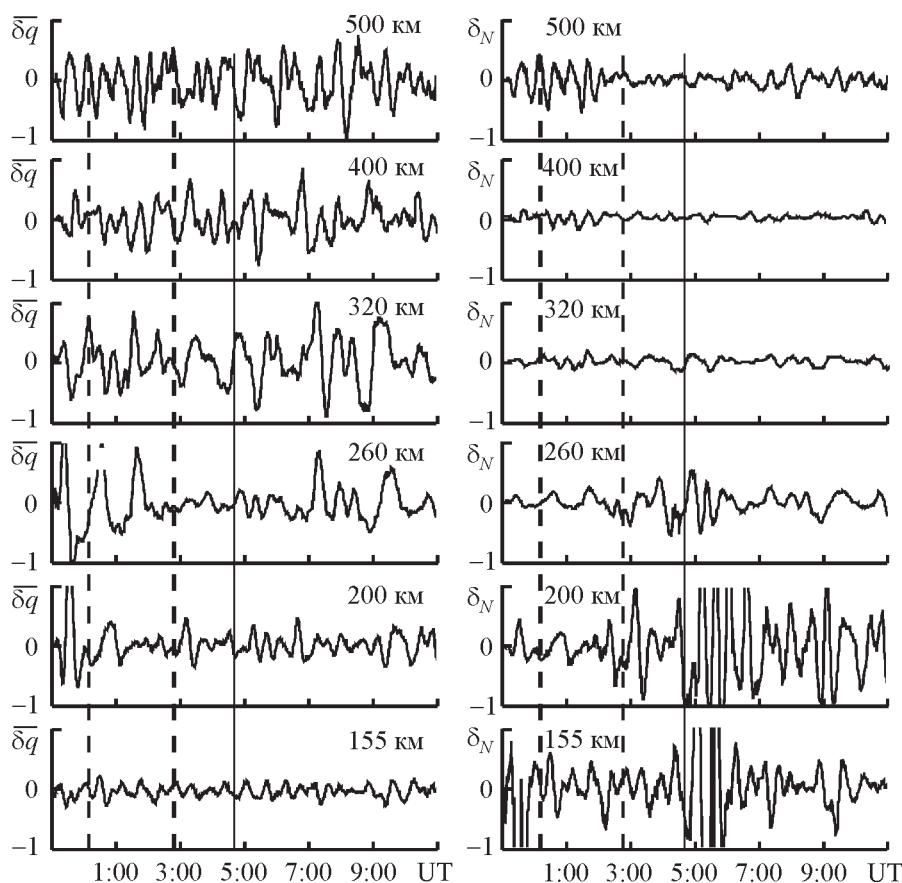


Рис. 2. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты “Протон” 10 декабря 2003 г.

изменения продолжались более 5 часов. Об этом же свидетельствует и поведение $s_q(t)$ на высоте 320 км, где амплитуда s_{qm} выросла на порядок.

Как видно из рис. 3, сначала (примерно до 17:00) имели место слабые вариации δ_N , по-видимому, связанные с прохождением вечернего терминатора. Затем в течение 4÷5 часов наблюдались квазипериодические вариации δ_N с относительной амплитудой, не превышающей 10%. После 21:00 она увеличилась в среднем до 30%. Преобладали колебания с периодами около 65 и 110 мин. Колебания продолжались не менее 4 часов.

ВВ, наблюдавшиеся после 21:30, скорее всего, связаны со СР. Их амплитуда существенно зависела от высоты. Первые 50 км, начиная со 155 км, амплитуда δ_N увеличивалась с ростом высоты, а затем в диапазоне высот 200 ÷ 400 км она убывала почти на порядок. Максимальное значение $\delta_N \approx 40 \div 50\%$ имело место на высоте около 200 км. Эту высоту можно считать высотой расположения атмосферного волновода. Эффективная толщина волновода (по уровню $0.5 \delta_{Nmax}$) составляла около 120 км, причем нижняя и верхняя “стенки” волновода располагались на высотах около 140 и 260 км.

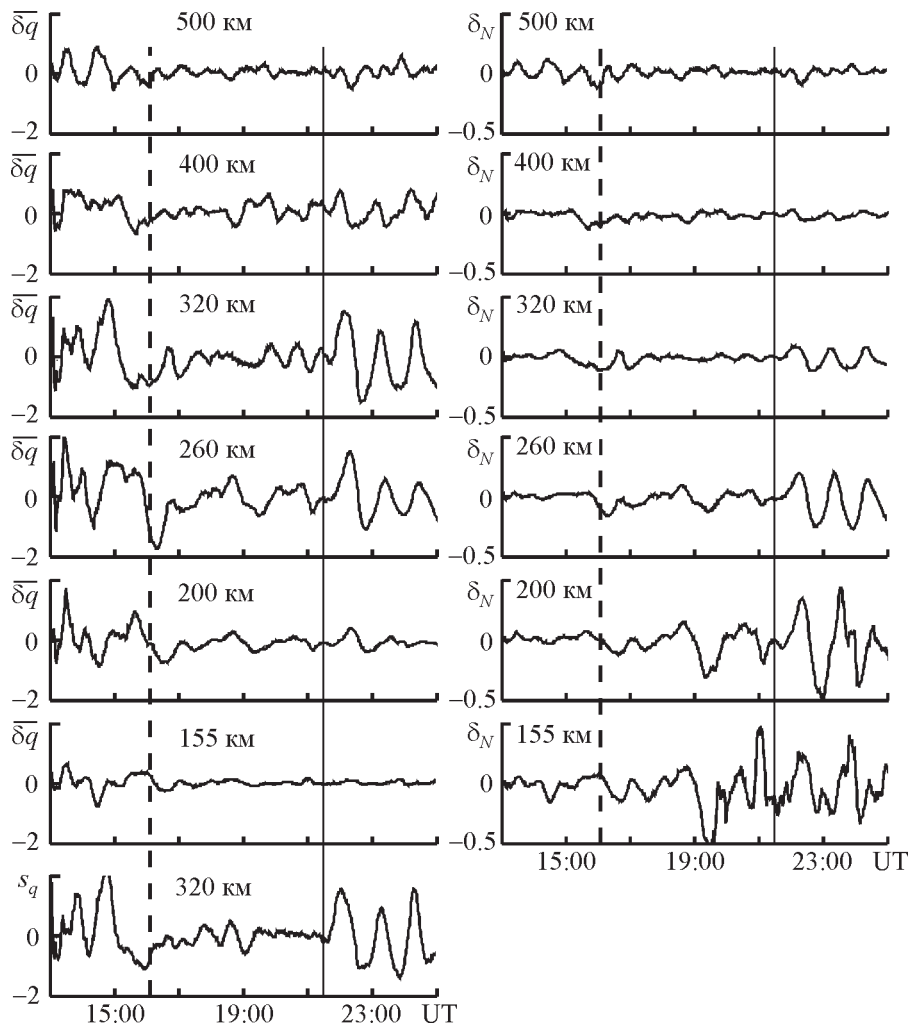


Рис. 3. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты “Союз” 27 декабря 2003 г.

Старт ракеты "Союз" 29 января 2004 г.

Целью этого наблюдения был поиск ВВ в дневное время, в начале второй половины зимы. Отношение q при этом достигало значений около 4, 12, 4, 0.8, 0.3 и 0.05 соответственно на высотах 125, 200, 300, 400, 500 и 700 км. Относительная погрешность оценки δ_N составляла около 15, 10, 10, 25, 50 и 80 % соответственно.

Ракета стартовала в 14:00. Измерения выполнены в интервале времени 11:00 ÷ 16:00. Во временном ходе $N(t)$ на всех высотах

наблюдался максимум с 13:00 до 13:30. ВВ имели место как до, так и после СР (рис. 4). До старта преобладали волновые процессы с периодами около 55 и 95 мин. Относительная амплитуда δ_N достигала 10 %.

Старт ракеты привел к изменению характера временных вариаций $\delta q(t)$ и $\delta_N(t)$ – подавлению существовавшего в ионосфере колебания. Это наблюдалось в диапазоне высот 125 ÷ 500 км, но особенно четко в диапазоне 200 ÷ 260 км. Относительная амплитуда δ_N составляла 5 ÷ 10 %. Наибольшим изменением в поведении $\delta q(t)$

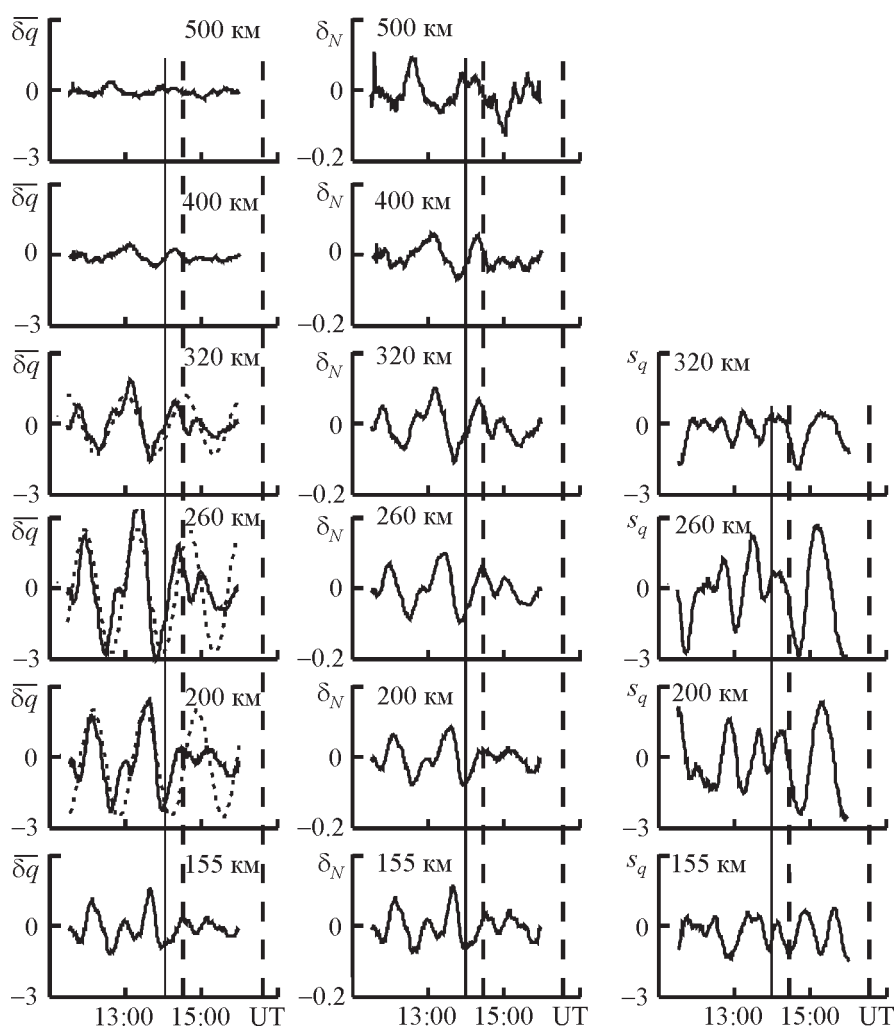


Рис 4. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты "Союз" 29 января 2004 г. Пунктирными кривыми показано колебание, которое преобладало до СР

и $\delta_N(t)$ соответствовало запаздывание около $40 \div 50$ мин. Более быстрые возмущения наблюдались неуверенно. О них свидетельствует, по-видимому, заметное увеличение $\bar{\delta}q$ в первом периоде колебания, следующего за СР, на высотах $180 \div 300$ км (на рис. 4 на высоте 200 км). При этом запаздывание такого возмущения составляло около 10 мин.

Старт ракеты “Протон” 15 марта 2004 г.

Особенностью наблюдения было изучение ВВ, сопутствовавших СР в ночное время весной, вблизи весеннего равноденствия,

когда отношение сигнал/шум q принимало значения $0.2 \div 1$. В дневное время q достигало значения 10. Относительная погрешность оценки δ_N на высотах $125 \div 350$ км не превышала 20%. Измерения выполнены в диапазоне высот $125 \div 1000$ км.

До СР на всех высотах наблюдались ВВ с преобладающим периодом около 55 мин (рис. 5). Их амплитуда была максимальна при $z \approx 320 \div 350$ км. Относительная амплитуда ВВ достигала наибольших значений, близких к $30 \div 40\%$, на высотах $150 \div 200$ км.

СР произошел в 23:06. Структура существовавших ВВ была разрушена примерно

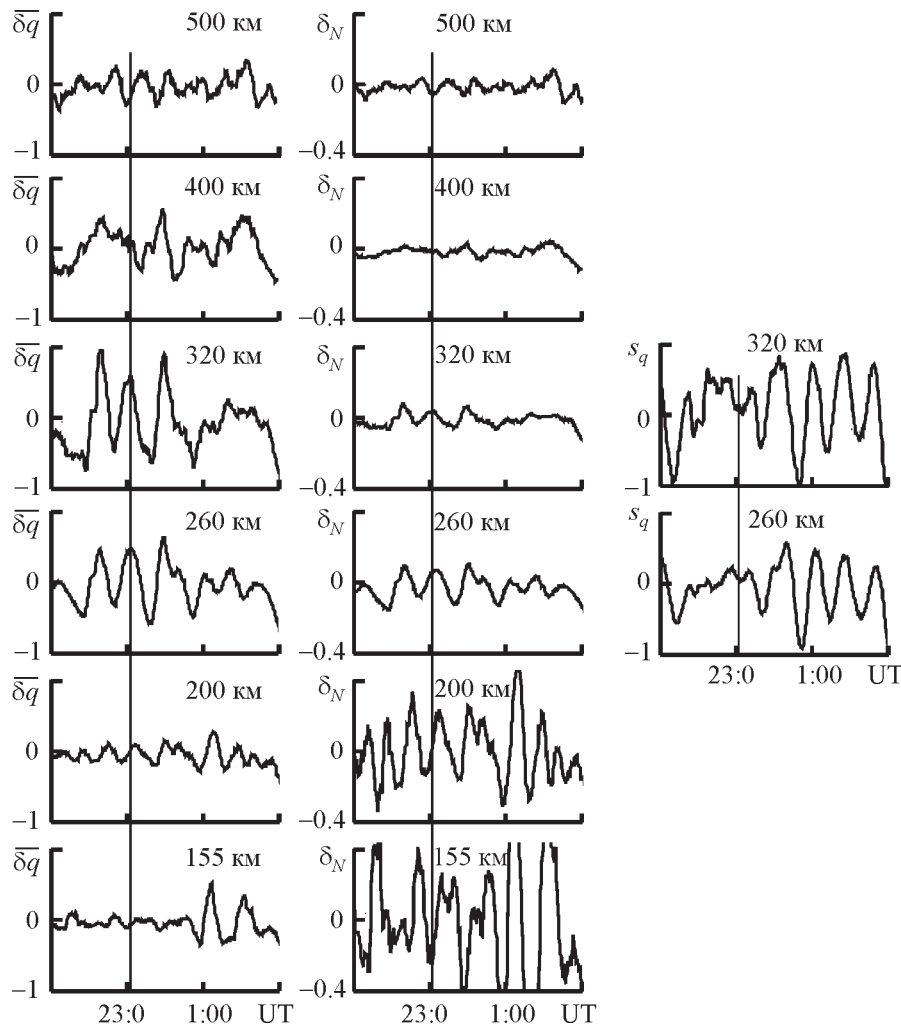


Рис. 5. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты “Протон” 15 марта 2004 г.

через 65 мин после СР. Особенно четко эффект разрушения выражен для $z \approx 250 \div 350$ км. Амплитуда δq уменьшалась в 3 ÷ 5 раз. Об этом же свидетельствует временное поведение процесса $s_q(t)$ (см. рис. 5).

Старт ракеты “Союз” 25 мая 2004 г.

Наблюдение проведено в конце весны. Его целью было исследование ВВ, сопровождавших СР в дневное время в условиях слабой магнитной возмущенности. В эксперименте использовались зондирующие импульсы длительностью 640 мкс, обес-

печивающие разрешающую способность по высоте, близкую к 100 км. Значения q изменялись от 0.5 до 6. Относительная погрешность оценки δ_N при этом составляла 50 ÷ 10 % соответственно.

До СР на всех высотах наблюдались ВВ (рис. 6). Их амплитуда была наибольшей на высотах 200 ÷ 250 км. Относительная амплитуда ВВ была незначительной, не более 4 %. Преобладали колебания с периодом около 30 мин.

СР имел место в 12:34. Через 60 ÷ 70 мин после СР на высотах 150 ÷ 200 км произошло разрушение существовавшего в ионос-

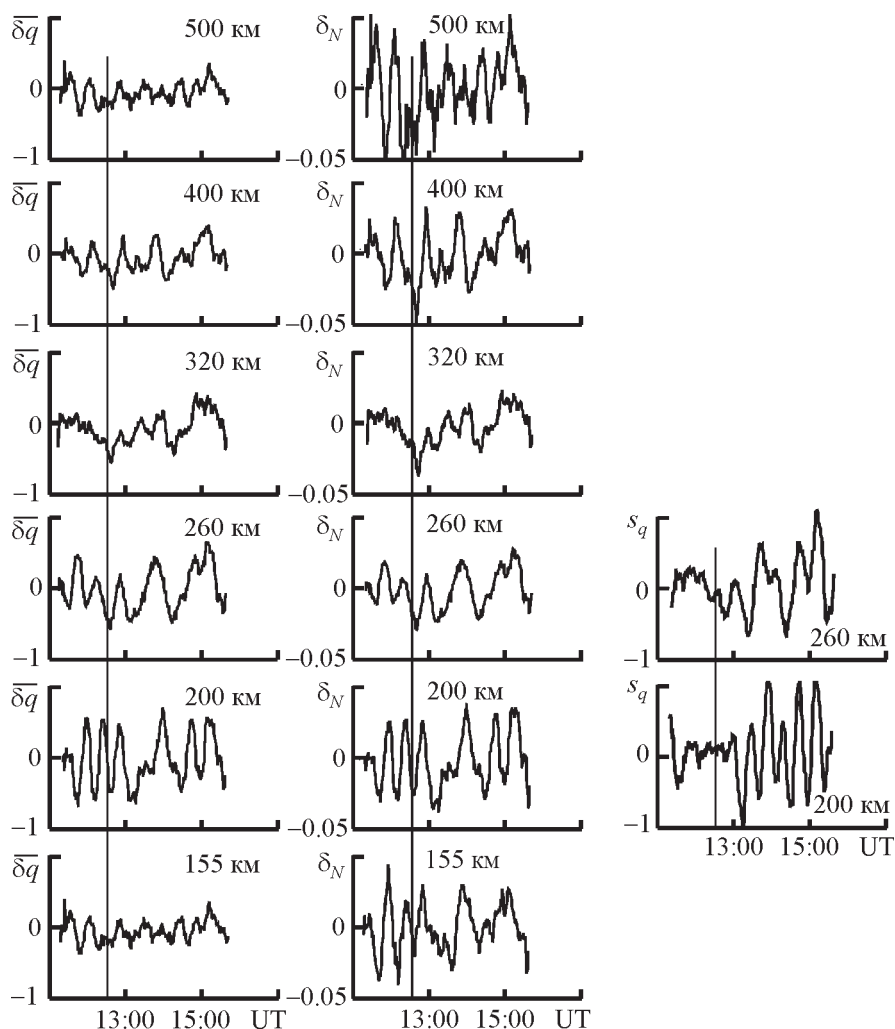


Рис. 6. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты “Союз” 25 мая 2004 г.

фере волнового процесса. Это продолжалось около 40 ÷ 50 мин. После 14:00 наблюдался другой волновой процесс с большим квазипериодом (40 ÷ 60 мин).

Старт ракеты “Протон” 17 июня 2004 г.

Особенностью наблюдения было то, что оно выполнено вблизи летнего солнцестояния. Кроме того, СР в 22:27 произошел на фоне естественных возмущений в ионосфере, вызванных вечерним терминатором (рис. 7). Геомагнитная обстановка была спо-

койной. Значения q изменялись в пределах от 1 до 10. Обычно относительная погрешность оценки δ_N составляла около 15 %, и лишь иногда она достигала 50 %.

До СР ВВ наблюдались по крайней мере на высотах 150 ÷ 400 км (см. рис. 7). Их период составлял около 30 ÷ 40 мин. Амплитуда ВВ была максимальной на высотах 250 ÷ 300 км. Относительная амплитуда ВВ была максимальной (~30 %) на высоте 155 км, а выше она быстро убывала. Скорее всего, эти ВВ были связаны с вечерним терминатором. Амплитуда ВВ существенно изменилась в интервале времени 22:30 ÷ 23:30,

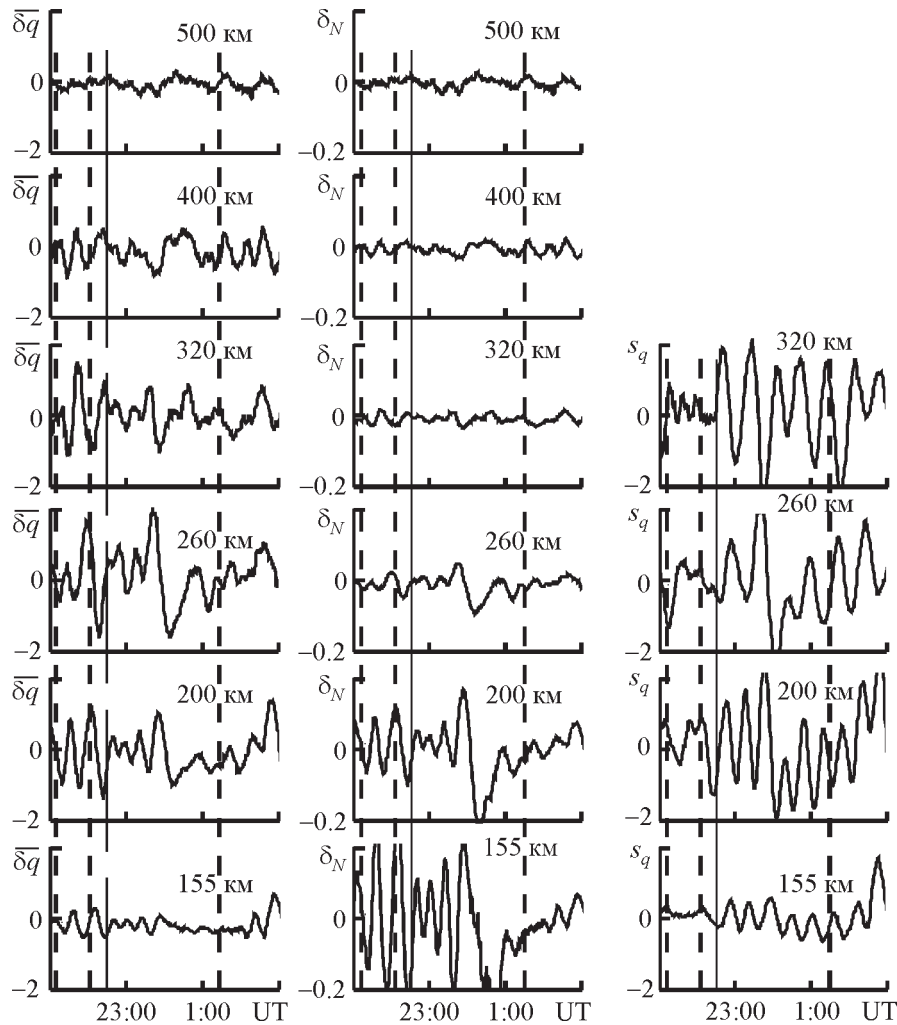


Рис. 7. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты “Протон” 17 июня 2004 г.

т. е. после СР. Следующие вариации характера ВВ проявлялись примерно после 00:30.

Старт ракеты "Протон" 29 октября 2004 г.

Особенностью этого наблюдения было то, что СР имел место вскоре после местной полночи (в 01:11 или 22:11 UT). Геомагнитные возмущения отсутствовали. Отношение сигнал/шум составляло 0.2, 2, 1 и 0.3 на высотах 200, 300, 400 и 500 км соответственно.

Относительная погрешность оценки δ_N на высотах 200 ÷ 300 км не превышала 10%, с ростом высоты она постепенно увеличивалась и на высоте 500 км достигала 40 ÷ 50%.

До СР на всех высотах наблюдались колебания в основном с периодом около 60 мин (рис. 8). Относительная амплитуда ВВ на высотах 150 ÷ 200 км достигала 30 ÷ 40%, выше δ_N постепенно уменьшалась и на высоте 500 км не превышала 6%.

После СР характер ВВ существенно изменился: период преобладающих колеба-

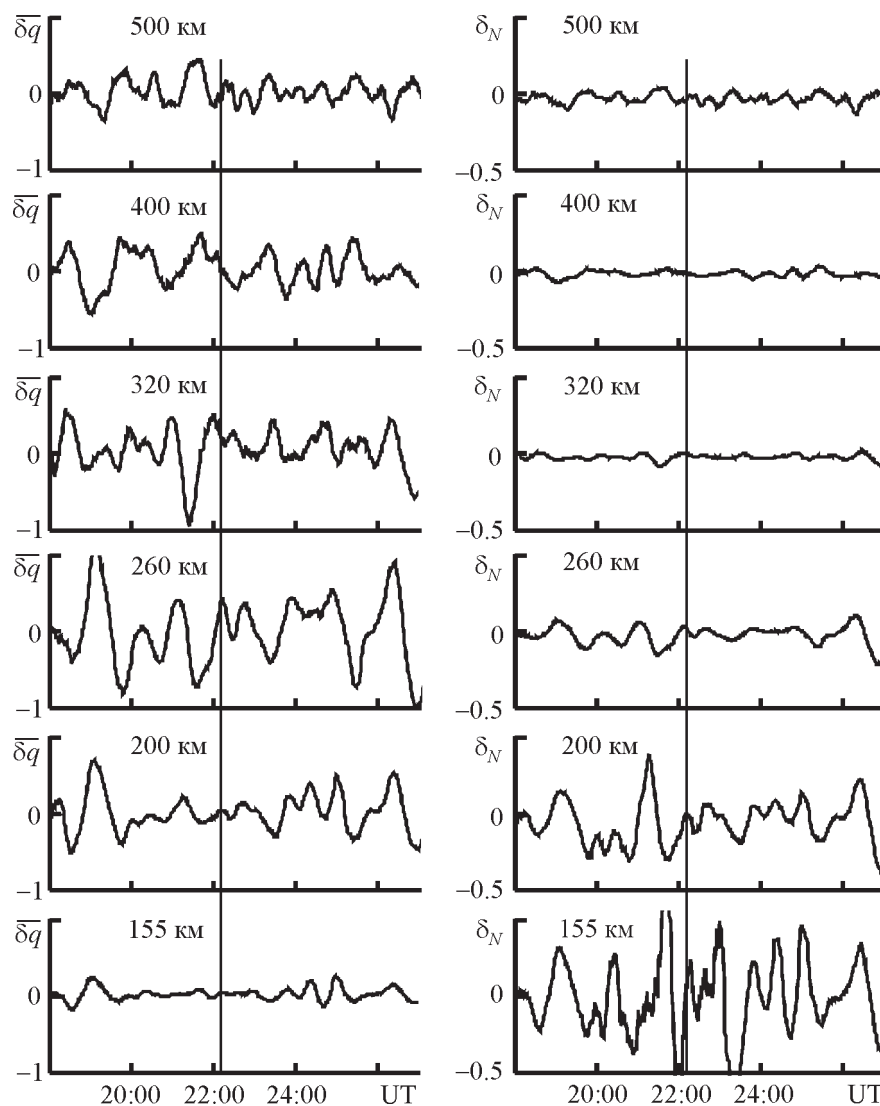


Рис. 8. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты "Протон" 29 октября 2004 г.

ний стал около 30 мин, в $1.5 \div 2$ раза уменьшилась их амплитуда. Важно, что это имело место по крайней мере в диапазоне высот $200 \div 500$ км. Значения δ_N также уменьшились (особенно четко это видно на высотах $200 \div 320$ км (см. рис. 8)). Произошло подавление волновых процессов.

Старт ракеты “Союз” 8 ноября 2004 г.

Наблюдение было выполнено в конце осени. Его особенностью было то, что СР предшествовала сильнейшая магнитная буря. Ее внезапное начало зарегистрировано около 20 часов 7 ноября, главная фаза – с 21 часа 7 ноября до $5 \div 6$ часов 8 ноября. Затем началась фаза восстановления, которая продолжалась около суток, до начала новой

магнитной бури. Первой буре соответствовали индексы $K_p = 9$ и $D_{st \min} \approx -290$ нТл. СР, который имел место в 18:30 с космодрома Плесецк, пришелся на фазу восстановления этой бури.

Заход Солнца на уровне поверхности земли и на высоте 450 км наблюдался соответственно в 14:03 и 16:16. Таким образом, с момента захода Солнца на высоте 450 км и до момента СР прошло более 2 часов.

После СР отношение сигнал/шум составляло $0.2 \div 0.3$, $0.2 \div 0.4$, $0.3 \div 0.5$, $0.2 \div 0.4$, и $0.1 \div 0.2$ на высотах 160, 200, 300, 400 и 500 км. Этим значениям соответствовала относительная погрешность оценки δ_N около $10 \div 40$, $10 \div 15$, $10 \div 20$, $10 \div 50$ и $40 \div 50$ %.

Волновые процессы до СР отмечались на всех высотах (рис. 9). Амплитуда ВВ была

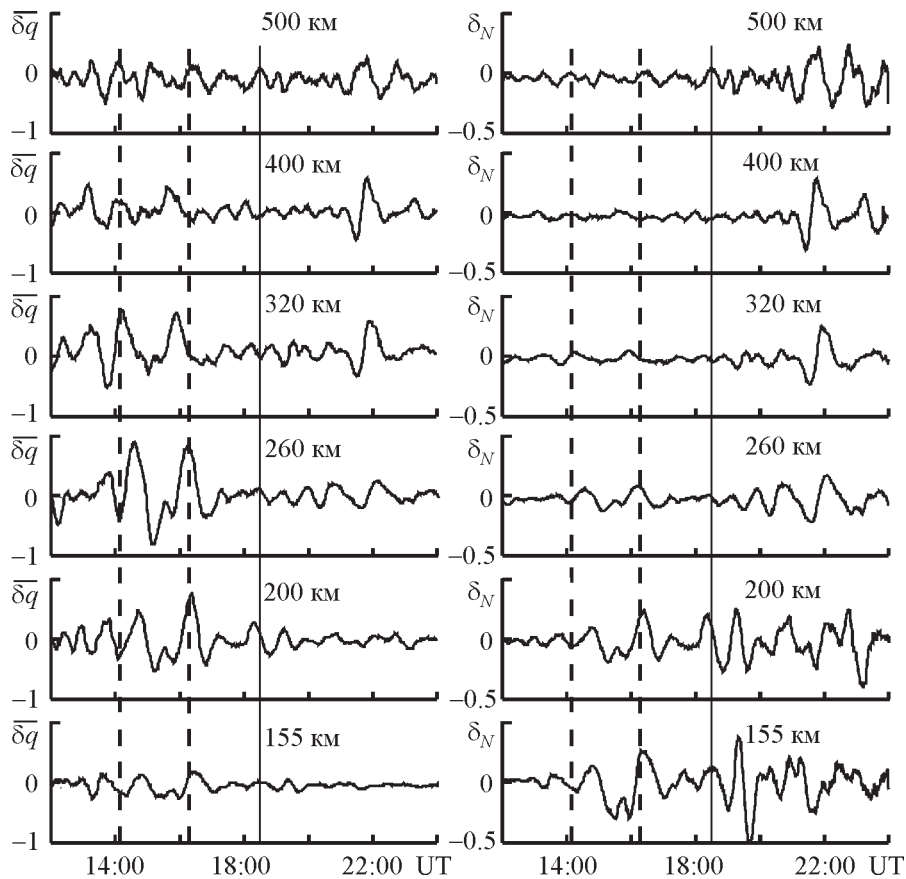


Рис. 9. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации, сопровождавших старт ракеты “Союз 2” 8 ноября 2004 г.

максимальной на высотах $160 \div 360$ км в интервале времени $14:00 \div 16:00$. Примерно такое же поведение было и у относительных амплитуд. Заметное усиление ВВ совпало с прохождением вечернего терминатора.

После $16:30$ наблюдалась тенденция к уменьшению волновой активности. После 21 часа она опять значительно усилилась, это продолжалось не менее 2 часов, период колебаний был около 60 мин.

Обсуждение

Для поиска реакции геокосмической среды на СР нами анализировались временные зависимости мощности сигнала P_s , концентрации электронов N , температур электронов T_e и ионов T_i . Наименьшей погрешностью обладают зависимости $P_s(t)$ или производные от них – $\delta P_s(t)$ и $\delta q(t)$. Это связано с влиянием дополнительных погрешностей в методе НР при решении обратной задачи получения N , T_e и T_i . Погрешность оценки последних параметров в несколько раз больше погрешности оценки δP_s и δq . По этой причине в работе приводятся лишь результаты анализа зависимости $\delta q(t)$.

Для вторичной обработки нами использовался спектральный анализ на интервале времени $2 \div 4$ ч с различным интервалом скольжения (от 0.2 до 0.5 ч). При таком подходе не удается определить время запаздывания Δt возмущений относительно момента СР. Несколько лучшие результаты дало использование вейвлет-анализа. Для оценки Δt предпочтительным оказался анализ временных зависимостей $\delta P_s(t)$ и $\delta q(t)$. Именно эти результаты приведены в настоящей работе.

СР 18 октября 2003 г. Со стартом, скорее всего, связано колебание, имеющее период 110 мин. Оно появилось через $\Delta t = 13 \div 20$ мин после СР. Полагая, как и ранее, что время движения ракеты до области эффективной генерации ВВ ($z \approx 100 \div 120$ км) равно $\Delta t_0 = 3$ мин, получим скорректированное значение времени запаздывания $\Delta t' = \Delta t - \Delta t_0$ [6-9]. При этом скорректированное значение расстояния от ракеты до места регистрации

равно R' . При $\Delta t'_1 = 10 \div 17$ мин и $R' \approx 2100$ км имеем скорректированное значение скорости $v'_1 \approx 3.5 \div 2.1$ км/с. Такие скорости свойственны медленным магнитогидродинамическим (ММГД) волнам, а также магнитогradientным (МГ) волнам [7-10]. Последние можно именовать волнами Абурджанна–Хантадзе. Более медленные процессы, обусловленные генерацией и распространением внутренних гравитационных волн (ВГВ), в этот день наблюдались с задержкой $\Delta t_2 \approx 50 \div 60$ мин на высотах $400 \div 250$ км соответственно (см. рис. 1).

СР 10 декабря 2003 г. Эффекты от СР в этом случае существенно маскировались ВВ, которые имели место до старта. Изменения характера сигнала (сбой фазы колебания, изменения его амплитуды и периода) наблюдались через $15 \div 20$ мин и $60 \div 70$ мин после СР. Это видно по вариациям δq и δN на высотах $200 \div 350$ км (см. рис. 2). Если эти вариации обусловлены СР, им соответствуют v' , равные $2.9 \div 2.1$ км/с и $610 \div 520$ м/с. Такие скорости имеют ММГД (МГ) волны с $\omega \sim 10^{-3}$ с⁻¹ и ВГВ в F-области ионосферы [7, 8].

СР 27 декабря 2003 г. Перед СР имели место достаточно хаотические вариации δq и δN , максимальное значение последних обычно не превышало 10% . Вскоре после СР возникли квазипериодические колебания с периодом $T \approx 65$ мин и относительной амплитудой, достигающей 43% . По-видимому, они вызваны СР. Момент времени прихода ВВ определить сравнительно сложно из-за его наложения на хаотические вариации. Первая положительная полуволна возникла примерно через 16 мин после СР. Скорректированное время распространения ВВ составляло около 13 мин. При скорректированном расстоянии от ракеты до места наблюдения $R' \approx 2100$ км ему соответствовала скорость $v' \approx 2.7$ км/с. Такую скорость при $\omega \sim 10^{-3}$ с⁻¹ имеют ММГД волны [7, 8]. Что касается ВГВ, то они в этом эксперименте четко не проявлялись. Возможно, эти волны вызвали увеличение амплитуды колебательного процесса на высотах $250 \div 350$ км (см. рис. 3), обус-

ловленного приходом более быстрых волн. При этом время запаздывания возмущений было около 50 мин. При $\Delta t'_2 \approx 47$ мин имеем $v'_2 \approx 740$ м/с. Такая скорость действительно свойственна ВГВ на высотах F-области ионосферы.

СР 29 января 2004 г. Наибольшие вариации значений абсолютных и относительных амплитуд ВВ возникли через 40 ÷ 50 мин после СР. Таким запаздываниям соответствует значение $v' \approx 740 \div 950$ м/с. Скорее всего, данное возмущение обусловлено генерацией и распространением ударноакустических волн и ВГВ. Более быстрые возмущения наблюдались неуверенно. Возможно, им соответствовало запаздывание около 10 мин. При этом $v' \approx 5$ км/с. Такую скорость в ионосфере могут иметь ММГД и МГ волны.

СР 15 марта 2004 г. Через 65 мин после СР на высотах 150 ÷ 350 км произошло разрушение структуры существовавших ВВ. Этому запаздыванию соответствует значение $v' \approx 600$ м/с. Такую скорость имеют ВГВ. Поэтому упомянутое возмущение, скорее всего, вызвано стартом и полетом ракеты.

СР 25 мая 2004 г. В данном наблюдении разрушение существовавшего в ионосфере ВВ произошло через 60 ÷ 70 мин после старта ракеты. При этом $v' \approx 520 \div 610$ м/с. Появившейся после разрушения другой волновой процесс имел иной период колебаний и время запаздывания около 90 мин, чему соответствовало значение $v' \approx 400$ м/с. Судя по всему, эти возмущения были вызваны полетом космического аппарата.

СР 17 июня 2004 г. Первое существенное изменение параметров волнового процесса началось примерно через 10 мин после СР, а второе – через 60 мин. Им соответствуют значения $v' \approx 5$ км/с и $v' \approx 600$ м/с. Общая продолжительность возмущений обоих типов составила около 120 мин. Поскольку более быстрое возмущение наблюдалось вскоре после восхода Солнца, нельзя отрицать тот факт, что оно могло быть обусловлено прохождением утреннего терминатора. Второе возмущение, очевидно, обусловлено полетом ракеты.

СР 29 октября 2004 г. Изменение характера ВВ произошло примерно через 10 ÷ 15 мин после СР. Если это возмущение связано со стартом и полетом космического аппарата, то ему соответствует скорректированное значение скорости $v' \approx 3 \div 5$ км/с.

СР 8 ноября 2004 г. После СР наблюдались существенные изменения характера волновых процессов. Они начались через 60, 120 и 150 мин на высотах 250, 300 и 500 км соответственно. Если эти вариации связаны со СР, то им соответствуют скорости распространения возмущений около 580, 290 и 230 м/с. Такую скорость имеют ВГВ.

Таким образом, все СР сопровождалось изменением характера волновых процессов в ионосфере. Хотя массы, мощности и траектории ракет “Союз” и “Протон” заметно отличались, существенной разницы в эффектах при их стартах не обнаружено. ВВ, генерируемые в ионосфере ракетой с работающими двигателями, накладывались на существовавшие волновые процессы. В результате последние либо усиливались, либо ослаблялись. Чаще всего время запаздывания возмущений изменялось от 50 до 65 мин. Этим запаздываниям соответствовали скорости 560 ÷ 740 м/с, которые близки к скоростям ударноакустических волн и ВГВ в F-области ионосферы. Более быстрые возмущения, скорость которых была порядка единиц км/с, наблюдались не всегда и менее уверенно. Генерируемые СР возмущения в основном проявлялись в диапазоне высот 150 ÷ 350 км. Принципиально они ничем не отличались от естественных возмущений. Относительная амплитуда и тех, и других возмущений изменялась от нескольких единиц до нескольких десятков процентов. Их периоды составляли обычно 30 ÷ 60 мин. Схожесть естественных и антропогенных ВВ серьезно затрудняет селекцию последних.

Полученные здесь результаты согласуются с результатами наших более ранних наблюдений [3-6, 8-10]. Это свидетельствует в пользу того, что нами обнаруживались ВВ, вызванные СР.

Основные результаты

1. Все девять СР сопровождались заметным изменением характера ВВ, существовавших в ионосфере до момента старта. Варьировался их спектральный состав и амплитуды спектральных составляющих. В одних случаях ВВ усиливались, в других – подавлялись. Существенной разницы в эффектах при СР "Союз" и "Протон" не замечено.

2. Достаточно уверенно наблюдались возмущения, имевшие запаздывания $50 \div 65$ мин. Им соответствовали скорости распространения $560 \div 740$ м/с. Такие скорости имеют ударноакустические волны и ВГВ в F-области ионосферы. Процессы, которым соответствовала скорость переноса возмущений $1 \div 5$ км/с, наблюдались не всегда и не столь уверенно.

3. Возмущения, вызванные СР, наиболее четко выражены на высотах $150 \div 350$ км.

4. Относительная амплитуда ВВ изменялась от нескольких единиц до нескольких десятков процентов.

5. Полученные в настоящей работе результаты в целом соответствуют результатам наших более ранних наблюдений.

Авторы благодарны В. И. Тарану за проявленный интерес к работе, а Л. Я. Емельянову, В. Н. Лысенко и И. Б. Склярову за проведение измерений.

Приложение

Для проверки работоспособности методики выявления ВВ на фоне случайных флуктуаций проводилось детальное математическое моделирование. В качестве исходного сигнала выбиралась смесь белого шума с интервалом корреляции $\tau_c = 1$ и низкочастотных процессов с характерным временем изменения от 10 до 200 (здесь и далее временные характеристики выражены в относительных единицах). После удаления тренда, вычисляемого на интервале времени $T_1 = 60, 120$ и 180 производилось сглаживание сигнала на интервале времени $T_2 = 10, 15$ и 20 (рис. П1, слева). Затем осуществлялся гармонический анализ (рис. П1,

справа). Из рис. П1 видно, что спектральные составляющие с периодами от T_2 до T_1 практически не искажались. При выборе другой реализации шума в спектре преобладали иные периоды (рис. П2). Это означает, что используемая методика фильтрации не "навязывала" несуществующие в сигнале периоды колебаний.

Литература

1. Экологические проблемы и риски воздействия ракетно-космической техники на окружающую среду. Справочное пособие / Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова и А. В. Петрова. – М.: Анкил, 2000. – 640 с.
2. Засов Г. Ф., Карлов В. Д., Романчук Т. Е., Солодовников Г. К., Ткачев Г. Н., Трухан М. Г. Наблюдение возмущений в нижней ионосфере во время экспериментов по программе Союз – Аполлон // Геомагнетизм и аэрономия. – 1977. – Т. 17, №2. – С. 346-348.
3. Гармаш К. П., Гоков А. М., Костров Л. С., Поднос В. А., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования и моделирование процессов в ионосфере, возмущенной источниками различной природы. 2. Процессы в искусственно возмущенной ионосфере. Вариации характеристик радиосигналов. Моделирование возмущений // Вісник Харківського університету. Радіофізика і електроніка. – 1999. – №427, вип. 1. – С. 3-22.
4. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., Цымбал А. М., Черногор Л. Ф. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергетичными источниками // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №8. – С. 3-19.
5. Garmash K. P., Gokov A. M., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Tsybal A. M., Chernogor L. F. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere Signal Parameters Variations. Disturbances Simulation // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53., No 6. – P. 1-22.
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. – Т. 4, №3. – С. 227-246.

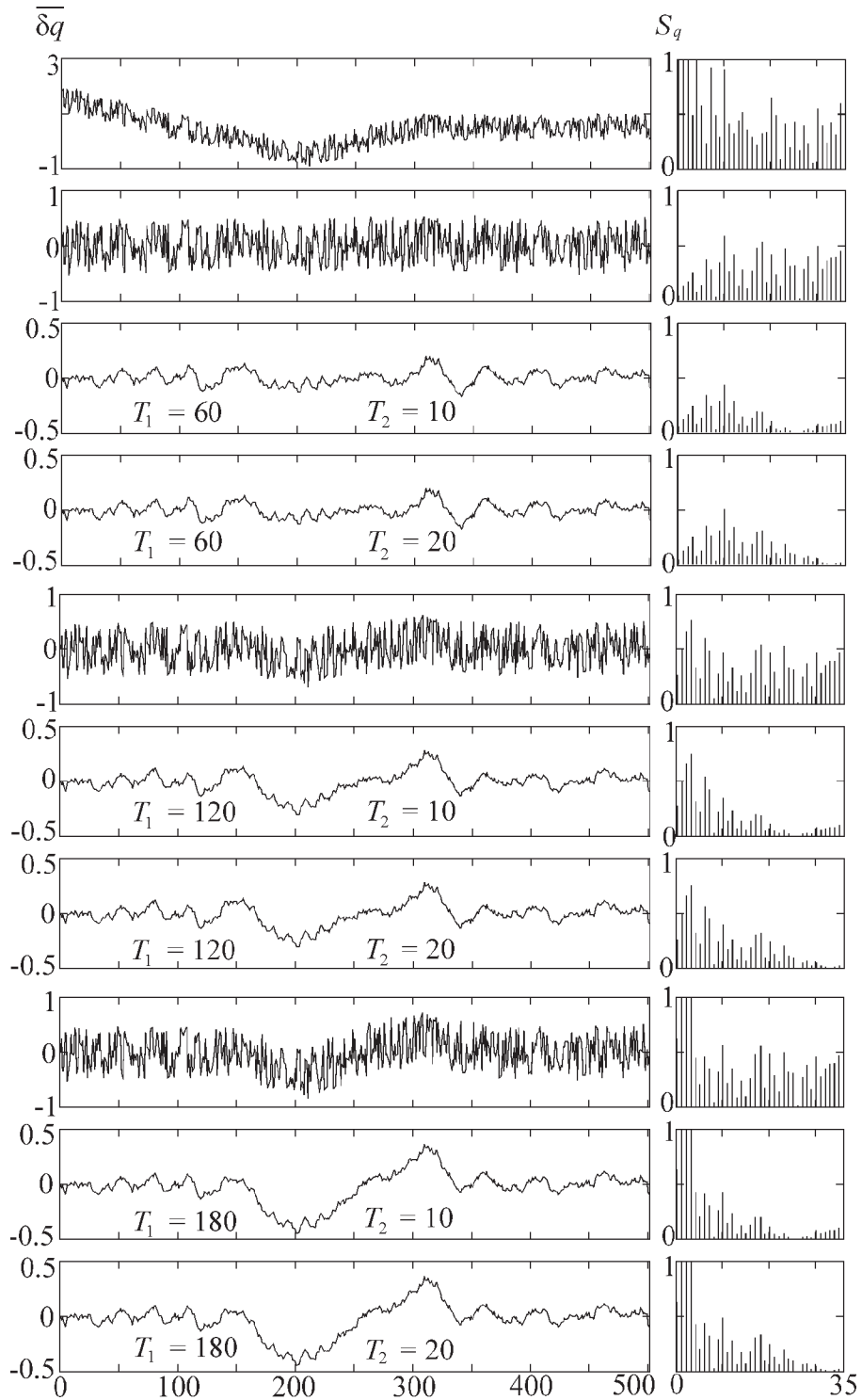


Рис. П. 1. Результаты моделирования: исходный сигнал, сигнал после удаления тренда на интервале $T_1 = 60$, при сглаживании по 10 и 20 значениям, то же самое после удаления тренда на интервале $T_1 = 120$, а затем $T_1 = 180$ (панели сверху вниз)

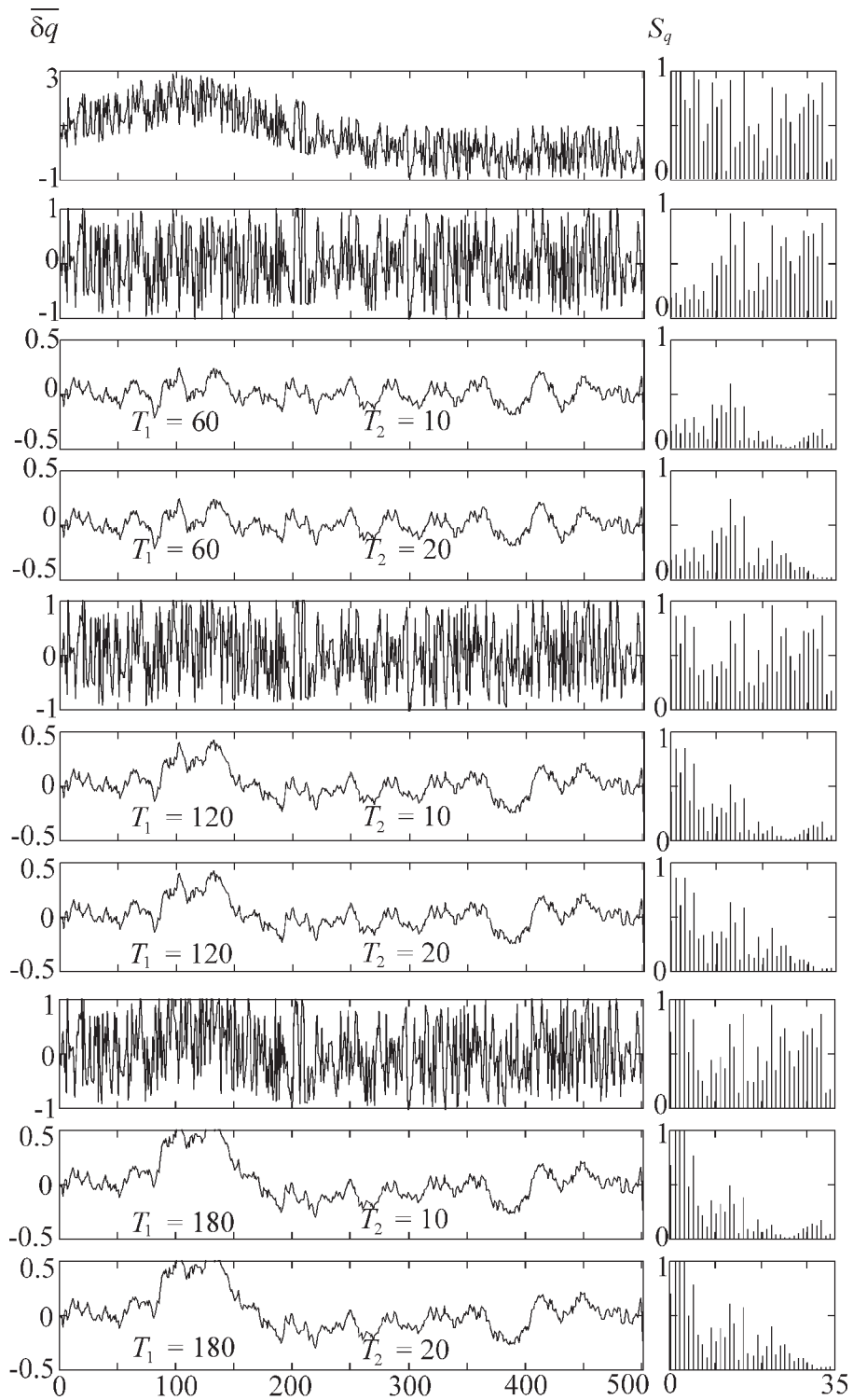


Рис. П. 2. Результаты моделирования (как на рис. П.1.) с другим трендом и шумом

7. Сорокин В. М., Федорович Г. В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат, 1982. – 136 с.
8. Бурмака В. П., Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №2. – С. 143-162.
9. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных стационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №1. – С. 5-28.
10. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэронаука. – 2004. – Т. 44, №4. – С. 518-534.
11. Таран В. И. Исследование ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состоянии методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронаука. – 2001. – Т. 41, №5. – С. 659-666.
12. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
13. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 209-226.
14. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №1. – С. 59-106.
15. Е. И. Григоренко, С. В. Лазоренко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэронаука. – 2003. – Т. 43, №6. – С. 770-787.
16. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождавших страты и полеты ракет // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК. – 2003. – Т. 9, №2. – С. 57-61.

Хвильові збурення у геокосмосі, що супроводжували старти і польоти ракет “Союз” та “Протон”

**В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор,
Ю. В. Черняк**

Описано результати спостережень за реакцією іоносфери на старти ракет (СР), що мали місце у 2003-2004 рр. (всього дев'ять подій). Впевнено спостерігались збурення швидкістю поширення $560 \div 740$ м/с. Швидші ($1 \div 5$ км/с) збурення реєструвались невпевнено. Спричинені СР збурення найчіткіше виражені на висотах $150 \div 350$ км. СР призводили в одних випадках до підсилення хвильових збурень в іоносфері, а у інших – до їх послаблення. Відносна амплітуда хвильових процесів змінювалась від кількох одиниць до кількох десятків процентів.

Geospace Wave Disturbances Accompanying “Soyuz” and “Proton” Launches and Flights

**V. P. Burmaka, L. F. Chernogor,
and Y. V. Tcherniak**

The observational data on the ionosphere response to the missile launches in 2003-2004 are described (nine events in total). The disturbances with propagation velocities of $560 \div 740$ m/s were observed reliably. The faster ($1 \div 5$ km/s) disturbances were recorded with uncertainty. Those launch-resulted ones were most pronounced at altitudes $150 \div 350$ km. In some cases, missile launches resulted in stronger ionospheric wave disturbances, some other cases yielded weaker disturbances. The relative amplitudes of wave processes varied within several to several tens percent.