

ДОПЛЕРОВСКОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В Е-И F-ОБЛАСТЯХ ИОНОСФЕРЫ ПРИ СТАРТАХ И ПОЛЕТАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф.

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков

В результате статистического анализа вариаций доплеровских спектров, сопровождавших 126 стартов ракет, выявлены четыре группы кажущихся скоростей распространения возмущений: 0.5 – 0.8, 1 – 6, 7 – 9 и 15 – 20 км/с. С ними связаны акустико-гравитационные (первая группа), медленные магнитогидродинамические и магнитоградиентные (вторая группа), а также гиротропные волны (третья и четвертая группы).

1. Введение

На рубеже XX и XXI веков мощность ракет и частота их запусков достигла таких значений, что приходится считаться с возмущениями в околоземной среде, производимыми космическими аппаратами. Исследование этих возмущений представляет интерес для специалистов в области ракетно-космической техники, геофизики, радиофизики, телекоммуникаций, экологии и космической погоды.

Поиску эффектов в ионосфере, вызванных стартами ракет, посвящено большое количество работ [1 – 10]. Как правило, в них описаны эффекты, наблюдаемые на активном участке траектории. Мы рассмотрим процессы на удалениях $R = 1000 – 10000$ км от места старта ракеты (СР) и ее траектории. Соответствующие возмущения нами названы крупномасштабными и глобальными [11 – 15]. При этом понимается, что возмущения распространяются вплоть до глобальных расстояний. Кроме того, как будет показано ниже, длительность этих возмущений достигает 80 мин, что при их скорости порядка 2 – 3 км/с соответствует протяженности 10 – 15 тыс. км. Так что и по протяженности эти возмущения являются глобальными.

До настоящего времени отсутствуют детальные физико-математические модели сопутствующих процессов. Более того, часто вообще нельзя достоверно утверждать, что данное возмущение вызвано стартом ракеты, не понятны до конца механизмы генерации и переноса возмущений на значительные, и тем более глобальные расстояния. Дело в том, что возникающие антропогенные возмущения принципиально ничем не отличаются от естественных. Поэтому исследователям не остается ничего иного, как увеличивать объем наблюдений и вести поиск повторяющихся закономерностей.

Особенностью данной работы является то, что в ней с использованием единого метода и единой методики предпринята попытка поиска эффектов, возникающих в средней ионосфере (высоты 100 – 300 км) при старте и полете космических аппаратов (КА). Важно, что наблюдения выполнены на различных удалениях от места старта ракеты и для различных типов ракет, в различное время суток и в различных геофизических условиях.

Измерения осуществлены в 1980 – 2000 гг. для 205 стартов 16 типов ракет с космодромов России, США, Франции, Индии, Японии и других стран.

Для исследования нестационарных процессов в средней ионосфере использовался доплеровский радар вертикального зондирования. Его основные параметры приведены в работах [11, 12, 14, 15]. Измерения обычно проводились на частотах 2.8 – 3.5 МГц.

2. Результаты наблюдений

Примеры результатов

Вариации доплеровских спектров (ДС) в дневное время, наблюдавшиеся при запуске российской ракеты “Союз-У” с космодрома Плесецк, показаны на рис. 1. Это событие произошло в 18:00 9 сентября 1999 г. (здесь и далее время GMT).

Из рис. 1 видно, что до СР имели место сравнительно слабые вариации ДС, по-видимому, связанные с прохождением вечернего терминатора. Спектр был практически одномодовым. В интервале времени 18:10 – 19:00 спектр заметно уширился, а амплитуда сигнала оставалась практически постоянной. Следующее изменение характера вариаций ДС наблюдалось с 19:00 до 19:35 (возникли или усилились колебания доплеровского смещения частоты f_d , а спектр был практически одномодовым).

Старт ракеты "Союз" состоялся в 13:22 18 октября 1999 г. (рис. 2). До старта ракеты ионосфера оставалась спокойной. Доплеровские спектры были одномодовыми с четко выраженным максимумом. Примерно с 12:55 до 13:03 наблюдались основная и дополнительная моды отраженного сигнала, возник квазипериодический процесс с периодом $T \approx 10$ мин. После 13:36 амплитуда колебаний f_{da} значительно увеличилась и достигла 0.5 Гц, стало преобладать колебание с $T \approx 20$ мин. Это продолжалось около 30 мин. С 14:12 до 14:40 ионосфера оставалась невозмущенной. В интервале времени 14.40 – 14.50, кроме основной моды сигнала, регистрировалась дополнительная мода, сдвинутая по частоте на $\Delta f_d \approx -0.3$ Гц. После 14:50 наблюдается исчезновение устойчивого максимума в ДС. Такого рода возмущенность продолжалась более 1 ч. Заход Солнца на уровне Земли в пункте наблюдения имел место около 15:20, а в области отражения – примерно на 1 ч позже.

Пример результатов ночных наблюдений эффектов, сопутствовавших запуску тяжелой ракеты "Протон" 21 марта 1999 г., показан на рис. 3. Старт произошел в 00:09. До него ионосфера оставалась в основном спокойной. После 23:13 возник квазипериодический процесс с $f_{da} \approx 0.2$ Гц, $T \approx 18$ мин и длительностью $\Delta T \approx 40$ мин. С 01:12 до 01:18 наблюдалась дополнительная мода сигнала, сдвинутая на 0.2 Гц, а с 01:28 до 02:15 – эффект "распыхания" спектров. Восход Солнца на уровне Земли имел место примерно в 02:30, за час до этого – в нижней части F-области ионосферы. После 02:15 сигнал оставался практически одномодовым, наблюдались квазипериодические процессы сначала с $T \approx 30$ мин и $f_{da} \approx 0.25$ Гц, а затем с $T \approx 7 - 8$ мин и $f_{da} \approx 0.15$ Гц.

Пример вариаций ДС, сопутствовавших старту сверхтяжелого космического аппарата "Дискавери" 29 октября 1998 г. в 19:19 (переходное время суток), показан на рис. 4.

Заход Солнца на уровне Земли имел место около 15 часов, в нижней части F-области ионосферы – около 16 часов. Скорее всего, эффекты, связанные с терминатором, закончились до 18:50. За 30 мин до старта ракеты в ионосфере наблюдался слабо выраженный квазипериодический процесс с $T \approx 7$ мин и $f_{da} \approx 0.10 - 0.15$ Гц. К тому же с 19:13 до 19:45 сигнал был преимущественно двухмодовый. Ионосфера оставалась слабо возмущенной примерно до 20:30. После этого времени сигнал стал двухмодовым ($\Delta T \approx 15$ мин); возник также квазипериодический процесс с $T \approx 30$ мин продолжительностью 50 мин. С 21:10 до 21:55 доплеровский спектр оставался практически неизменным. В интервале 21:55 – 22:00 наблюдалось его кратковременное "рассыпание".

Старт ракеты средней тяжести "Дельта" имел место 7 февраля 1999 г. в 21:04 (рис. 5). В 21:10 возникли дополнительная мода с $\Delta f_d \approx -0.2$ Гц и квазипериодический процесс с $T \approx 8 - 10$ мин, $f_d \approx 0.1$ Гц и $\Delta T \approx 40$ мин. После 21:50 ионосфера оставалась спокойной, а в интервале времени 22:05 – 22:25 отмечено резкое уменьшение f_{da} на 0.4 – 0.6 Гц, "рассыпание" спектров. После 22:25 ионосфера была достаточно спокойной; обнаруживался квазипериодический процесс с $T \approx 25$ мин и $f_{da} \approx 0.10 - 0.15$ Гц.

Старт ракеты "Ариан" с космодрома Куру имел место в 23:28 (рис. 6). С 22:00 до 23:00 спектр сигнала был преимущественно многомодовым, в интервале времени 23:10 – 00:20 – в основном одномодовым. Лишь с 23:32 до 23:40 наблюдалось его уширение. После 00:25 в течение примерно 40 мин наблюдался хорошо выраженный квазипериодический процесс с переменным периодом, амплитудой около 0. Гц. Последующие 20 мин ионосфера оставалась спокойной, а после 01:40 начали проявляться эффекты утреннего терминатора.

Результаты статистического анализа

Из 205 сеансов наблюдений отбраковано 61 сеанс из-за некачественной регистрации сигнала. В 18 сеансах наблюдений среда была сильно возмущена естественными источниками. Статистическому анализу были подвергнуты оставшиеся 126 сеансов. По изменениям характера сигнала определялись задержки предполагаемой реакции среды Δt и вычислялись нескорректированные значения скоростей $v = R_0 / \Delta t$, где R_0 — расстояние от космодрома до места наблюдения. Такие скорости будем именовать кажущимися. Установлено, что имеет место четыре группы скоростей: 0.5 – 0.8, 1 – 6, 7 – 9 и 15 – 20 км/с. Первая скорость (0.5 – 0.8 км/с) наблюдалась только при СР с космодромов Плесецк и Байконур (всего 32 случая). Во второй группе статистически значимыми являются скорости 1 – 6 км/с (97 случаев). Такие скорости наблюдались преимущественно при СР с космодромов США и Франции. Для этой группы $v = 3.1 \pm 0.2$ км/с. К третьей группе относятся скорости 7 – 9 км/с (16 случаев). К четвертой группе при-

надлежат скорости 15 – 20 км/с (12 случаев). Скорости из двух последних групп наблюдались редко, и только при СР с космодромов, удаленных на расстояния ~10000 км.

3. Перенос возмущений. Типы волн

Выше показано, что СР сопровождалось крупномасштабными и глобальными возмущениями в ионосфере. Ключевыми вопросами являются следующие. Каким образом возмущения генерируются? Какими способами они переносятся на расстояния 1000 – 10000 км? Какова величина возмущений?

Атмосфера на высотах примерно до 100 км является сравнительно плотной средой, здесь работа ракетных двигателей и движение КА со сверхзвуковой скоростью сопровождается генерацией ударной акустической волны (УАВ). В ее мощность P_a преобразуется $10^{-3} - 10^{-2}$ мощности реактивной струи. Мощность последней для тяжелых и сверхтяжелых ракет достигает $10^{11} - 10^{12}$ Вт соответственно. При этом $P_a \approx 10^8 - 10^{10}$ Вт. Оптимальным для генерации УАВ диапазоном высот является 100 – 130 км. С одной стороны, эта область высот лежит над мезосферным волноводом (который эффективно захватывает и каналирует волны акустического типа), здесь атмосфера еще достаточно плотная. С другой стороны, ракета движется уже со сверхзвуковой скоростью, что относится к условиям генерации ударной волны. В указанном диапазоне высот траектория ракеты близка к горизонтальной. Важно, что УАВ в месте ее генерации приводит к относительным изменениям концентрации электронов 10 – 100 %. Ударная волна является источником акустико-гравитационных волн (АГВ). Кроме того, сверхзвуковое расширение плазмы реактивной струи и сверхзвуковое движение плазмы под действием КА в гиротропной ионосфере вызывает генерацию электромагнитных и магнито-гидродинамических (МГД) волн.

4. Обсуждение

Эффекты, сопровождающие полеты КА, отличаются разнообразием. Они зависят от расстояния до траектории аппарата, его высоты, вида топлива и, конечно, мощности двигателей, а также состояния ионосферы. Из 126 СР достаточно уверенная реакция среды наблюдалась во всех случаях. Обнаружены четыре группы скоростей v : 0.5 – 0.8, 1 – 6, 7 – 9 и 15 – 20 км/с. Первая из них связана с УАВ и АГВ.

Во второй группе средняя скорость $\bar{v} \approx 3.1 \pm 0.2$ км/с. Такую скорость имеют медленные МГД (ММГД) волны с частотами $\omega \sim 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (периоды $T \sim 100$ мин) [16]. Близкое значение v имеют также магнитоградиентные волны (волны Хантадзе [17]) в ночное время, однако они распространяются лишь в широтном направлении.

Скорости 7 – 9 км/с свойственны гиротропным волнам [16] в дневное время, когда в E -области ионосферы $N \approx (1 - 1.5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Кажущимся скоростям $v = 15 - 20$ км/с (задержки около 10 мин) соответствуют скорости $v' \approx 30$ км/с при $R \approx 10000$ км и времени движения ракеты до области генерации волны $\delta t \approx 3 - 5$ мин. Такие скорректированные (с вычетом δt) значения скорости v' характерны также для гиротропных волн,

когда в E -области ионосферы N уменьшалась до $4 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$ (утреннее, вечернее время). Сказанное здесь справедливо при угле между волновым вектором и вектором индукции геомагнитного поля $\alpha = 60^\circ$. Заметим, что для места расположения РФО наклонение магнитного поля составляет 66.4° . Таким образом, скорости 7 – 9 и 15 – 20 км/с следует отнести к одной группе — к скоростям гиротропных волн в различное время суток.

Скорость истечения реактивной струи около 3 – 4 км/с. В поперечном направлении струя расширяется с тепловой скоростью, которая порядка 1 км/с (температура газов в струе около 3000 – 4000 К). Важно, что эти скорости превышают как скорость звука v_s , так и характерную скорость ММГД $v_{as} = (B_0/\mu_0 N_n M)^{1/2}$ [16] (где B_0 – индукция магнитного поля, μ_0 — магнитная постоянная, N_n — концентрация нейтралов, M — средняя масса молекул газа). В результате такого соотношения скоростей генерируются скачки давления газа Δp , электронной концентрации ΔN и магнитного поля ΔB . Струя вызывает ускоренное движение ионосферной плазмы. Электроны в отличие от ионов на высотах E -области ионосферы являются замагниченными. Это обстоятельство обуславливает ток j , в результате которого генерируются возмущения магнитного поля ΔB . Расчёты дают $\Delta B = 5 - 50$ нТл. Для фазовой скорости волны $v_{ph} \approx 1 - 100$ км/с имеем $\Delta E \approx \Delta B v_{ph} \approx 0.005 - 5$ мВ/м [18]. Такого порядка должны быть поля в месте их генерации. Вследствие расходимости волн их амплитуда в месте регистрации на несколько порядков меньше, но, как оказывается, достаточна для заметного возмущения N , которое обнаруживается доплеровским методом.

5. Выводы

1. В результате статистического анализа вариаций доплеровских спектров, сопровождавших 126 стартов ракет, выявлены четыре группы кажущихся скоростей распространения возмущений: 0.5 – 0.8, 1 – 6, 7 – 9 и 15 – 20 км/с. Реакция на СР уверенно регистрировалась практически во всех случаях. Первая группа скоростей наблюдалась только при СР с космодромов Плесецк и Байконур. С такими скоростями распространяются слабо затухающие АГВ, период которых составлял 10 – 15 мин. Эти волны относятся к сильно диспергирующим. Вторая группа скоростей фиксировалась при СР с космодромов России, США, Индии и Франции ($R \approx 1500 - 10000$ км). Приблизительно такие скорости имеют ММГД-волны, а также волны Хантадзе. Фазовая скорость и глубина затухания (дальность распространения) первых существенно зависят от частоты волны. Скорость распространения волн Хантадзе в основном определяется значением концентрации электронов в E -области ионосферы. Эти волны практически не затухают и не диспергируют. Третья и четвертая группы (а они составляли фактически одну группу скоростей) имели место при СР на удаленностях ~ 10000 км. Перенос возмущений в этом случае, скорее всего, осуществлялся при помощи гиротропных волн. Их скорость существенно зависит от времени суток и ориентации волнового вектора по отношению к геомагнитному полю.

2. Оценены амплитуды возмущений параметров среды под действием расширяющейся реактивной струи КА. Показано, что эти амплитуды достигают значительных величин. Это в конечном итоге обеспечивает наблюдаемые на расстояниях порядка 1500 – 10000 км возмущения в ионосфере.

Работа выполнена при поддержке научно-технологического центра Украины, проектное соглашение № 1772.

1. Booker H. G. A local reduction of F-region ionization due to missile transit // *J. Geophys. Res.*, vol. **66**, 1961, no. A4, pp. 1073 – 1079.
2. Mendillo M., Hawkins G. S., Klobuchar J. A. A sudden vanishing of the ionospheric F region due to the launch of Skylab // *J. Geophys. Res.*, vol. **80**, 1975, no. 6, pp. 2217 – 2228.
3. Карлов В. Д., Козлов С. И., Ткачев Г. Н. Крупномасштабные возмущения в ионосфере, возникающие при полете ракеты с работающим двигателем (Обзор) // *Космические исследования*, т. **18**, 1980, № 2, с. 266 – 277.
4. Mendillo M. Rocket exhaust effects as active space plasma experiments of opportunity // *Proc. Int. Symp. Active Exp. Space*, Paris, 1983, pp. 285 – 292.
5. Bernhardt P. A. A critical comparison of ionospheric depletion chemicals // *J. Geophys. Res.*, vol. **92**, 1987, no. A5, pp. 4617 – 4628.
6. Mendillo M. Ionospheric holes: A review of theory and recent experiments // *Adv. Space Res.*, vol. **8**, 1988, no. 1, pp. 51 – 62.
7. Нагорский П. М., Тарашук Ю. У. Искусственная модификация ионосферы при стартах ракет, выводимых на орбиту космические аппараты // *Изв. вузов. Физика*, т. **36**, 1993, № 10, с. 98 – 107.
8. Нагорский П. М. Неоднородная структура области F ионосферы, образованная ракетами // *Геомагнетизм и аэрономия*, т. **38**, 1998, № 2, с. 100 – 106.
9. Нагорский П. М. Анализ отклика КВ-радиосигнала на возмущения ионосферной плазмы, вызванные ударно-акустическими волнами // *Изв. вузов. Радиофизика*, т. **42**, 1999, № 1, с. 36 – 44.
10. Нагорский П. М., Козлов С. И. Ионосферные возмущения, инициированные взрывом в средней атмосфере ракеты-носителя Союз // *Космические исследования*, т. **38**, 2000, № 4, с. 363 – 368.
11. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., et al. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching // *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. **3**, 1998, no. 2, с. 181 – 190.
12. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 1 // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*, 1999, № 7, с. 3 – 15.
13. Гармаш К. П., Розуменко В. Т., Тырнов О. Ф., и др. Радиофизические исследования процессов в околоземной плазме, возмущенной высокоэнергичными источниками. Часть 2 // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*, 1999, № 8, с. 3 – 19.
14. Гармаш К. П., Костров Л. С., Розуменко В. Т., и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури // *Геомагнетизм и аэрономия*, т. **39**, 1999, № 1, с. 72 – 78.
15. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование возмущений в средней ионосфере, сопровождающих старты и полеты космических аппаратов // *Радиофизика и радиоастрономия*, т. **4**, 1999, № 3, с. 227 – 246.
16. Сорокин В. М., Федорович Г. В. *Физика медленных МГД - волн в ионосферной плазме*. — М.: Энергоатомиздат, 1982. 136 с.
17. Хантадзе А. Г. О новой ветви собственных колебаний электропроводящей атмосферы // *ДАН*, т. **376**, 2001, № 2, с. 250 – 252.
18. 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*, т. **8**, 2003, № 2.

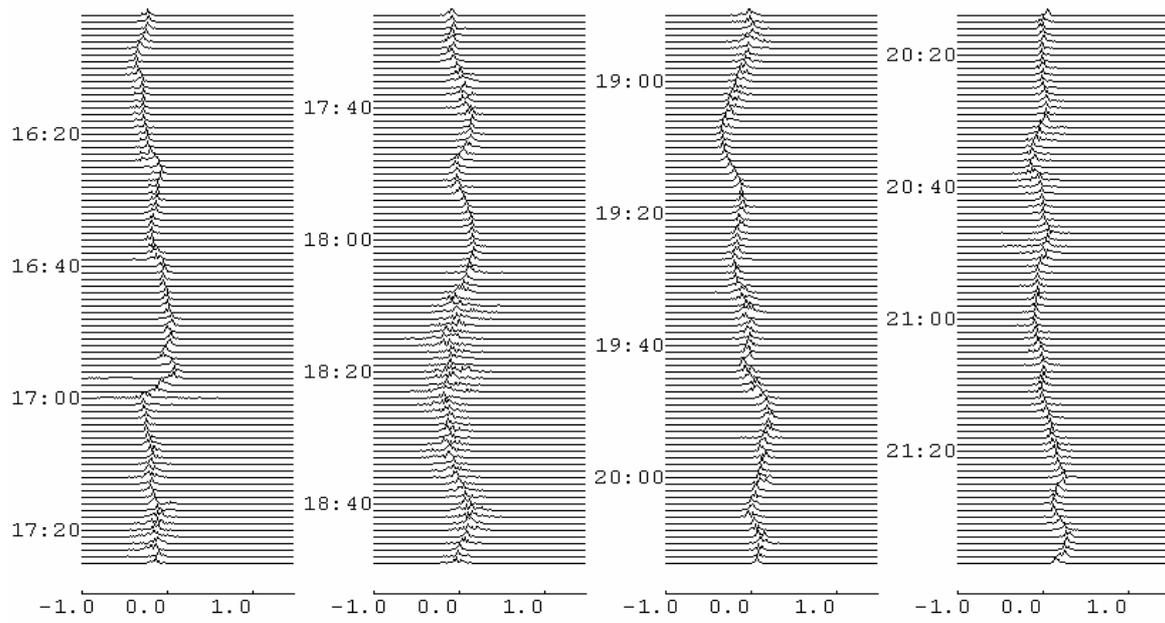


Рис. 1. Вариации ДС на частоте 3.0 МГц, супутствовавшие старту КА "Союз-У" 9 сентября 1999 г.

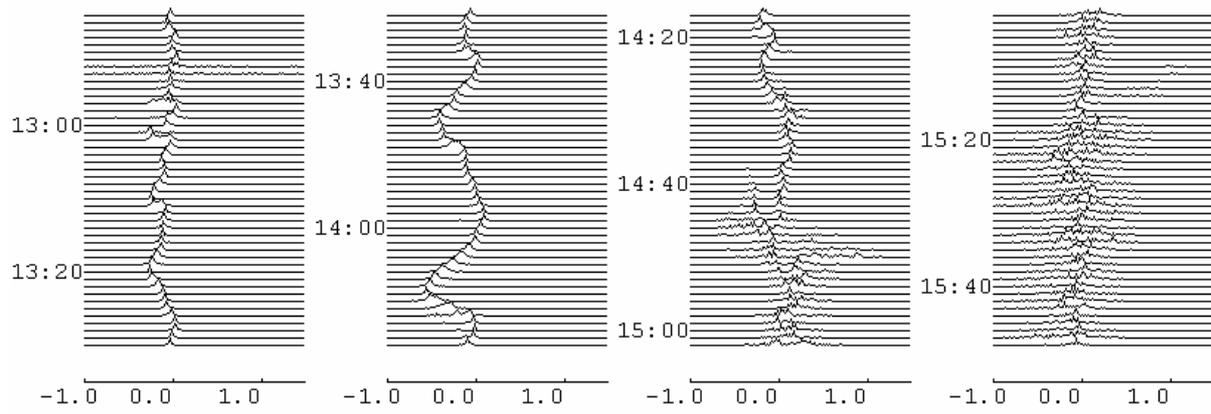


Рис. 2. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц, сопутствующие старту КА "Союз" 18 октября 1999 г.

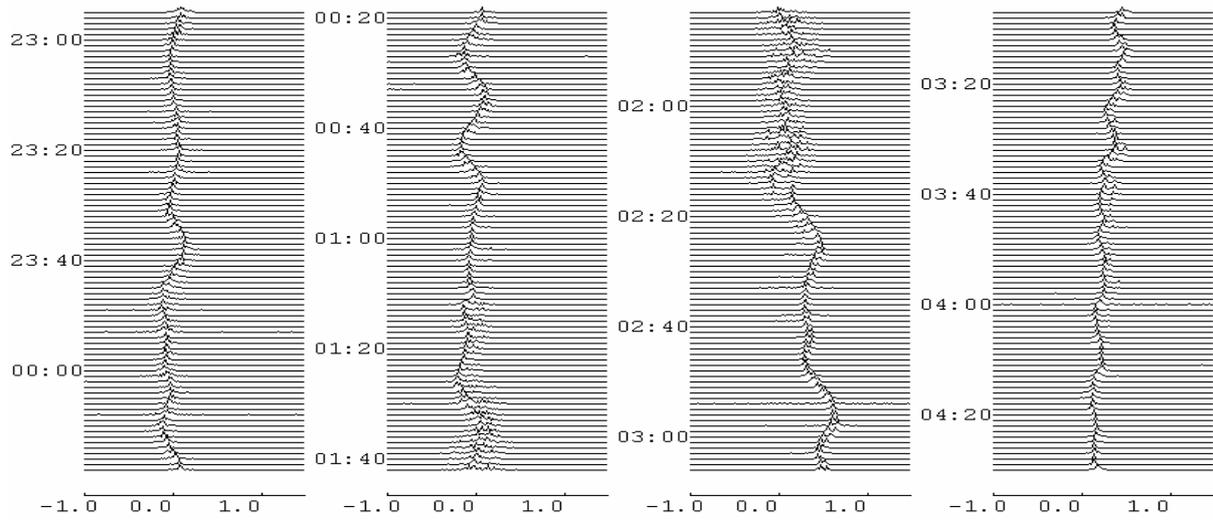


Рис. 3. Вариации ДС на частоте 3.0 МГц, супутнювавши старту КА "Протон" 20–21 марта 1999 г.

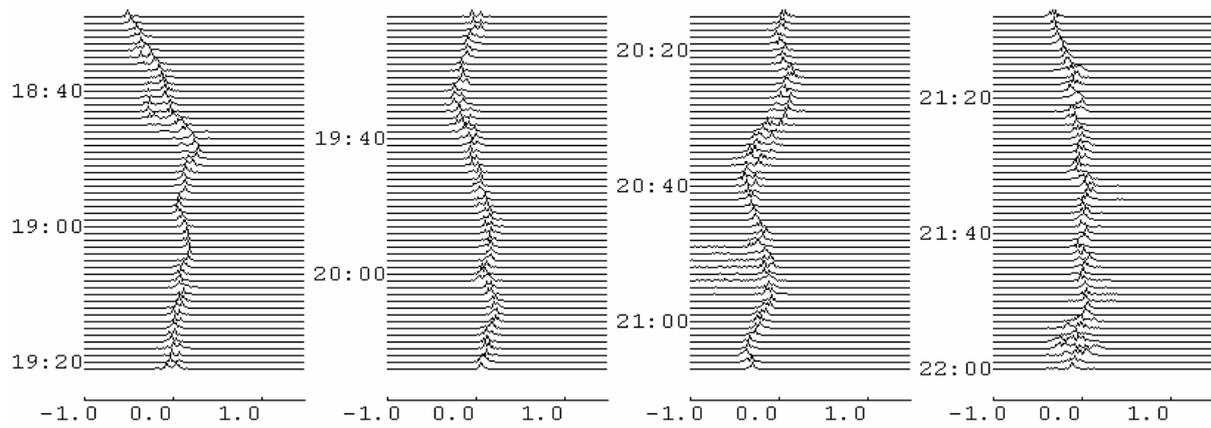


Рис. 4. Вариации ДС на частоте 3.0 МГц, супутнювавше старту КА “Дискавери” 29 октября 1998 г.

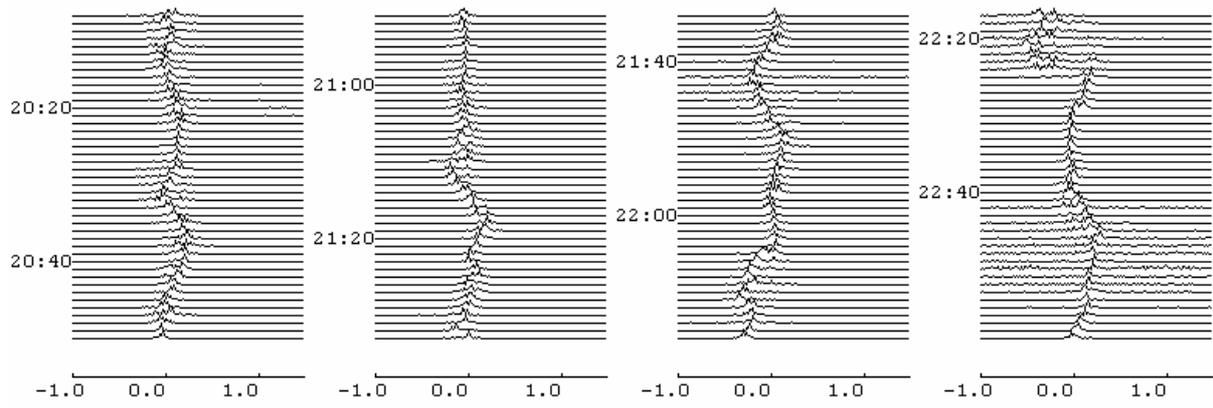


Рис. 5. Вариации ДС на частоте 3.0 МГц, супутствовавшие старту КА “Дельта” 7 февраля 1999 г.

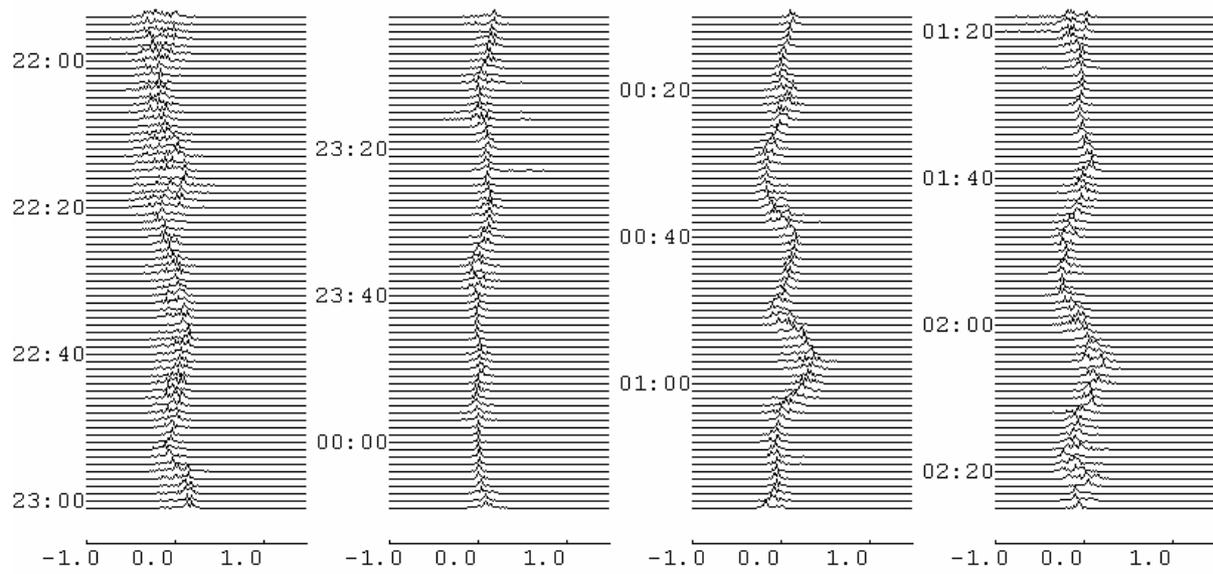


Рис. 6. Вариации ДС на частоте 3.5 МГц, супутствовавшие старту КА “Ариан” 21–22 марта 2000 г.