

Комплексная диагностика ионосферной плазмы, возмущенной удаленными стартами ракет

В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор¹

*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 20 марта 2008 г.

С использованием экспериментальных данных, полученных методом некогерентного рассеяния, проведен анализ крупномасштабных возмущений в ионосферной плазме, вызванных стартами космических аппаратов с космодрома Байконур. Проанализированы высотно-временные зависимости основных параметров плазмы (концентрации электронов N , температур электронов и ионов T_e и T_i) в диапазоне высот $\sim 100 \div 600$ км. Показано, что старты и полеты космических аппаратов сопровождались генерацией волновых возмущений (ВВ) не только N , но и T_e , а также T_i . Найдено, что относительные амплитуды этих ВВ обычно составляли $0.03 \div 0.10$, период колебаний – от 20 до 60 мин. Колебания N , T_e и T_i были сдвинуты по фазе друг относительно друга. Скорости распространения ВВ составляли $\sim 0.5 \div 0.6$ и $1.5 \div 2$ км/с. Для оценки параметров ВВ применялись современные методы спектрального анализа, включая вейвлет-анализ.

Введение

В настоящее время можно считать установленным, что старты ракет (СР) и полеты космических аппаратов (КА) вызывают в ионосфере волновые возмущения (ВВ) на расстояниях не менее 2 тыс. км – расстояние от космодрома Байконур до обсерваторий, расположенных вблизи г. Харькова, (см., например, [1-11]). Авторами работ [1-11] проведены многолетние (около 35 лет) исследования реакции ионосферы на СР и полеты КА. Для этого использовался целый арсенал радиофизических и магнитометрических методов.

Хорошо известно, что радиофизические методы позволяют выявить и изучить ВВ

концентрации электронов N . В то же время для построения динамической физико-математической модели всего комплекса процессов, вызванных СР и полетами КА, требуется знание пространственно-временных вариаций не только концентрации электронов N , но и других параметров плазмы. Комплексную диагностику ионосферной плазмы можно проводить, используя результаты измерений радарными некогерентного рассеяния (НР).

Как известно, метод НР позволяет определять с приемлемыми высотно-временным разрешением и погрешностью такие параметры ионосферной плазмы, как концентрация электронов, температуры электронов и ионов, скорость движения плазмы, ионный

состав и др. По измеряемым первичным параметрам плазмы можно вычислять ее вторичные параметры, которые описывают динамические процессы в среде. К вторичным параметрам относятся частоты соударений, тензоры амбиполярной диффузии и теплопроводности, потоки плазмы и тепла и др.

Для радиофизики геокосмоса и геофизики СР представляют собой активные эксперименты, позволяющие проследить за динамикой физических процессов, вызванных полетом ракеты с работающим двигателем. Исследование этих процессов дает возможность изучить взаимодействие подсистем в системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера [12-15]. Важным звеном во взаимодействии этих подсистем являются волны различной природы.

Таким образом, исследование физических процессов в геокосмосе, диагностика параметров геокосмической плазмы, выявление и идентификация типов волн, переносящих вызванные СР возмущения, являются актуальными задачами.

Цель настоящей работы – изложение результатов исследования и анализа пространственно-временных изменений основных параметров ионосферной плазмы, вызванных СР и полетами КА в геокосмосе.

1. Средства и методы

Радар НР расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы вблизи г. Харькова (49°36' с. ш., 36°18' в. д.). Основные параметры радара следующие: частота – 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны – 100 м, эффективная площадь антенны – около 3700 м², коэффициент усиления антенны – около 10⁴, ширина основного лепестка диаграммы направленности – около 1°, импульсная и средняя мощности радиопередающего устройства достигают 3.6 МВт и 100 кВт соответственно, длительность импульса $\tau \leq 800$ мкс, частота следования импульсов $F = 24.4$ Гц. Полоса

пропускания фильтра радиоприемного устройства составляет 5.5 ÷ 9.5 кГц [6-11].

Результаты измерений были обработаны по методике, описанной в работах [6, 7]. Она заключается в том, что после удаления тренда \bar{P}_s во временных рядах мощности сигнала P_s , вычисляемого на интервале времени 180 мин с шагом скольжения $\Delta T_0 = 1$ мин, находятся временные ряды значений изменений мощности рассеяния $\delta P_s = P_s - \bar{P}_s$, а также относительные изменения этой мощности $\delta_s = \delta P_s / \bar{P}_s$. Для 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 зависимость P_s от параметра $(1 + T_e/T_i)$, где T_e и T_i – температуры электронов и ионов.

К рядам δP_s применялось сглаживание на интервале времени 15 мин с шагом скольжения ΔT_0 . Полученные таким образом сглаженные значения $\overline{\delta P_s}$ пропорциональны абсолютным значениям вариаций δN электронной концентрации N на данной высоте. При этом относительные амплитуды $\delta_N = \delta N / N \approx \delta_s = \overline{\delta P_s} / \bar{P}_s$. Далее по временным рядам $\overline{\delta P_s}$ вычислялись нормированные ряды безразмерного параметра, характеризующего мощность рассеянного сигнала, $\delta q = (\overline{\delta P_s} / \bar{P}_n) \cdot k$, где \bar{P}_n – средний уровень шума за сутки; $k = \frac{P_{\max} \tau_{\max} \Delta f}{P \tau \Delta f_{\max} T_{\text{сист max}}}$ (обозначения с индексом “max” – максимальные из всех значений, полученных во всех измерительных кампаниях, без индекса – текущие значения для каждой отдельной измерительной кампании), P – импульсная мощность радиопередающего устройства, $P_{\max} = 2.2$ МВт, τ – длительность импульса, $\tau_{\max} = 800$ мкс, Δf – полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства, $\Delta f_{\max} = 9.5$ кГц, $T_{\text{сист}}$ – эффективная шумовая температура системы, приведенная ко входу радиоприемного устройства, $T_{\text{сист max}} = 1300 \div 1800$ К в зависимости от времени суток. Введение коэффициента k позволит сравнивать δq , полученные в разных измерительных кампаниях.

Кроме δq и δ_s , по стандартным методикам определялись пространственно-временные вариации $N(t)$, $T_e(t)$ и $T_i(t)$. По ним на интервале времени, равном 180 мин, вычислялись тренды \bar{N} , \bar{T}_e и \bar{T}_i , а также $\delta N = N - \bar{N}$, $\delta T_e = T_e - \bar{T}_e$ и $\delta T_i = T_i - \bar{T}_i$, $\delta_N = \delta N / \bar{N}$, $\delta_{T_e} = \delta T_e / \bar{T}_e$ и $\delta_{T_i} = \delta T_i / \bar{T}_i$. Абсолютные и относительные возмущения параметров плазмы сглаживались на интервале времени 45 мин.

Дальнейшая обработка сводилась к применению оконного и адаптивного преобразований Фурье, а также вейвлет-преобразования. Кроме того, вычислялись энергограммы [16, 17]. Результаты вычислений представлены в специальном формате, рекомендованном в работах [16, 17].

2. Краткие сведения о ракете “Союз”

Российская ракета “Союз” относится к тяжелым ракетам. Ее полная масса составляет – 305 т, начальная тяга – 4.14 МН, высота – 46.1 м, низкоорбитная (на высоте 200 км) полезная нагрузка – 6855 кг. 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: масса – 105.4 т, тяга – 1 МН, диаметр – 3 м, высота – 27.8 м, время работы – 286 с. Параметры второй ступени: масса – 25.2 т, тяга – 0.3 МН, диаметр – 2.7 м, высота – 6.7 м, время работы – 300 с.

3. Состояние космической погоды

Опишем состояние космической погоды, которое удобно представлять в виде временных вариаций параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, плотностей потоков протонов и электронов, а также индексов магнитной и авроральной активностей.

В период, предшествующий СР, состояние космической плазмы характеризовалось как невозмущенное (рис. 1). В день СР, 28 апреля 2001 г., примерно в 3:00 резко увеличились значения концентрации (в 4 раза), температуры (в 5÷7 раз), скорости (в 1.5÷1.8 раза),

давления (в 10 раз) солнечного ветра. Мощность солнечного ветра увеличивалась до 70÷140 ГДж/с. Наблюдалось внезапное начало весьма умеренной (по классификации [12-14]) магнитной бури. При этом индекс D_{st} сначала увеличился до 45 нТл, а затем уменьшился до –50 нТл – наступила главная фаза магнитной бури. Эта фаза продолжалась до начала следующих суток. Фаза восстановления заняла еще около двух суток. Главной фазе сопутствовало изменение знака компоненты B_z межпланетного магнитного поля, которое также продолжалось около суток.

Внезапное начало бури сопровождалось всплеском плотности протонов (примерно в 10 раз), которое продолжалось в течение 15÷20 ч. Плотность потока электронов, напротив, уменьшилась в несколько раз.

Индекс авроральной активности в ходе магнитной бури увеличивался в 5÷10 раз.

Сильное увеличение индекса K_p без видимых причин наступило 1 мая 2001 г. и продолжалось более суток.

Опишем состояние космической погоды в период с 22 по 28 мая 2004 г. (рис. 2). СР предшествовало малосущественное магнитное возмущение (индекс K_p изменялся от 1 до 3). Незначительными были вариации концентрации (от $2 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6$ м⁻³), температуры (от 10^5 до $2.4 \cdot 10^5$ К), скорости (от 350 до 550 км/с), давления (от 1 до 2.5 нПа) солнечного ветра. Значения функции Акасофу изменялись от 1 до 14 ГДж/с.

Несущественными были вариации плотности потока протонов. Плотность потока электронов, напротив, постепенно нарастала по квазипериодическому закону с периодом ~1 суток.

Компонента B_z хаотически изменялась в пределах ± 5 нТл. Достаточно упорядоченными с периодом 1 сутки были вариации H_p -компоненты геомагнитного поля. Значения индекса D_{st} также хаотически флуктуировали в пределах ± 10 нТл. Вариации индекса AE были незначительными.

День СР, 25 мая 2004 г., был спокойным. Это обстоятельство существенно облегчало выделение возмущений, связанных со СР.

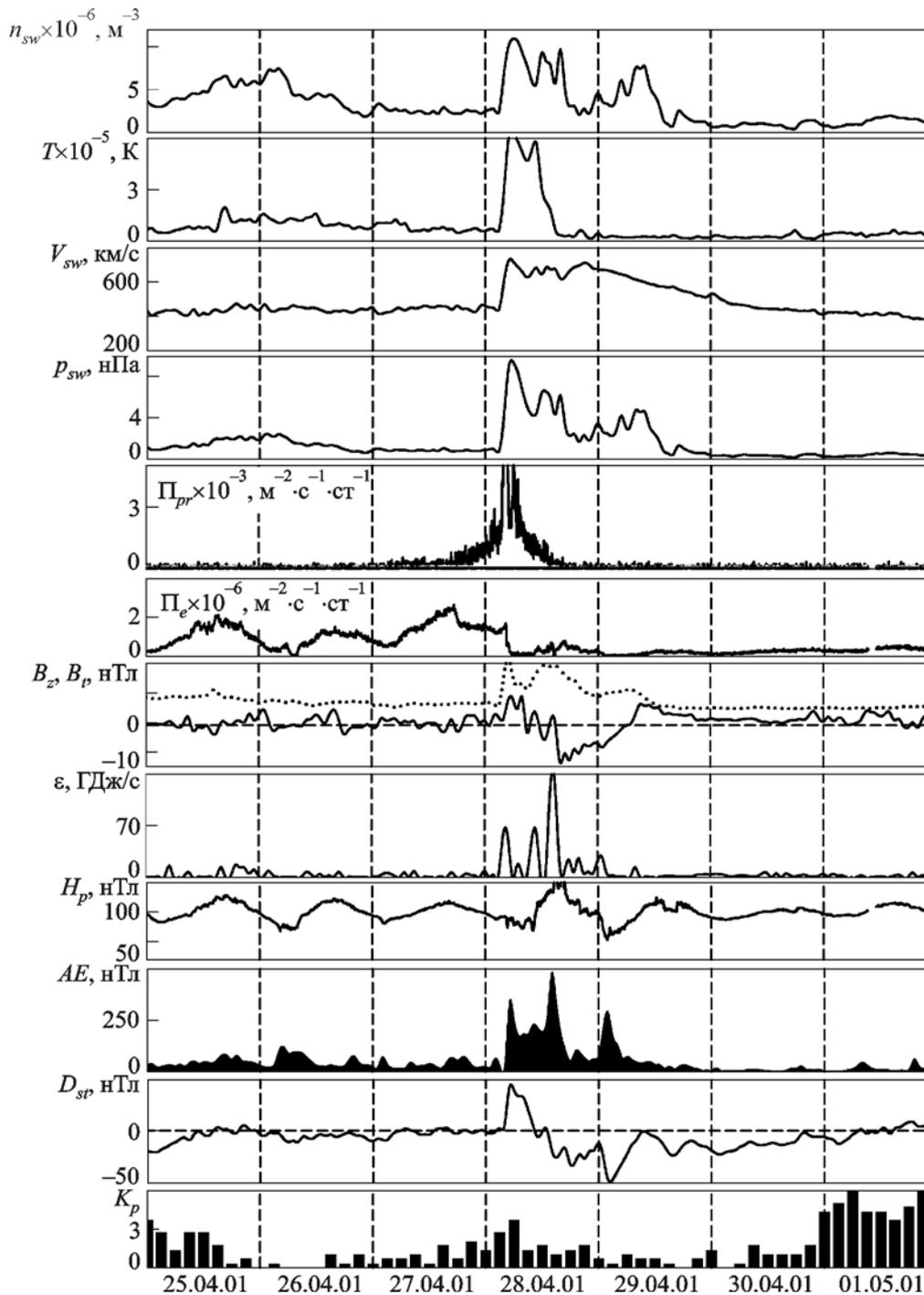


Рис. 1. Временные вариации параметров солнечного ветра в период с 25 апреля по 1 мая 2001 г.: концентрации частиц n_{sw} , температуры T , радиальной скорости V_{st} (ACE Satellite – Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) и динамического давления p_{sw} (расчет); потоков протонов Π_{pr} (GOES-8(W75)) и электронов Π_e (GOES-12), компонент B_z , B_r межпланетного магнитного поля (ACE Satellite – Magnetometer); функции Акасофу ϵ (расчет); H_p -компоненты 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)

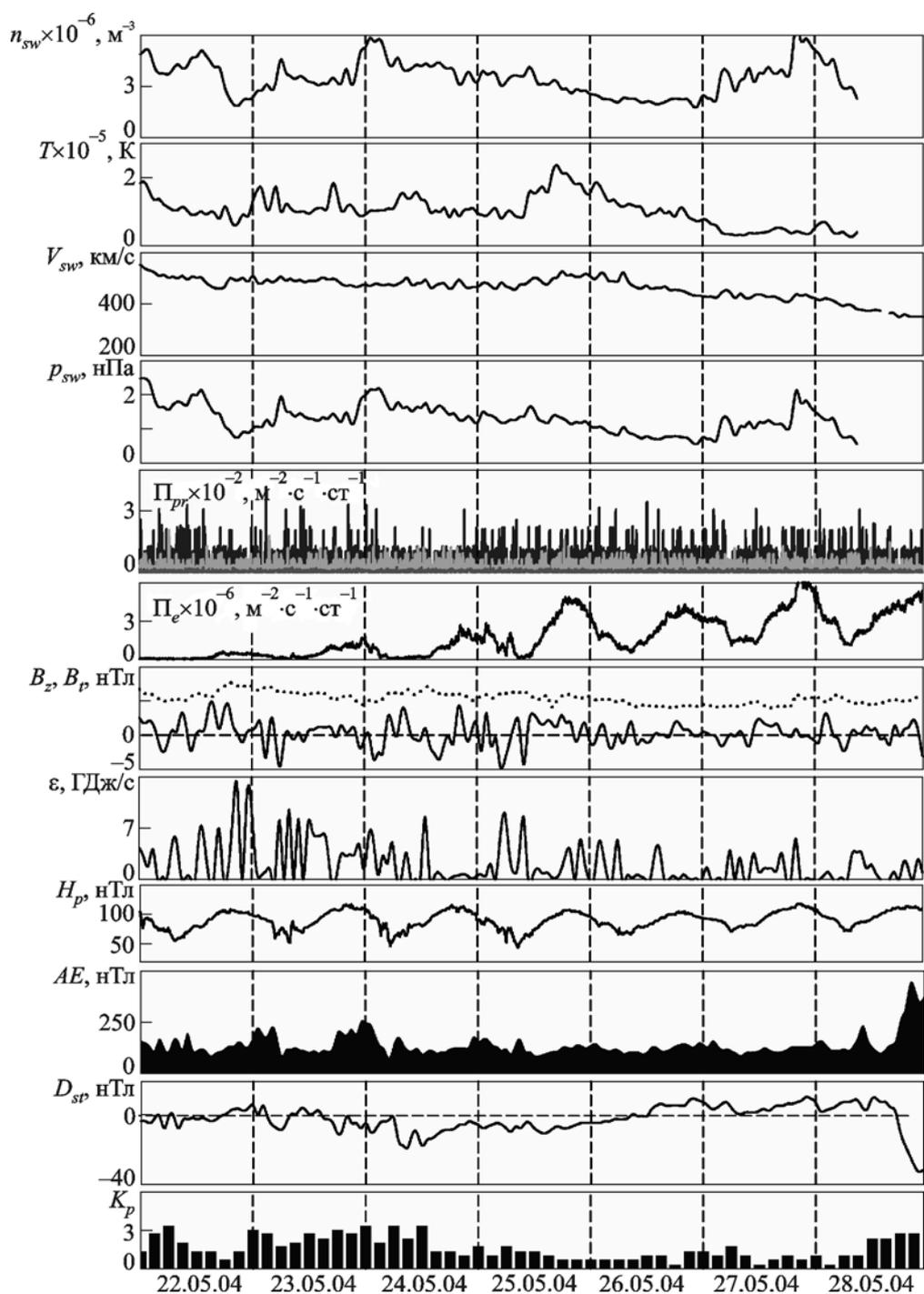


Рис. 2. Временные вариации параметров солнечного ветра в период с 22 по 28 мая 2004 г. Обозначения те же, что на рис. 1

4. Результаты измерений и обработки

Пространственно-временные характеристики. Приведем пример пространственно-временных вариаций параметров НР сигнала (рис. 3) и концентрации электронов (рис. 4), сопутствовавших старту ракеты “Союз” в 07:37 (здесь и далее UT) 28 апреля 2001 г. с космодрома Байконур. СР предшествовали ВВ с периодом $40 \div 60$ мин. После СР в ВВ стал преобладать период около 150 мин. Это было заметно в диапазоне высот $230 \div 460$ км, но особенно хорошо видно в диапазоне высот $270 \div 470$ км. Всего наблюдалось три колебания. Их относительная амплитуда достигала 0.25. Интересно, что передний фронт в колебаниях δq и δN был существенно круче, чем задний. Скорее всего, наблюдался нелинейный волновой процесс, у которого хорошо выражен эффект укручения фронта волны.

Пространственно-временные вариации $\delta T_e(t)$, а также их относительных величин приведены на рис. 5. Волновые процессы в δT_e были хорошо выражены до СР. По-видимому, они были вызваны естественным возмущением в геокосмосе, которое началось примерно в 3:00. После СР изменился период колебаний. Четко это видно в диапазоне высот $200 \div 600$ км. Амплитуда колебаний δT_e после СР достигала 130 К, $\delta T_e \approx 0.08$.

Эффекты СР в вариациях $\delta T_i(t)$ выражены несколько слабее – амплитуда колебаний не превышала 80 К (рис. 6). При этом $\delta T_i \approx 0.05 \div 0.08$. Интересно, что после СР колебания T_e и T_i были практически синфазными, а колебание N опережало колебания T_e и T_i по фазе примерно на 180° .

Следующий пример пространственно-временных вариаций параметров НР сигнала и концентрации электронов, сопровождавших СР “Союз” в 12:24 25 мая 2004 г. с космодрома Байконур, приведен на рис. 7 и рис. 8. Эффект СР хорошо выражен в диапазоне высот $z = 160 \div 510$ км, но лучше всего он наблюдался при $z = 160 \div 400$ км. Из рис. 7 видно, что первое изменение характера сигнала δq или δ_s наступило через время $t_1 \approx 26$ мин, второе – через $\Delta t_2 \approx 67$ мин. Первое изменение заключалось в подавлении

существовавшего в ионосфере ВВ с периодом $T_1 \approx 27$ мин, второе – в генерации нового ВВ с постепенно уменьшающимся периодом от 45 до 35 мин. Эти же изменения наблюдались и в зависимостях $\delta N(t)$ и $\delta_N(t)$ (рис. 8). Амплитуда ВВ не превышала $\delta N \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$, амплитуда относительных возмущений $\delta_N \approx 0.04 \div 0.1$. Интересно, что значения δ_N были минимальными в окрестности максимума ионизации области F. В то же время на высотах ~ 150 и 560 км значения δ_N составляли около 0.05 и 0.15.

Зависимости $\delta T_e(t)$ и $\delta T_i(t)$ также носили колебательный характер (рис. 9). Колебания были выражены слабо в окрестности максимума ионизации, но на высотах ~ 150 и 560 км значения абсолютной и относительной амплитуд достигали примерно 50 и 300 К и 0.06 и 0.10 соответственно.

Опишем временные вариации $\delta T_i(t)$ и $\delta T_i(t)$. И абсолютная, и относительная амплитуды возмущений T_i имели тенденцию к увеличению при увеличении высоты (рис. 10). Так, на высотах ~ 150 и 560 км δT_i составляла 100 и 300 К, а δT_i – $0.02 \div 0.03$ и 0.10 соответственно.

Между колебаниями N , T_e и T_i , вообще говоря, существовал сдвиг по фазе. Например, на высоте 560 км в интервале времени 13:00 – 15:30 колебания $N(t)$ и $T_e(t)$ были практически синфазными, а колебание $T_i(t)$ запаздывало по фазе на $15 \div 20$ мин или примерно на 180° .

Добавим, что в дневное время 28 апреля 2001 г. отношение сигнал/шум q было не меньше $10 \div 40$. Это позволило получить N , T_e и T_i с абсолютными погрешностями около 10^{10} м^{-3} , $\pm(10 \div 20)$ К и $\pm(10 \div 20)$ К соответственно в диапазоне высот $180 \div 600$ км.

Днем 25 мая 2004 г. с ростом высоты от 125 до 500 км значение q уменьшалось примерно от 5 до 0.5. При этом погрешности получения N , T_e и T_i увеличились по сравнению с погрешностями для 28 апреля 2001 г. в $3 \div 6$ раз для высот $125 \div 500$ км.

Результаты спектрального анализа. Спектрограммы и энергограммы временных зависимостей $\delta_s(t)$ для 28 апреля 2001 г. приведены на рис. 11. Из рисунка видно, что

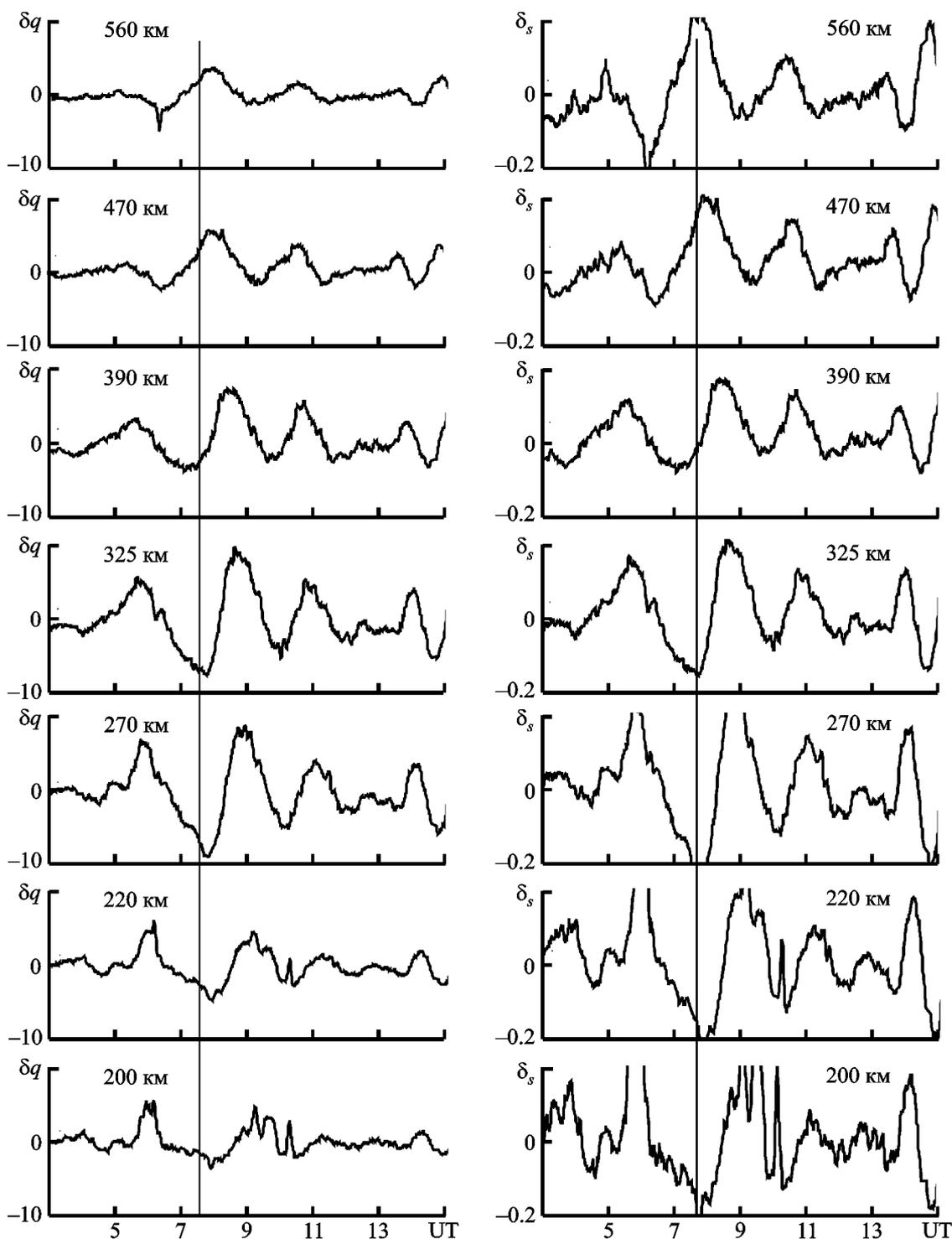


Рис. 3. Временные вариации параметров сигнала δq и δ_s в период старта ракеты “Союз” 28 апреля 2001 г. Вертикальной линией здесь и далее отмечен момент CP

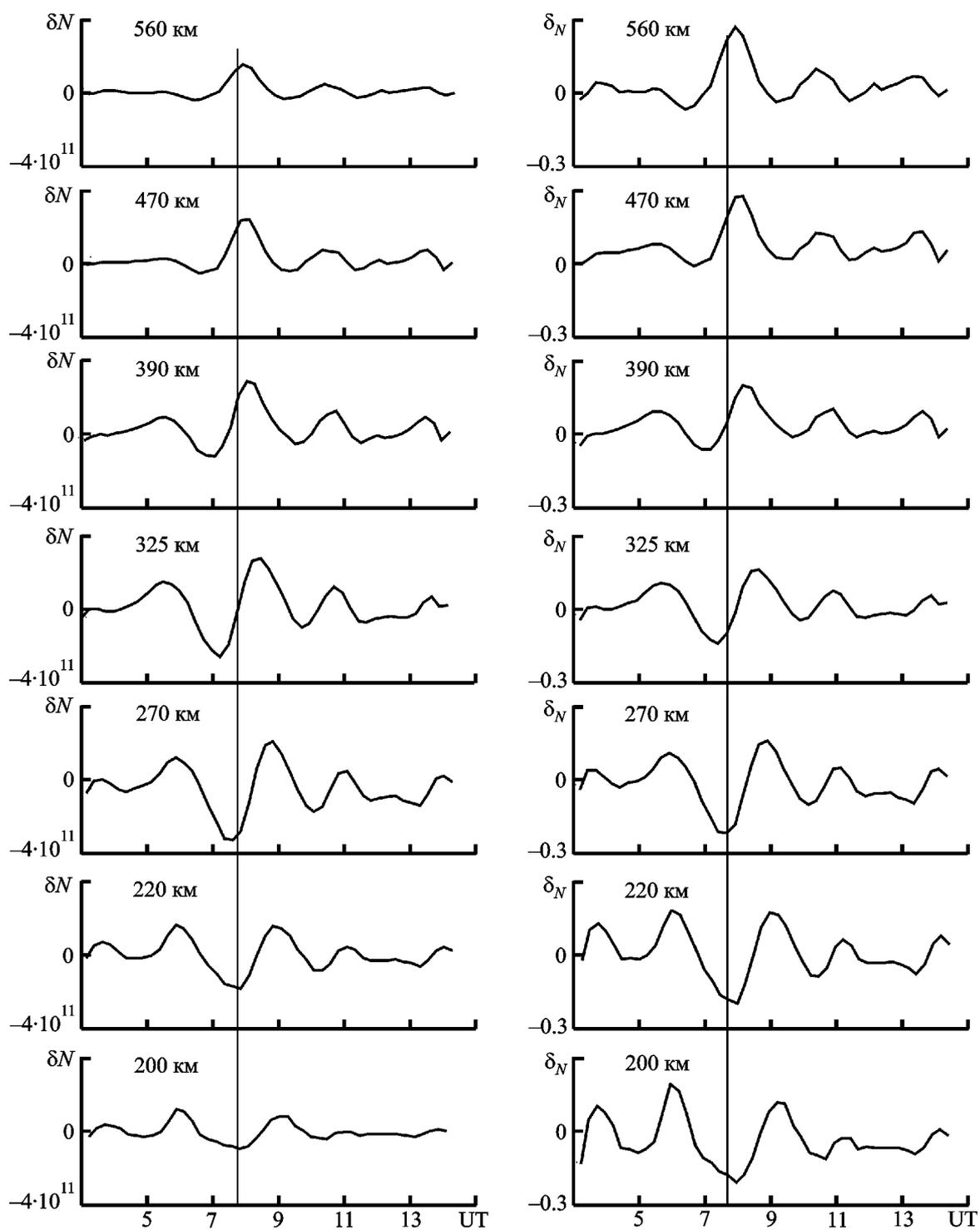


Рис. 4. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ электронной концентрации δN и δ_N в период старта ракеты “Союз” 28 апреля 2001 г.

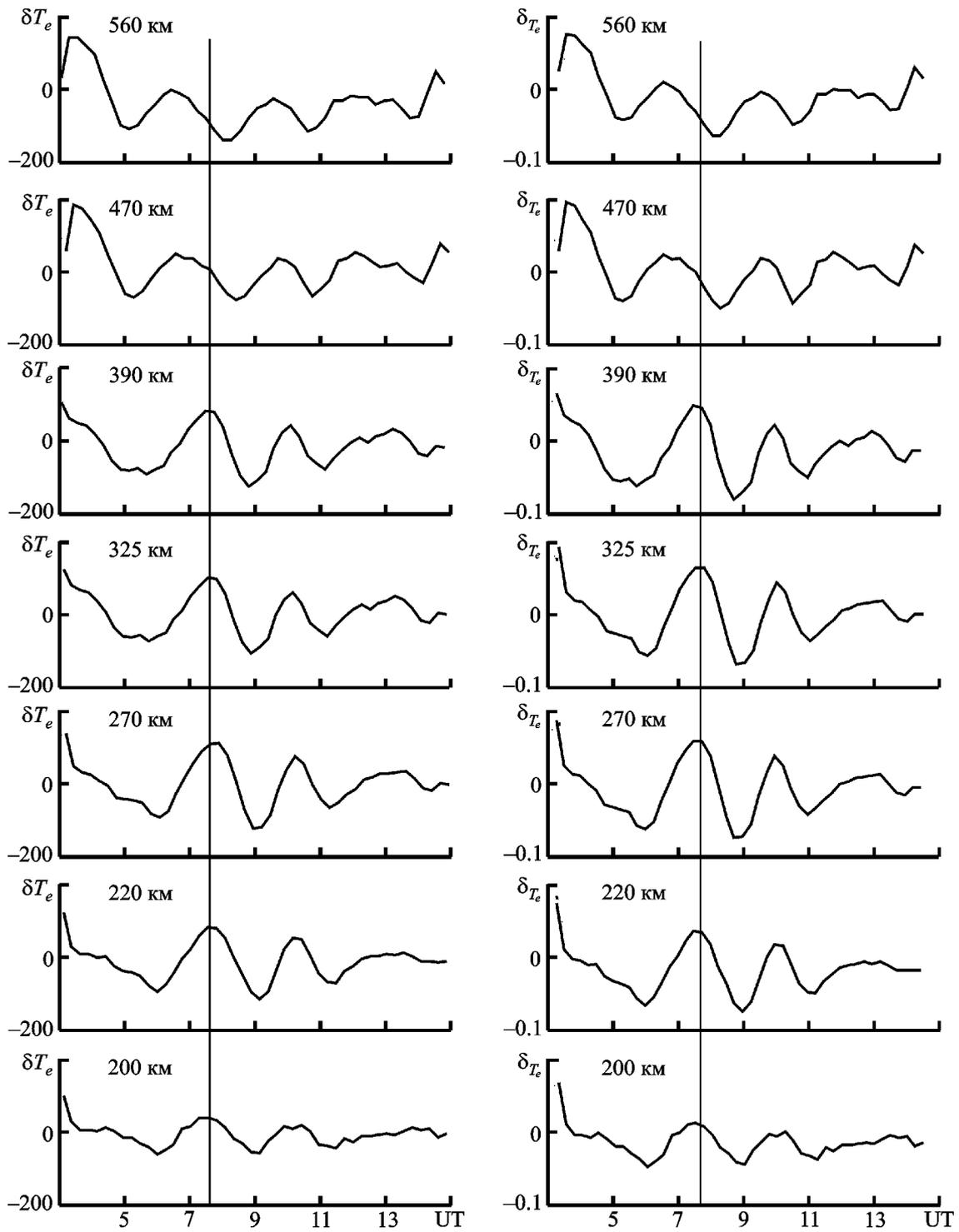


Рис. 5. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ температур электронов δT_e и δT_e в период старта ракеты “Союз” 28 апреля 2001 г.

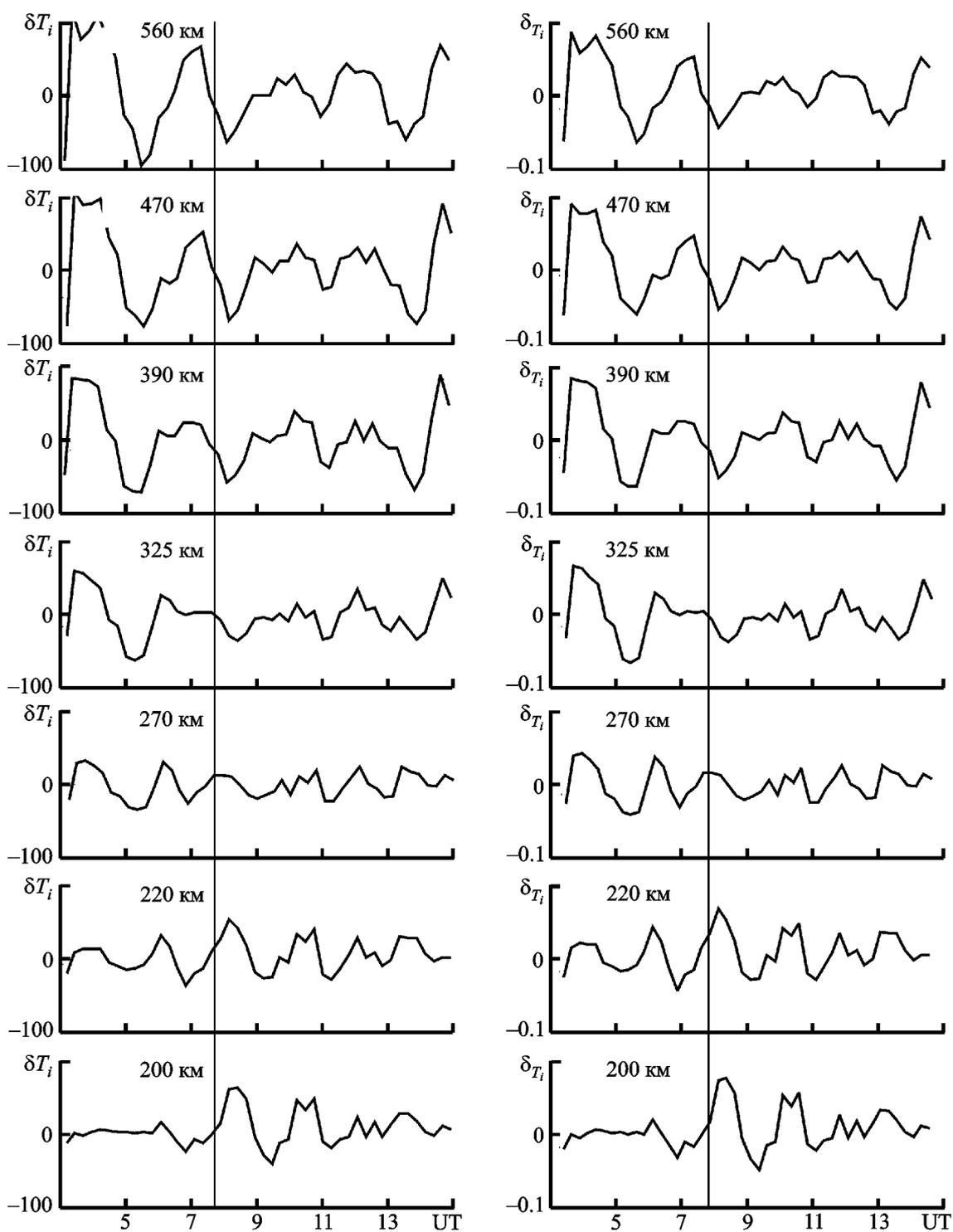


Рис. 6. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ температур ионов δT_i и δT_i в период старта ракеты "Союз" 28 апреля 2001 г.

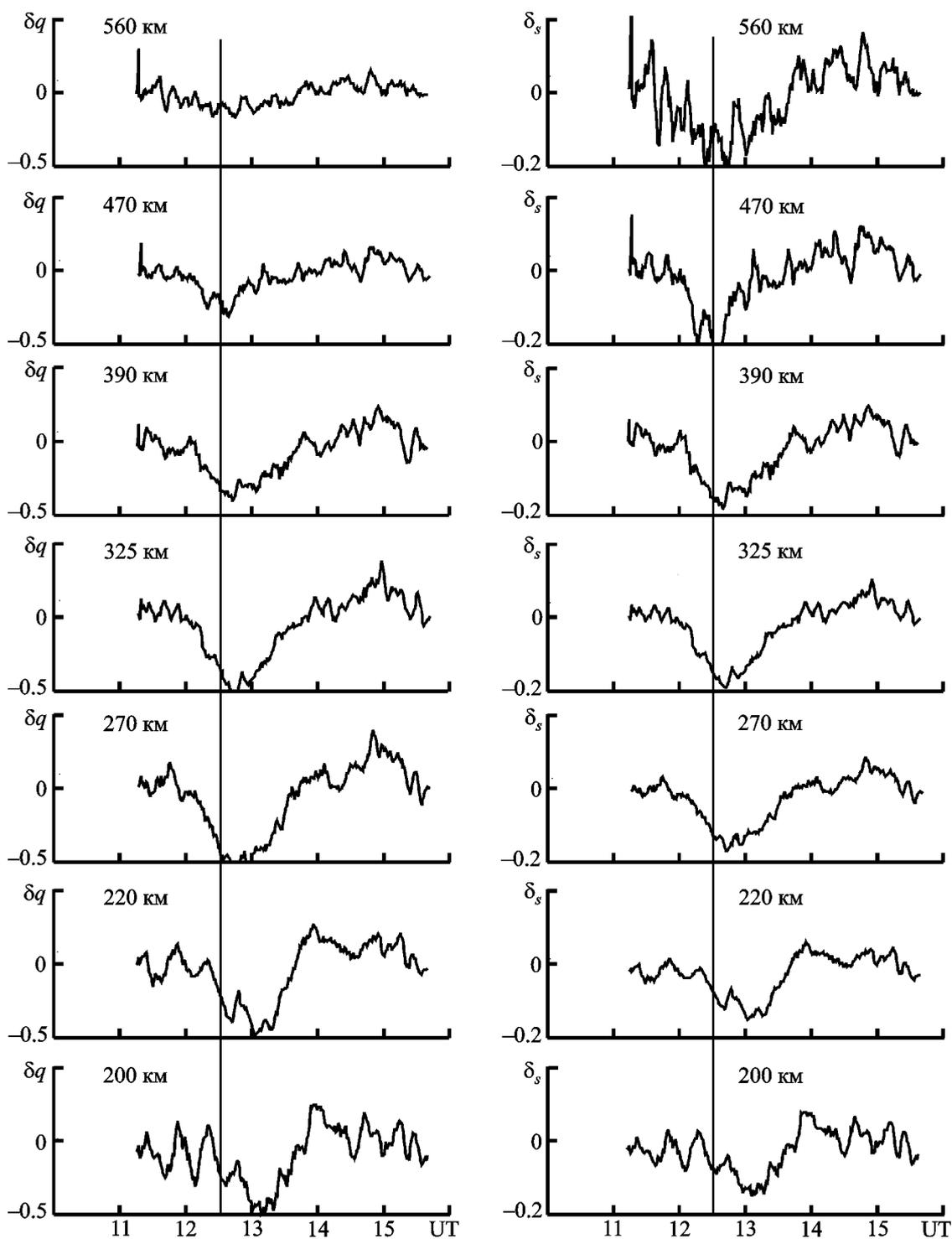


Рис. 7. Временные вариации параметров сигнала в период старта ракеты "Союз" 25 мая 2004 г.

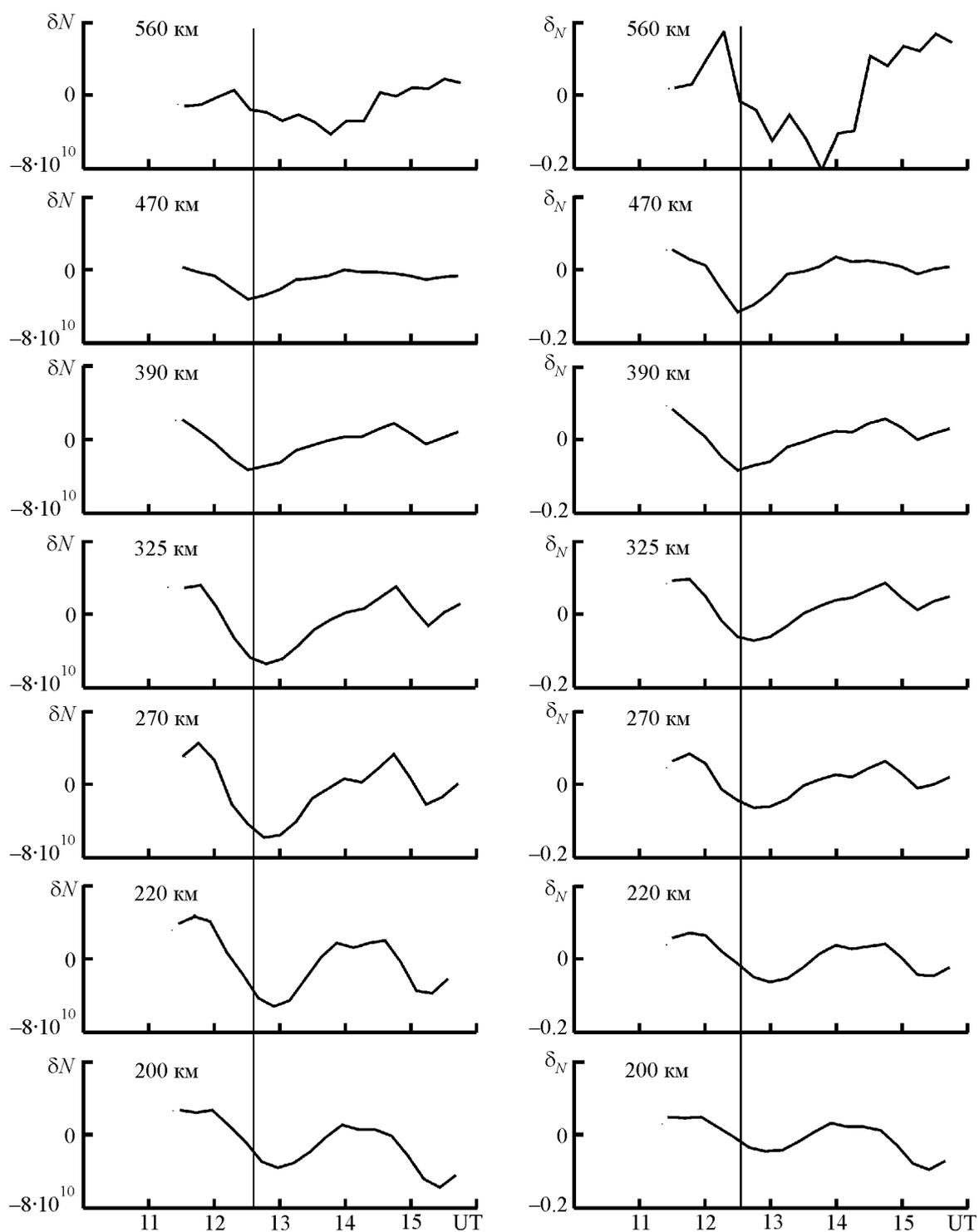


Рис. 8. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ концентрации электронов в период старта ракеты “Союз” 25 мая 2004 г.

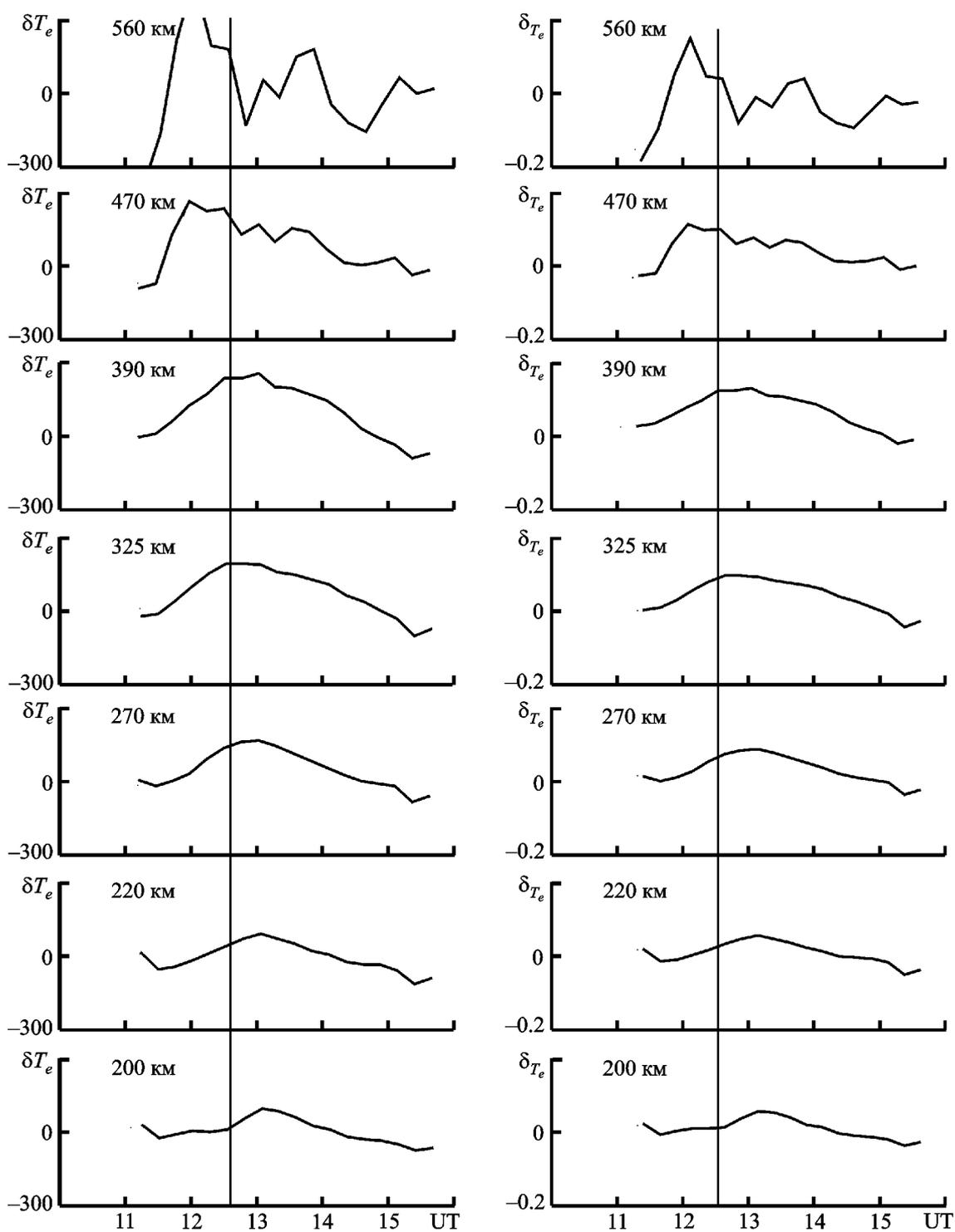


Рис. 9. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ температур электронов в период старта ракеты “Союз” 25 мая 2004 г.

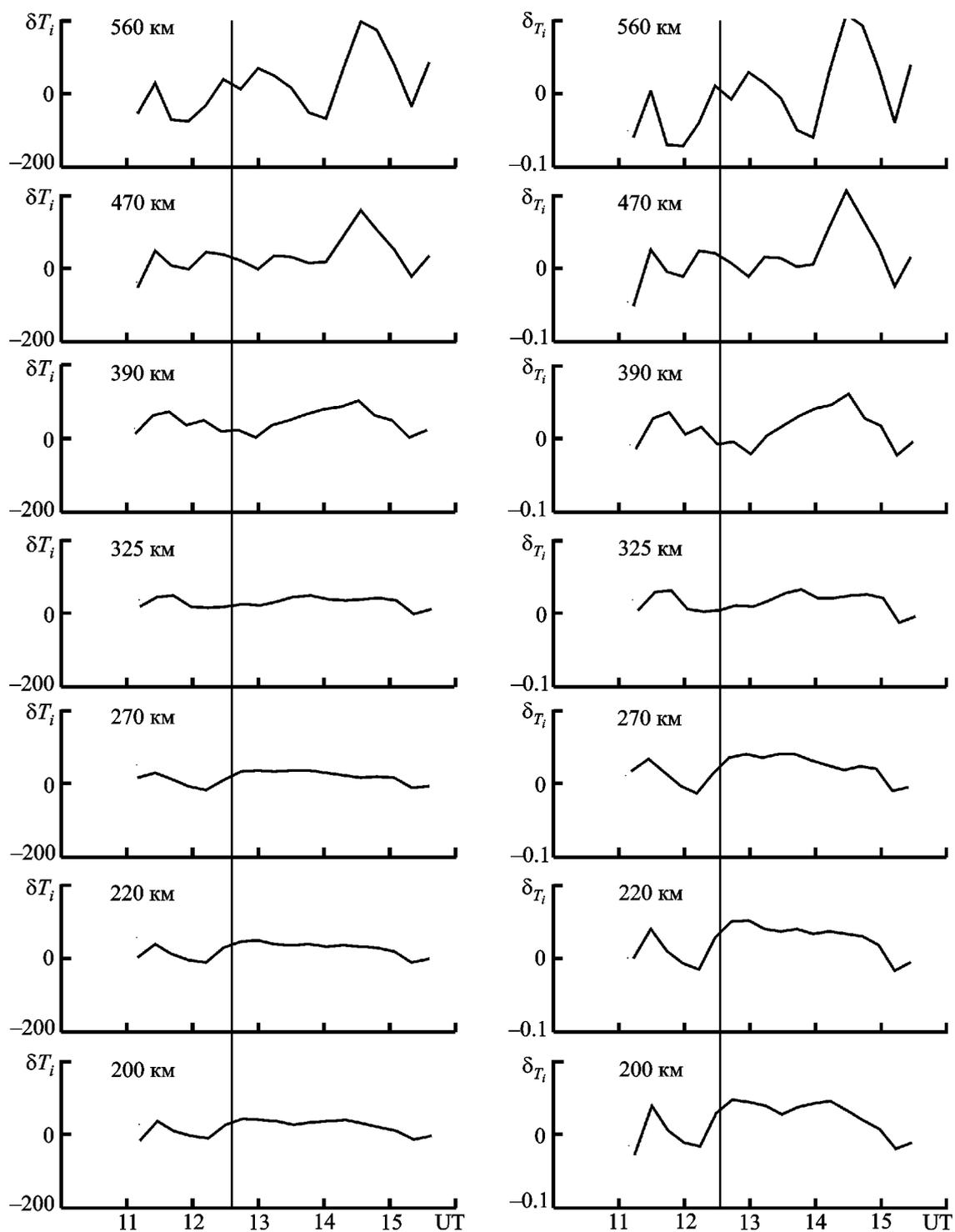


Рис. 10. Временные вариации амплитуд и относительных амплитуд ВВ температур ионов в период старта ракеты “Союз” 25 мая 2004 г.

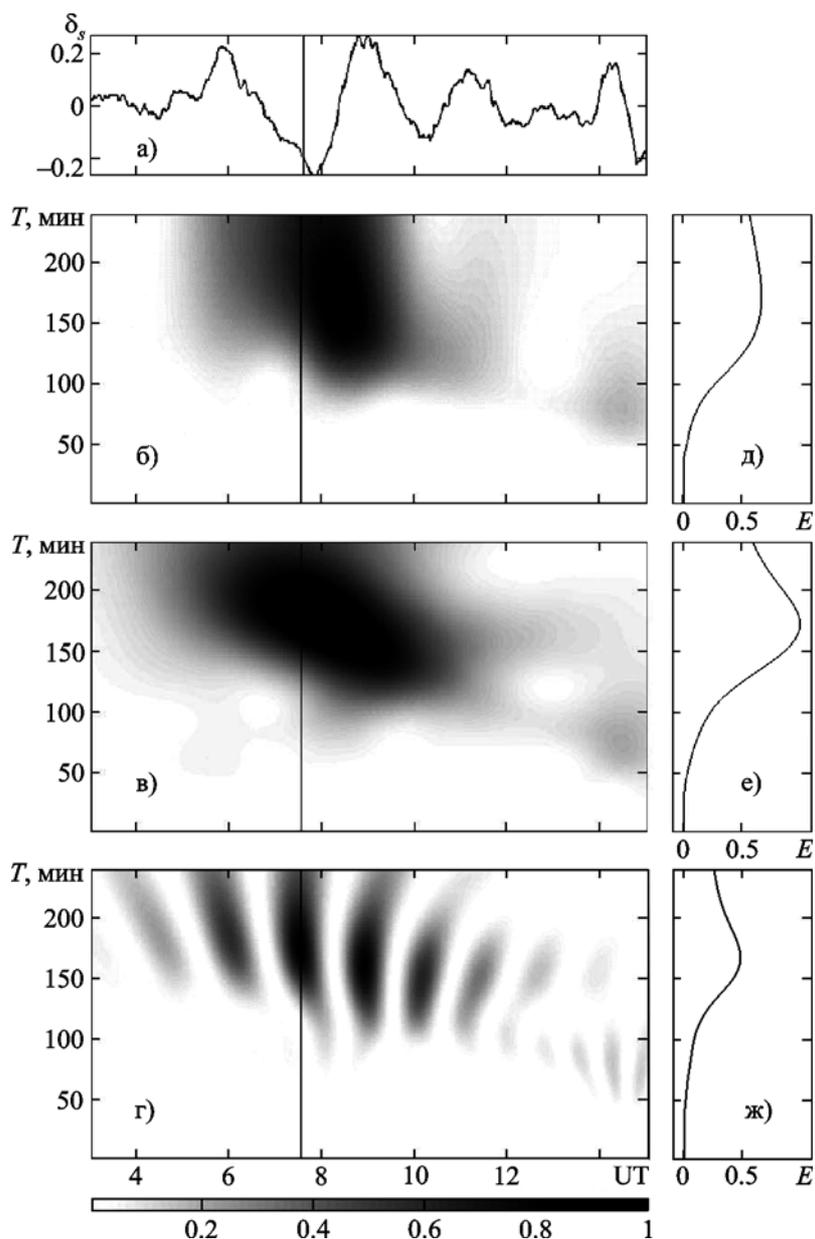


Рис. 11. Результаты спектрального анализа временных вариаций δ_s 28 апреля 2001 г. для высоты 270 км: а) – сигнал; б), в), г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле сигнала; д), е), ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования на основе вейвлета Морле сигнала.

спектрограммы до СР и после него существенно различаются. После СР появились колебания с периодами $T \approx 150 \div 190$ мин. Результаты спектральной обработки $\delta_s(t)$ для наблюдений, выполненных 25 мая 2004 г.,

приведены на рис. 12. Видно, что примерно через 45 мин после СР значительно выросла амплитуда колебания с периодом около $80 \div 90$ мин. До СР преобладало колебание с $T \approx 25 \div 35$ мин.

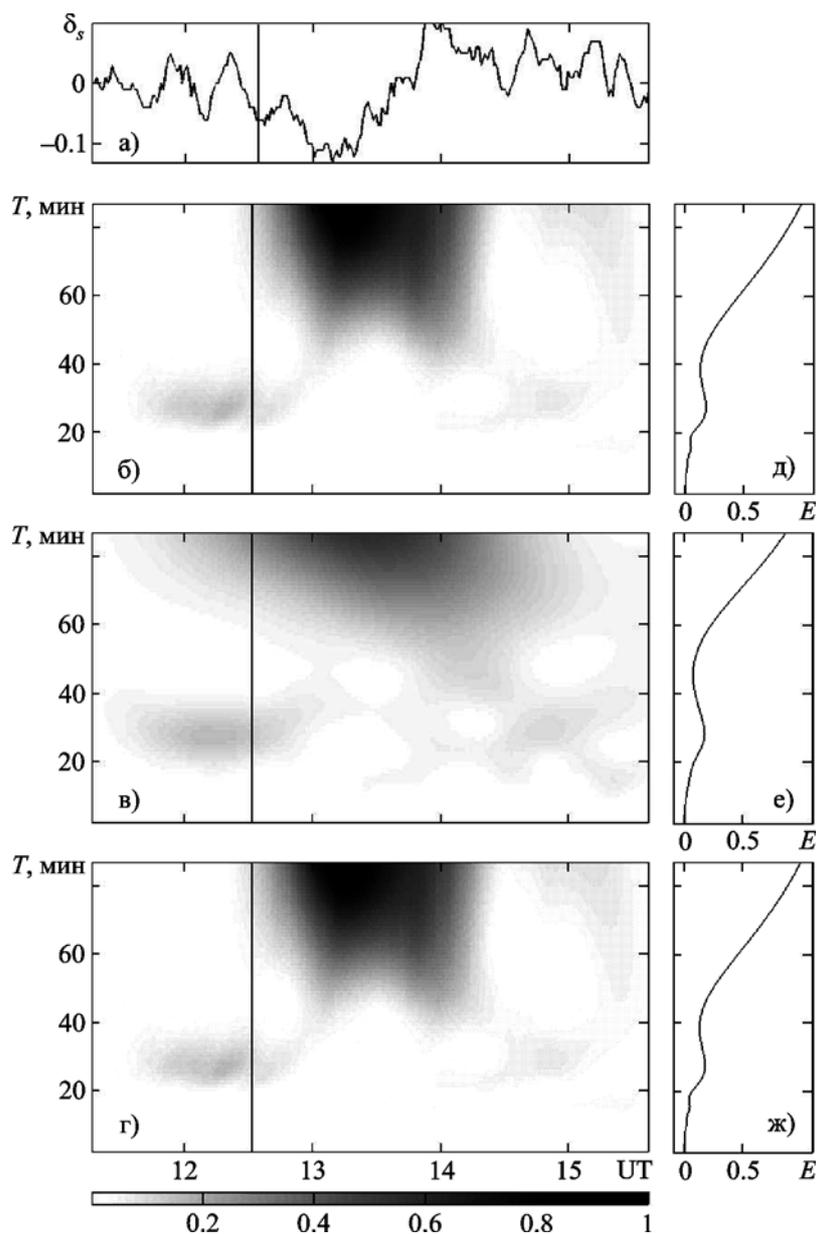


Рис. 12. Результаты спектрального анализа временных вариаций δ_s 25 мая 2004 г. для высоты 200 км. Зависимости те же, что на рис. 11

6. Обсуждение

Обратимся вновь к рис. 3. Из него видно, что сразу же после СР имело место резкое и значительное уменьшение параметра сигнала δq . Этот эффект хорошо выражен в диапазоне высот 200 ÷ 400 км. Ему соответствует время запаздывания $\Delta t_1 \approx 20$ мин (определено по

минимуму δq). Продолжительность этого процесса, по-видимому, не превышала 1 ч.

Следующее изменение характера сигнала, заключающееся в появлении сильного колебания с периодом 150 мин и общей продолжительностью около 5 ÷ 6 ч, произошло с запаздыванием около 60 мин (определено по максимуму сигнала δq). При времени движения

ракеты до E-области ионосферы $\Delta t_0 \approx 3$ мин скорректированные (с вычетом времени Δt_0) значения задержки составляют $\Delta t'_1 \approx 17$ мин и $\Delta t'_2 \approx 57$ мин. При расстоянии от места генерации возмущений в ионосфере до места расположения обсерватории $R \approx 2100$ км им соответствуют скорости $v'_1 \approx 2$ км/с и $v'_2 \approx 610$ м/с.

Добавим, что возмущения от СР наложились на естественные возмущения. Это привело к заметному усилению эффекта СР.

Теперь обратимся к СР 25 мая 2004 г. Для этого СР $\Delta t'_1 \approx 23$ мин и $\Delta t'_2 \approx 64$ мин. Тогда $v'_1 \approx 1.5$ км/с и $v'_2 \approx 550$ м/с.

Видно, что существует две группы скоростей распространения ВВ, причем их значения зависят от высоты, времени суток, условий в атмосфере и ионосфере. Как показано нами в предыдущих работах [3-11], скорость $v'_1 \approx 1.5 \div 2$ км/с имеют медленные МГД (ММГД) волны [18], а скорость $v'_2 \approx 550 \div 610$ м/с – внутренние гравитационные волны (ВГВ) [19]. Распространению ММГД волн и ВГВ сопутствуют квазипериодические изменения не только N , но и T_e , T_i (см. рис. 4 – 6, рис. 7 – 9).

Выше указаны средние времена запаздывания возмущений, соответствующие высотам $200 \div 300$ км. Эти времена запаздывания существенно зависели от высоты (см., например, рис. 3). На больших высотах скорость распространения была больше, чем на меньших. Так, для более медленного возмущения, переносимого при помощи ВГВ, 28 апреля 2001 г. разность времен прихода возмущений N , T_e и T_i на высотах 190 и 660 км достигала $60 \div 150$ мин. Это позволило оценить вертикальную составляющую скорости ВГВ. Она оказалась близкой для возмущений всех параметров плазмы (N , T_e и T_i) и составляла $105 \div 130$ м/с. Эти значения вертикальной составляющей соответствуют вертикальным составляющим скорости ВГВ [20].

Примененные одновременно дополняющие друг друга оконные и адаптивное преобразования Фурье, а также вейвлет-преобразование позволили проследить за динамикой ВВ (квазипериодических процессов) в ионосфере, уточнить их периоды, амплитуды и продолжительности, а также распределение энергии колебаний по периодам (см. рис. 11, рис. 12).

Выводы

1. При помощи метода НР впервые проанализированы крупномасштабные квазипериодические вариации основных параметров плазмы, вызванные удаленными на расстояние более 2000 км СР. Интересно, что эффекты СР, протекающие на фоне естественного магнитного возмущения, были выражены сильнее, чем в невозмущенных условиях.

2. Подтверждено, что имеют место две группы зависящих от состояния среды скоростей распространения возмущений – около $1.5 \div 2$ км/с и $550 \div 610$ м/с. Такие скорости имеют соответственно ММГД волны и ВГВ.

3. Показано, что СР с космодрома Байконур вызывали над Харьковом квазипериодические возмущения N , а также T_e и T_i с абсолютными амплитудами $(0.8 \div 4) \cdot 10^{11}$ м⁻³ и $50 \div 100$ К. Относительные амплитуды этих возмущений достигали $0.1 \div 0.25$ и $0.05 \div 0.08$ соответственно.

4. Колебания N , T_e и T_i в общем случае были сдвинуты по фазе друг по отношению к другу. По-видимому, сдвиг по фазе в различных наблюдениях был различным.

5. Подтверждено, что одновременное использование оконного преобразования Фурье, вейвлет-преобразования и адаптивного преобразования Фурье позволяет эффективно оценить периоды, амплитуды и продолжительности волновых пакетов (колебательных процессов) в ионосферной плазме, а также распределение энергии колебаний по периодам.

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, В. Н. Лысенко и Ю. В. Черняку за организацию и проведение измерений на радаре НР.

Литература

1. K. P. Garmash, A. M. Gokov, L. S. Kostrov, V. T. Rozumenko, O. F. Tyrnov, Y. P. Fedorenko, A. M. Tsybal, L. F. Chernogor. Radiophysical Investigations and Modeling of Ionospheric Processes Generated by Sources of Various Nature. 2. Processes in a Modified Ionosphere Signal Parameters Variations. Disturbance Simulation // Telecommunications and Radio Engineering. – 1999. – Vol. 53, No. 6. – P. 1-22.
2. К. П. Гармаш, В. Т. Розуменко, О. Ф. Тырнов, А. М. Цымбал, Л. Ф. Черногор. Радиофизические

- исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергетичными источниками // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – №8. – С. 3-19.
3. Л. С. Костров, В. Т. Розуменко, Л. Ф. Черногор. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, №3. – С. 227-246.
 4. В. П. Бурмака, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор. 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.
 5. В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор. Результаты комплексных радиофизических наблюдений волновых возмущений в геокосмосе, сопровождавших старты и полеты ракет // Космічна наука і технологія. ДОДАТОК. – 2003. – Т. 9, №2. – С. 57-61.
 6. В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2004. – Т. 44, №4. – С. 518-534.
 7. В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор. Комплексные радиофизические исследования волновых возмущений в ионосфере, сопровождавших старты ракет на фоне естественных нестационарных процессов // Радиофизика и радиоастрономия. – 2004. – Т. 9, №1. – С. 5-28.
 8. В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – №3. – С. 4-35.
 9. В. П. Бурмака, В. Н. Лысенко, Л. Ф. Черногор. Результаты исследования волновых процессов в ионосфере при различных состояниях космической погоды // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, №1/2. – С. 37-57.
 10. В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор, Ю. В. Черняк. Волновые возмущения в геокосмосе, сопровождавшие старты и полеты ракет “Союз” и “Протон” // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, №3. – С. 254-272.
 11. В. П. Бурмака, В. Н. Лысенко, Л. Ф. Черногор, Ю. В. Черняк. Волновые процессы в F-области ионосферы, сопутствовавшие стартам ракет с космодрома Байконур // Геомагнетизм и аэрономия. – 2006. – Т. 46, №5. – С. 1-18.
 12. Л. Ф. Черногор. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, №1. – С. 59-106.
 13. Л. Ф. Черногор. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, №5/6. – С. 96-105.
 14. Л. Ф. Черногор. “Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, №12. – С. 655-697.
 15. Л. Ф. Черногор. “Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера” как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, №4. – С. 198-231.
 16. О. В. Лазоренко, С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 10, №10. – С. 39-49.
 17. В. П. Бурмака, С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – №11. – С. 3-24.
 18. В. М. Сорокин, Г. В. Федорович. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. – М.: Энергоиздат, 1982. – 136 с.
 19. Г. И. Григорьев. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, №1. – С. 3-25.
 20. Б. Н. Гершман. Динамика ионосферной плазмы. – М.: Наука, 1974. – 256 с.

Комплексна діагностика іоносферної плазми, збуреної віддаленими стартами ракет

В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор

Використовуючи експериментальні дані, отримані методом некогерентного розсіяння, проаналізовано великомасштабні збурення в іоносферній плазмі, спричинені стартами космічних апаратів з космодрому Байконур. Проаналізовано висотно-часові залежності основних параметрів плазми (концентрації електронів N , температур електронів та іонів T_e і T_i) в діапазоні висот $\sim 100 \div 600$ км. Показано, що старти та польоти космічних апаратів супроводжуються генерацією хвилевих збурень (ХЗ) не лише N , але й T_e , а також T_i . Знайдено, що відносні амплітуди цих ХЗ як правило склали $0.03 \div 0.10$, період коливань – від 20 до 60 хв. Коливання N , T_e і T_i були зсунуті за фазою одне відносно іншого. Швидкості поширення ХЗ склали $\sim 0.5 \div 0.6$ і $1.5 \div 2$ км/с. Для оцінки параметрів ХЗ застосовувались сучасні методи спектрального аналізу, включаючи вейвлет-аналіз.

**Complex Diagnostics
of Ionospheric Plasma Disturbed
by Far Rocket Launches**

V. P. Burmaka and L. F. Chernogor

The large-scale disturbances in ionospheric plasma produced by space vehicle launches from Baikonur cosmodrome are analyzed with the incoherent scatter technique experimental data given. Also, within the heights of $\sim 100 \div 600$ km, are analyzed the height-time dependencies of such major plasma parameters as electron density N , and electron and ion temperatures T_e and T_i . The space vehicle launches and flights are shown to be accompanied by the generated wave-like disturbances (WLD) not only of N but of T_e and T_i as well. The WLD relative amplitudes are found to be usually within $0.03 \div 0.10$, the oscillation period being 20 to 60 min. The N , T_e and T_i oscillations are shown to be lagged. The WLD propagation velocities equal $\sim 0.5 \div 0.6$ and $1.5 \div 2$ km/s. Modern spectral analysis techniques, the wave-let analysis including, were used to estimate WLD parameters.