

ISSN 0453-8048

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
Вісник Харківського університету № 427

Радіофізика та електроніка

Випуск

1 1999

Radiophysics and electronics

1999

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ, ВОЗМУЩЕННОЙ ИСТОЧНИКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ.

2. ПРОЦЕССЫ В ИСКУССТВЕННО-ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЕ. ВАРИАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОСИГНАЛОВ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ

К.П. Гармаш, А.М. Гоков, Л.С. Костров, В.А. Поднос, В.Т. Розуменко, О.Ф. Тырнов, Ю.П. Федоренко, А.М. Цымбал, Л.Ф. Черногор

Харьковский государственный университет, Харьков, пл. Свободы, 4, 310077

Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 18 ноября 1998 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов в ионосфере, вызванных стартами, полетами и спусками (падениями) космических аппаратов, химическими и ядерными взрывами, воздействием мощного декаметрового и гектометрового радиоизлучения, а также инжекцией плазмогасящих и плазмообразующих веществ. Обсуждаются механизмы переноса возникающих возмущений. Описаны результаты исследования вариаций характеристик радиосигналов и радиозумов в диапазоне частот от 1 кГц до 4 ГГц и моделирования возмущений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: старты ракет, взрывы, мощное радиоизлучение, инжекция, радиосигналы (радиозумы), моделирование.

В первой части нашей работы [1] описаны экспериментальная база и некоторые нестационарные процессы в естественно-возмущенной ионосфере.

Цель данной статьи – изложение, сравнение и обобщение результатов экспериментальных исследований и моделирования процессов и вариаций характеристик радиосигналов в ионосфере, возмущенной антропогенными источниками энерговыделения.

Описываемые ниже измерения обычно проводились в Радиофизической обсерватории (РФО) ХГУ.

СТАРТЫ И ПОЛЕТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Исследование процессов в околоземной среде, вызванных стартами и полетами космических аппаратов (КА), в ХГУ ведется с середины 70-х годов. Оказалось, что процессы отличаются сложностью и многообразием. Ракета с включенным двигателем оказывает на среду гидродинамическое, тепловое, электромагнитное и химическое воздействия. В результате возникают геофизические, радиофизические, оптические и другие эффекты.

Нижняя ионосфера (50 – 100 км). Рассмотрим вначале эффекты в D-области ионосферы при различных удалениях R от места старта ракеты, изученные с помощью метода частичных отражений (ЧО) [2 – 7]. Величина R составляла ~ 100 км (измерения проведены на полигоне Капустин Яр), ~ 1500 км (космодром Плесецк – РФО), ~ 2500 км (космодром Байконур – РФО) и ~ 10000 км (мыс Канаверал – РФО). Наблюдения выполнены для ракет малой, средней и большой мощности ($P \sim 10^7 - 10^8$; $10^9 - 10^{10}$ и $10^{10} - 10^{11}$ Вт соответственно). Всего проведено около 150 экспериментов, причем около 100 из них для $R \approx 10000$ км.

При $R \sim 100$; 1500 и 2500 км с запаздыванием $\Delta t \approx 0,3 - 0,5$; ~ 1 и ~ 3 мин соответственно наблюдалось увеличение в 5 – 10 раз $\overline{A_{\pm}^2}$ (A_{\pm} – амплитуды ЧО-сигналов обыкновенной и необыкновенной поляризации) в диапазоне высот $z \sim 75 - 90$ км. Продолжительность всплесков $\overline{A_{\pm}^2}$ обычно составляла $\Delta T \sim 1 - 3$ мин. Мощность радиозума в полосе 50 кГц на частотах $f \approx 2 - 3$ МГц увеличивалась в 1,5 – 2 раза, $\Delta t \sim 1 - 10$ мин, $\Delta T \approx 1 - 2$ мин.

При $R \sim 10000$ км амплитуды ЧО-сигналов изменялись слабо даже при $P \sim 10^{11}$ Вт. Величина вариаций $\overline{A_{\pm}^2}$ не превышала нескольких десятков процентов, причем $\Delta t \approx 12$ мин, $\Delta T \approx 2 - 4$ мин. Зато увеличение мощности радиозума достигало 7 – 10 раз ($\Delta t \approx 11 - 12$ мин, $\Delta T \approx 1 - 2$ мин). Этот процесс часто был квазипериодическим с периодом $T \approx 5$ мин, число квазипериодов равнялось 4 – 5. Эффекты от менее мощных ракет наблюдались не достаточно достоверно.

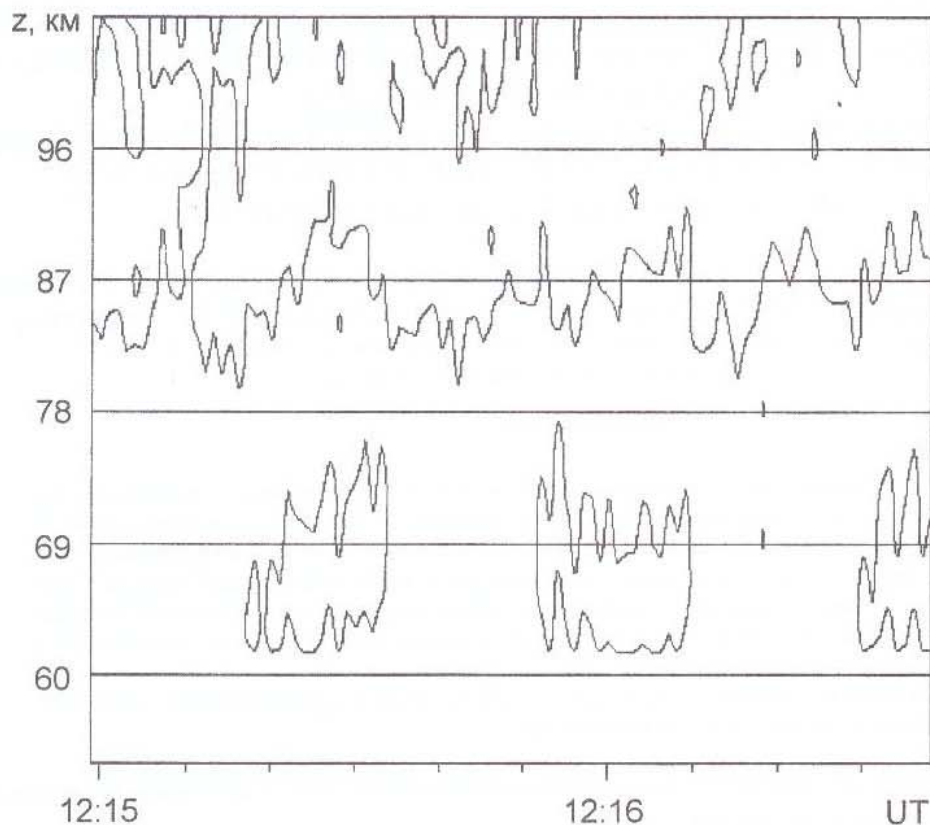


Рис. 1: Высотно-временные вариации уровней постоянных амплитуд смеси ЧО-сигнала и шума необыкновенной поляризации после старта КА "Дискавери" в 12:11 UT 02.12.1992) на мысе Канаверал ($f \approx 2,2$ МГц, $R \approx 10000$ км).

На рис. 1 для примера показаны высотно-временные вариации уровней постоянных амплитуд смеси ЧО-сигнала и шума после запуска КА на мысе Канаверал. Локализованное по высоте возмущение при таком способе представления данных имеет вид замкнутых контуров, размер которых по высоте меняется мало, а по времени увеличивается от нескольких до сорока секунд. На всем интервале возмущения такие контуры на необыкновенной компоненте зарождаются, начиная примерно с 12:14 UT, на высотах 63 – 69 км. С течением времени "горизонтальные размеры" таких контуров увеличиваются до 40 с к 12:30 UT на высотах 60 – 66 км. Интервал времени между контурами примерно равен их длительности. "Вертикальные размеры" контура с течением времени увеличиваются от 6 до 12 км в интервале 12:14 – 12:30 UT. Можно предположить, что такой характер возмущений связан с вариациями геомагнитного поля. В частности, если функция, описывающая геомагнитные пульсации, – четна относительно магнитного экватора, то возмущение локализовано по высоте; в противном случае возмущение охватывает широкий диапазон высот.

Таким образом, ракеты средней и большой мощности способны производить кратковременные возмущения в нижней ионосфере на расстояниях до нескольких тысяч километров. Мы считаем, что эффекты вызваны стимулированным высыпанием заряженных частиц из магнитосферы в нижнюю ионосферу, которое также сопровождается увеличением мощности шумового радиоизлучения плазмы в широком диапазоне частот. Последнее наблюдалось в глобальных масштабах. Какую роль играют возмущения магнитного поля предстоит еще выяснить.

Для изучения эффектов от стартов КА в нижней ионосфере использовались также сигналы навигационных радиосистем (ОМА, Чехия, $f = 50$ кГц; МСФ, Великобритания, $f = 60$ кГц и др. [8 – 11]). Измерения выполнены для $R \approx 2000$; 3000 и 10000 км. Например, при старте ракеты "Протон" 31.03.1987 ($P \approx 3 \cdot 10^{10}$ Вт) увеличение фазы $\Delta\varphi$ достигало 2 рад ($\Delta t \leq 0,5$ часа, $\Delta T \approx 4$ часа).

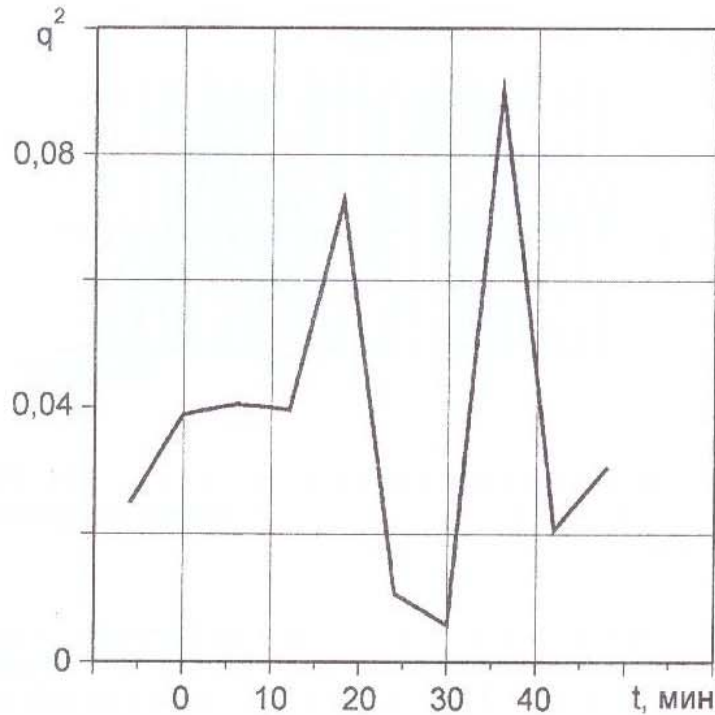


Рис. 2: Временные вариации отношения мощностей некогерентно рассеянного сигнала и шума в методике плазменной линии с высоты 420 км после старта КА "Союз - 19" с космодрома Байконур ($R \approx 200$ км) 15.07.1975. Наблюдается квазипериодическое возмущение ($\Delta t \approx 15$ мин, $\Delta T \approx 40$ мин, $T \approx 20$ мин). На оси времени "0" соответствует моменту старта ракеты.

Запуск носителя "Энергия" 15.11.1988 сопровождался флуктуациями $\Delta\varphi \leq 0,2$ рад. В этом же эксперименте на частоте 50 кГц $\Delta\varphi$ изменялось периодически с амплитудой 0,2 рад ($\Delta t \leq 1,3$ часа, $\Delta T \approx 1$ час, $T \approx 0,3$ часа). Обычно возмущения имели кажущиеся скорости $v \approx 0,3$ и ~ 1 км/с.

Средняя ионосфера (100 - 300 км). Для обнаружения возможных эффектов в E- и нижней части F-области удобными оказались метод доплеровского зондирования на вертикальных и наклонных (с протяженностью до ~ 1000 км) трассах, а также метод вертикального зондирования [5, 9, 10, 12, 13]. В отдельных случаях использовался метод некогерентного рассеяния [14]. Приведем далее примеры результатов наблюдений.

Рис. 2 иллюстрирует временную зависимость отношения сигнал/шум в методе некогерентного рассеяния, полученную при старте КА "Союз - 19" 15.07.1975. Величина $R \approx 200$ км. Видно, что $\Delta t \approx 15$ мин. Наблюдаемые квазипериодические процессы скорее всего вызваны воздействием ударной акустической волны, время распространения которой до F-области ионосферы примерно равняется 10 мин. Тогда скорректированное значение задержки $\Delta t' \approx 5$ мин. Ей соответствует кажущаяся скорость $v' \approx 0,7$ км/с.

На рис. 3 показаны вариации доплеровского смещения частоты f_d на вертикальной трассе во время старта ракеты "Энергия" в 17:30 UT 15.05.1987 (космодром Байконур, $R \approx 2500$ км, $f = 4,6$ МГц) [5]. Резкое увеличение f_d до 1 Гц с последующими квазипериодическими вариациями доплеровской частоты с периодом $T \sim 10 - 15$ мин соответствует времени прихода акустической волны, распространяющейся на высотах ионосферы с кажущейся скоростью $v' \approx 0,6 - 0,8$ км/с. Продолжительность возмущенного состояния F-области составила около 1 часа.

Аналогичный эффект зарегистрирован на наклонной трассе доплеровского зондирования Новосибирск - Харьков после старта с космодрома Плесецк КА "Магеллан" 16.11.1992.

Результаты исследования глобальных возмущений в ионосфере методом доплеровского зондирования свидетельствуют о том, что реакция среды на старт ракеты не всегда наблюдается уверенно. Удачным, например, является эксперимент 13.03.1989, измерения выполнены на частоте $f = 3,7$ МГц, $R \approx 10000$ км. Старт произведен около 14:50 UT. Уже через 18 мин появляются квазипериодические возмущения в ионосфере с $T \approx 20$ мин, амплитудой $f_d \approx 0,7$ Гц, $\Delta T \approx 50$ мин. Далее на зависимость $f_d(t)$ накладываются эффекты, связанные с вечерним терминатором (заход Солнца на уровне Земли

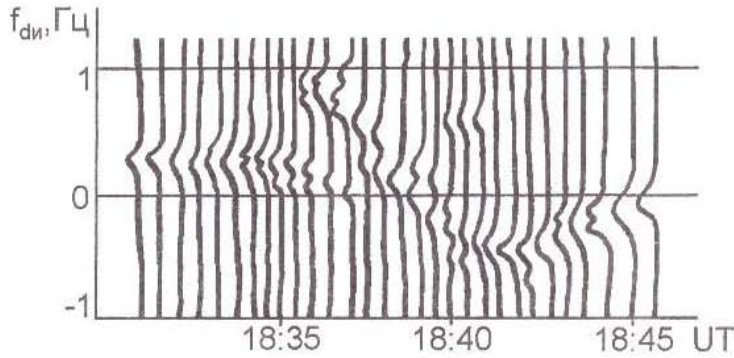


Рис. 3: Динамический спектр сигнала на вертикальной трассе ($f = 4,6$ МГц, $R \approx 2500$ км), полученный после старта ракеты "Энергия" в 17:30 UT 15.05.1987. Вариации доплеровской частоты возникли через 66 мин после старта.

около 16:00 UT). Если исключить время распространения акустического сигнала до области F ионосферы или время полета ракеты до ионосферы (около 8 мин), то $\Delta t' \approx 10$ мин и соответствующая этой задержке скорость $v' \approx 20$ км/с. Такую скорость имеет магнитный звук на высотах E-области ионосферы.

Другие результаты исследования возмущений в E- и F-областях ионосферы с использованием метода доплеровского зондирования на наклонных трассах описаны в наших работах [5, 10, 13].

Исследования, проведенные с использованием сети ионозондов, в целом подтвердили описанные выше результаты [12, 19, 20, 42]. Так, наблюдалось увеличение минимальной наблюдаемой на ионограммах частоты f_{\min} на $0,3 \pm 0,1$ МГц, $\Delta T \leq 15$ мин, а также квазипериодические ($T \approx 15 - 45$ мин) изменения критических частот $f_{o,x}F2$ с амплитудой около $0,2 \pm 0,1$ МГц, $\Delta T \approx 1 - 2$ часа. Времена запаздывания соответствовали скоростям $\sim 0,3 - 0,4$ км/с, $1 - 2$ км/с в нижней ионосфере и $\sim 0,5 - 0,7$ км/с, $1 - 2$ км/с в F-области ионосферы. Редко наблюдались $v \sim 10 - 100$ км/с. Устойчивая реакция имела место на старты достаточно мощных ракет ($\sim 10^{11}$ Вт) на удалениях до ~ 3000 км. Эффекты при $R \sim 10000$ км удавалось зафиксировать редко [17].

Средняя и внешняя ионосфера (100 - 1000 км). Возмущения F-области ионосферы исследовались при помощи когерентных сигналов низкоорбитальных навигационных искусственных спутников Земли (ИСЗ) типа "Цикада - М" [15, 16, 18].

Индикатором состояния ионосферы при ее радиопросвечивании этими сигналами является ионосферная составляющая доплеровского смещения частоты $f_{дн}(t)$ (t - текущее время регистрации), выделенная методом дисперсионного интерферометра на частоте $f \approx 150$ МГц. Погрешность и дискретность измерений $f_{дн}(t)$ составляют $\delta f = 0,005$ Гц, $\delta t = 2$ с.

На рис. 4 приведены регистрации $f_{дн}(t)$, относящиеся к исследованию ионосферы до (кривые 1, 2, 3) и после (кривые 4, 5, 6) старта ракеты "Энергия" в 17:30 UT 15.05.1987. Радиопросвечивание выполнялось над регионом с характерным масштабом около 1000 км (рис. 5). Вплоть до пуска ионосфера оставалась практически невозмущенной, величина концентрации электронов N в максимуме области F составляла $N_m \approx (4 - 4,5) \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Начало кривой 4 соответствует 28 минуте после старта. Измерения проведены через 2 - 2,5 часа после захода Солнца над соответствующим регионом на высоте $z = 300 - 350$ км. Поэтому вечерний терминатор не может быть источником наблюдаемых возмущений. Как видно, произошло почти полное "разрушение" регулярного хода зависимости $f_{дн}(t)$. В интервале 17:58 - 18:00 UT на ней наблюдаются интенсивные мерцания, обусловленные мелкомасштабными неоднородностями (ММН) N с размерами $\sim 15 - 30$ км. Проявление области пониженной (до $\sim 3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$) концентрации и ММН заметно в интервале 18:01 - 18:08 UT. Квазипериодические возмущения наблюдаются в интервалах 18:06 - 18:08 UT, 19:00 - 19:05 UT. Кажущиеся скорости перемещения упомянутых неоднородностей составляют $\sim 0,8 - 0,9$ км/с. Кривая 6 иллюстрирует процесс релаксации возмущений, которые еще проявляются в интервале 19:42 - 19:45 UT. В интервале же 19:45 - 19:51 UT существенных возмущений не наблюдается. Вместе с этим около 50 минут назад над этим же регионом наблюдались интенсивные квазипериодические возмущения. Если пред-

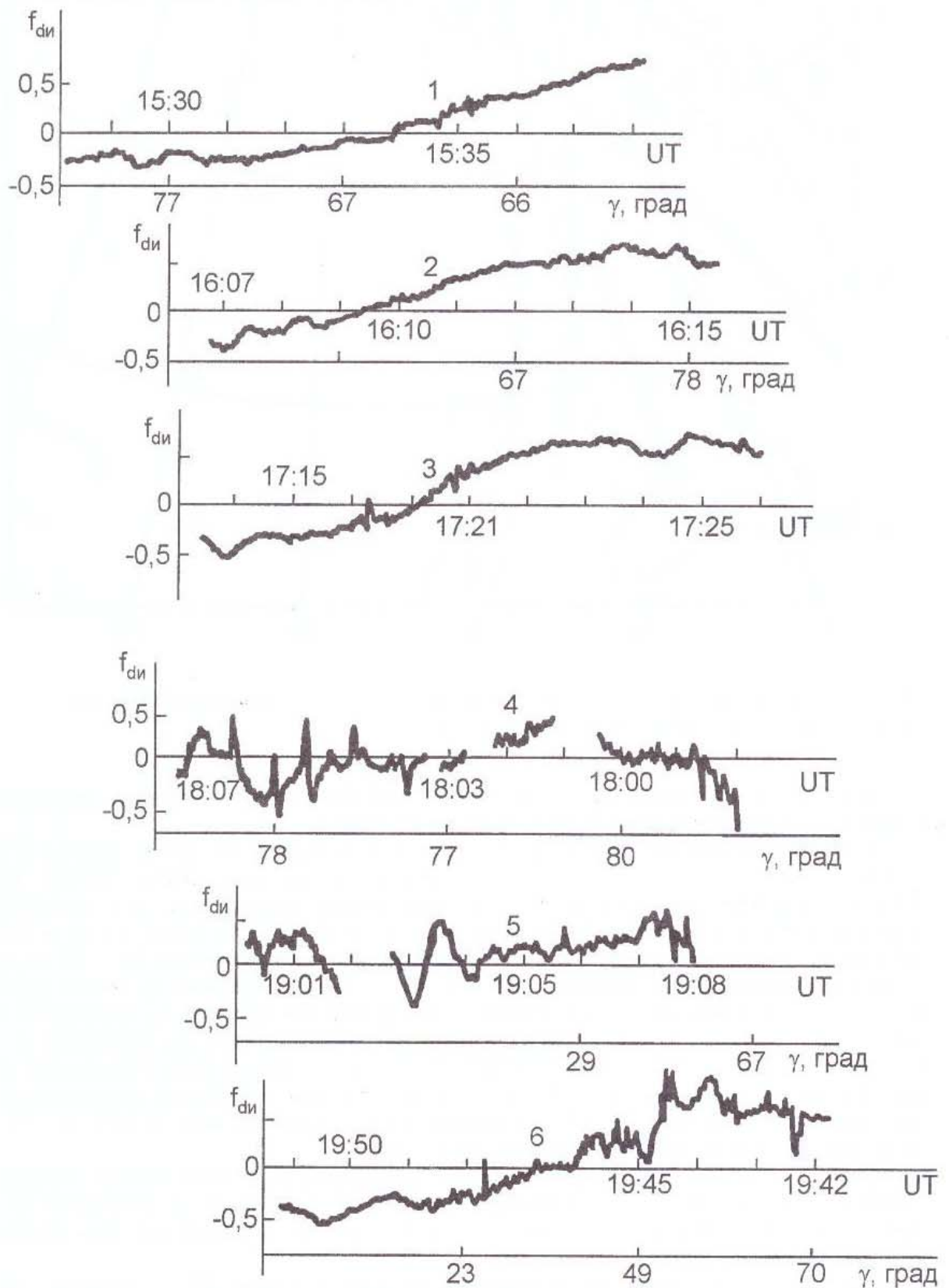


Рис. 4: Временные зависимости $f_{ди}(t)$ сигналов ИСЗ: 1, 2, 3 – до возмущения; 4, 5, 6 – после старта ракеты "Энергия" в 17:30 UT 15.05.1987. Ось γ – описывает зенитный угол ИСЗ в выбранный момент времени. Все кривые соответствуют полету ИСЗ с севера на юг.

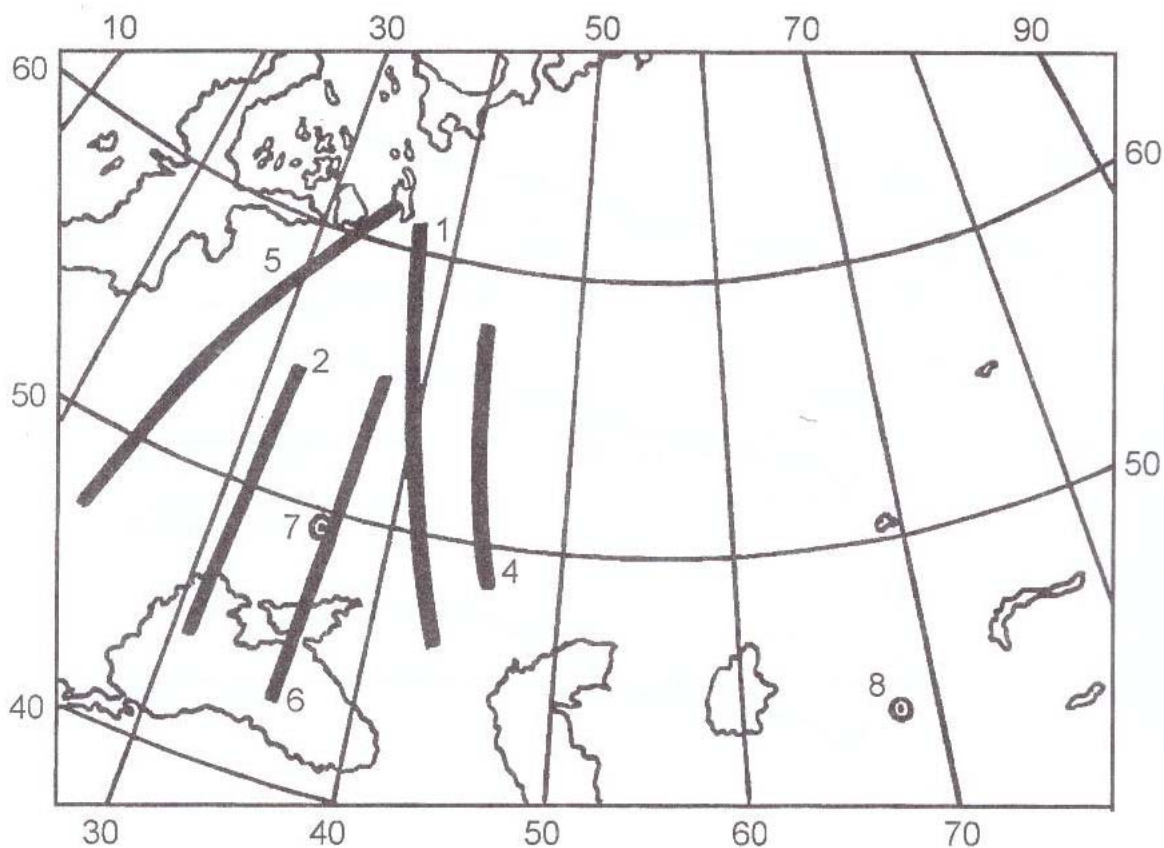


Рис. 5: Линии подыоносферных точек для кривых 1, 2, 4, 5, 6, приведенных на рис. 4; 7 – место расположения пункта наблюдения; 8 – место старта.

положить, что они там появились в 17:58 UT (т. е. в момент начала регистрации, соответствующей кривой 4), то время релаксации составляет не менее 107 мин.

На рис. 6 показаны зависимости $f_{di}(t)$, зарегистрированные 13.03.1989 до (кривая 1) и после (кривые 2, 3, 4) старта в 14:57 UT на мысе Канаверал транспортного корабля "Шаттл". Наиболее характерным признаком возмущений, обусловленных пусками мощных ракет, есть появление интенсивных мерцаний и квазипериодических возмущений (см. кривые 2, 3, 4). Однако в этом эксперименте наблюдалась также крупномасштабная неоднородность с широтным размером 200 – 300 км, в центре которой ионизация в начале превышала фоновую более чем на 40 % (кривая 2), а затем (кривые 3, 4) на 10 – 15 %. За пределами указанной неоднородности фоновые значения N_m изменяются в интервале $\sim (0,4 - 1,2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Размеры и проекция этой неоднородности рассчитывались по уровню фона при заданной высоте ее расположения $z_n = 400 \text{ км}$. Размеры области, вычисленные по половиной мощности возмущения, на $\sim 30 - 50 \%$ меньше. Проекция этой области на поверхность Земли простиралась вдоль широты $\phi \approx 50^\circ \text{N}$ в интервале долгот, по крайней мере, от 35°E до 45°E . Время жизни неоднородности, видимо, составляло около 2 часов.

Кривые 1 – 4 на рис. 7 характеризуют регион, ионосфера над которым является наиболее существенной для формирования соответствующих зависимостей $f_{di}(t)$ на рис. 6. Штриховая часть этих кривых относится к региону, расположенному под ионосферой с интенсивными мелкомасштабными неоднородностями.

Таким образом, по данным просвечивания ионосферы сигналами ИСЗ установлено, что после старта мощных ракет в F-области ионосферы появляются интенсивные квазипериодические возмущения с амплитудой до 10% от фоновой и широтным периодом около 300 км, время их жизни более 2 часов.

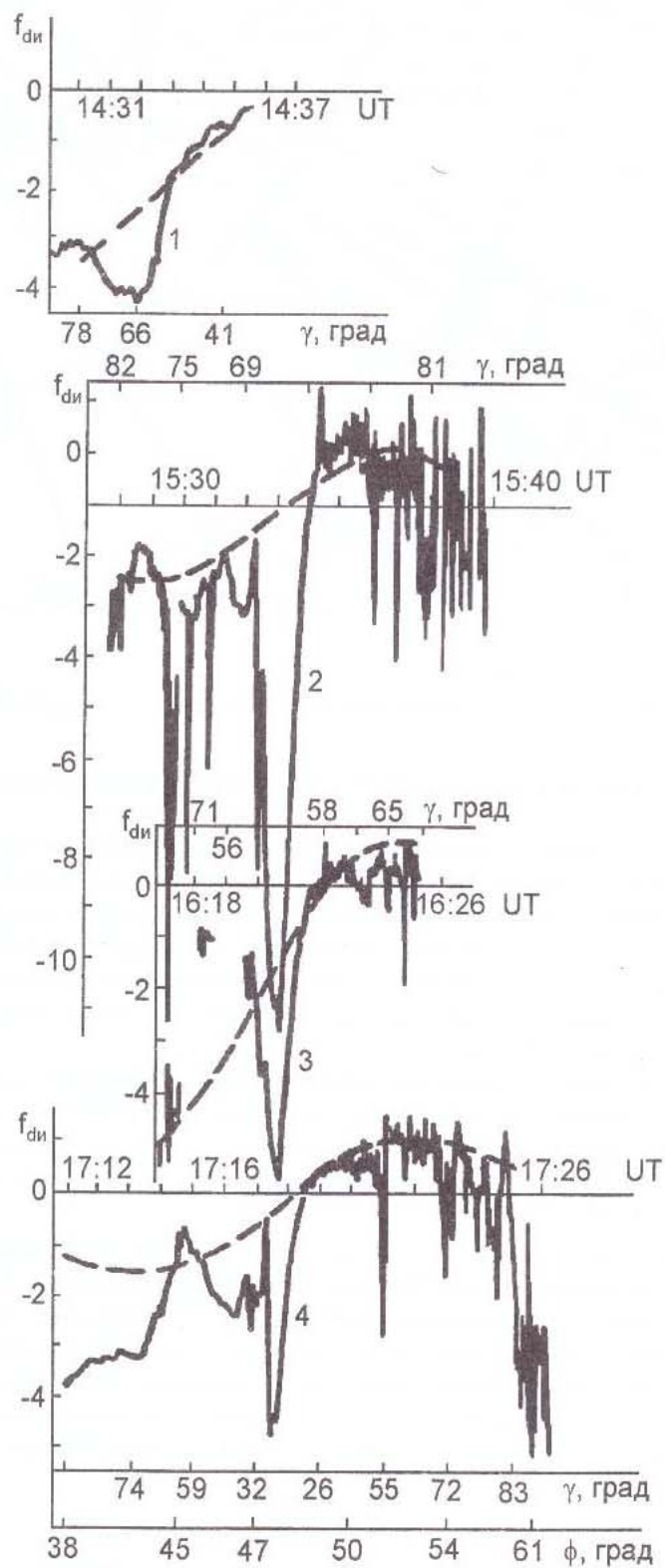


Рис. 6: Временные зависимости $f_{di}(t)$ сигналов ИСЗ: 1 – до возмущения; 2, 3, 4 – после старта КА типа "Шаттл" в 14:57 UT 13.03.1989. Штриховыми линиями показаны модельные зависимости $f_{di}(t)$, рассчитанные для невозмущенных условий. Все кривые соответствуют полету ИСЗ с юга на север. Ось γ – то же, что и на рис. 4. Ось ϕ – описывает широты подыоносферных точек соответствующих кривых.

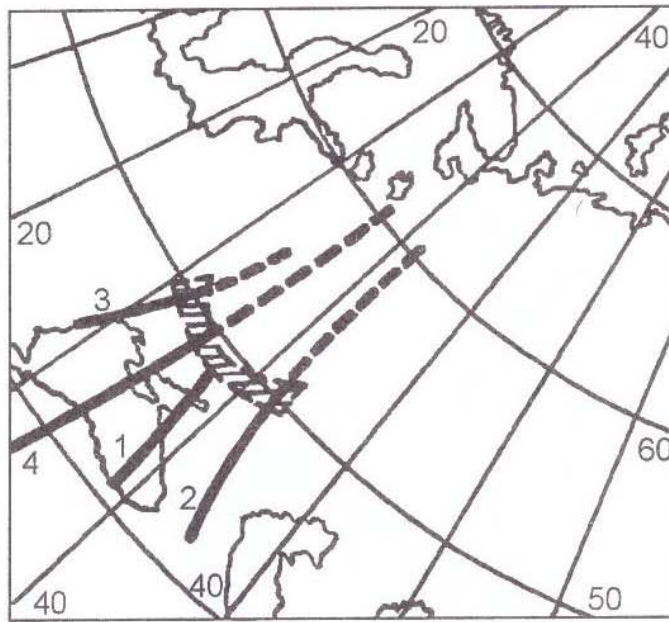


Рис. 7: Линии подионосферных точек для кривых 1 – 4, приведенных на рис. 6.

ПАДЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Процессы в ионосфере, возникающие при посадке или падении отработавших КА отличаются от процессов при стартах КА. При вхождении КА в плотные слои атмосферы ($z \leq 100$ км) генерируется мощная ударная волна, атмосферный газ перед КА нагревается до температур $T \sim 10^4$ К, а также ионизируется. Кроме того, при этом эффективно генерируются волны плотности (акустико-гравитационные волны – АГВ). Таким образом на атмосферу оказываются гидродинамическое, тепловое, ионизационное и химическое воздействия. При этом возникают геофизические, радиофизические, оптические и другие эффекты.

Генерация АГВ. Падение орбитальной станции США "Скайлэб" имело место в 16:45 UT 11.07.1979 в районе Австралии. Масса КА около 100 т, энергия – $3 \cdot 10^{12}$ Дж, мощность торможения – $10^{10} - 10^{11}$ Вт. При помощи сети ионозондов бывшего СССР зарегистрированы флуктуации f_{min} и $f_{o,x}F2$ порядка 0,2 – 0,3 МГц. Им соответствовали скорости $v \sim 0,6 - 1,1$ км/с, $T \sim 30 - 60$ мин, $\Delta T \approx 60 - 80$ мин [5, 12, 18].

Образование ионизированного следа. Эффекты при падении орбитальной станции "Салют - 7" в 03:47 UT 07.02.1991 в районе Южной Америки изучались при помощи доплеровского зондирования на вертикальной трассе [5]. Измерения выполнены в РФО примерно за 50 мин до падения КА (рис. 8). Масса станции около 40 т, энергия и мощность торможения составили величины порядка 10^{12} Дж и $10^9 - 10^{10}$ Вт. Доплеровское зондирование показало, что после пролета КА на последнем витке его высота примерно равнялась 110 км. Падение сопровождалось возникновением сильно ионизированного следа с $\Delta T \approx 200$ с, величина $f_d \approx 0,1$ Гц ($f \approx 3,7$ МГц).

ВЗРЫВЫ

Химические взрывы в атмосфере оказывают в основном газодинамическое воздействие на среду (генерация ударной волны, переходящей в акустическое возмущение). Почти вся энергия взрыва превращается в энергию ударной волны. Высотные ядерные взрывы представляют собой комплексный источник воздействия. При этом имеют место ионизационное, тепловое, химическое, электромагнитное и другие воздействия, приводящие к оптическим, геофизическим, радиофизическим и иным эффектам.

Процессы в ионосфере, вызываемые взрывами, зависят от удаления до места взрыва, его высоты (глубины), величины энерговыделения [2 – 4, 9, 11, 13, 20 – 22].

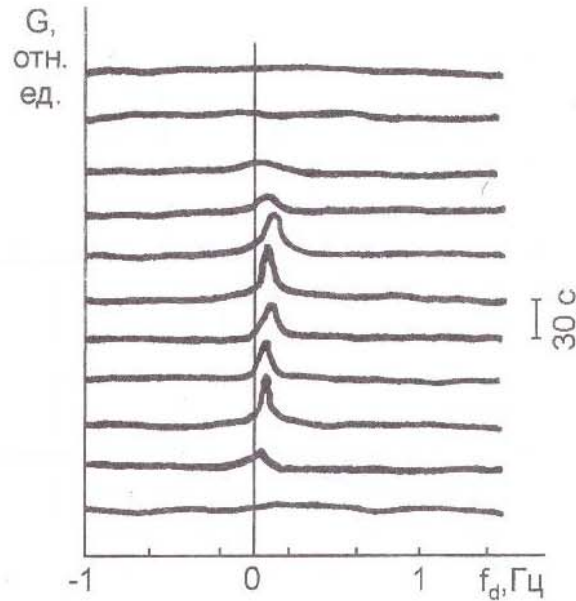


Рис. 8: Динамический спектр сигнала на вертикальной трассе ($f = 3,7$ МГц) за 50 мин до падения орбитальной станции "Салют - 7", которое имело место в 03:47 UT 07.02.1991. Измерения выполнены в РФО. Высота КА около 110 км. Появившийся сигнал связан с отражением от возникшего ионизированного следа.

Наземные взрывы. Эксперимент проведен на полигоне Капустин Яр 12.10.1987. Доплеровское зондирование ионосферы на удалении $R \sim 30$ км от района наземного взрыва с энергосвободой $\sim 10^{11} - 10^{12}$ Дж показало, что увеличение скорости распространения акустической волны с высотой (при $z > 100$ км) приводит к высотному "растяжению" акустического импульса. На высотах F-области ионосферы прохождение акустического импульса вызывает знакопеременные вариации доплеровского смещения частоты зондирующего сигнала на протяжении $\Delta t \sim 60$ с (рис. 9).

В конце 80-ых годов произведена серия взрывов с $E \sim 10^{11} - 10^{12}$ Дж на полигоне Капустин Яр, где в соответствии с международным договором путем подрыва уничтожались ракеты. Расстояние до пункта наблюдения составляло около 700 км. Реакция нижней ионосферы изучалась при помощи метода ЧО. Проанализировано около 20 событий. Устойчивая реакция нижней ионосферы не обнаружена, хотя в отдельные дни наблюдались эффекты, которые, по-видимому, связаны со взрывами. Например, 19.05.1990 интенсивность ЧО сигнала уменьшалась на высотах 90 - 100 км через $\Delta t \approx 40$ мин ($v' \approx 330$ м/с). Такая реакция имела место лишь после первого взрыва (они следовали с 09:00 до 10:20 UT через $T_b = 20$ мин). На высотах 90 и 93 км после первых двух взрывов возникли заметные синхронные всплески интенсивности ЧО сигнала с $\Delta t \approx 12$ мин ($v' \approx 1,7$ км/с) и $\Delta T \approx 5 - 10$ мин. Отношение сигнал/помеха при этом составляло 2 - 10. Кроме того, через 40 мин после двух последних взрывов на высотах 96 и 99 км возникло квазипериодическое возмущение с $T \approx 5$ мин; $\Delta T \approx 80$ мин, $v' \approx 330$ м/с.

Проведены наблюдения за такими же взрывами методом многочастотного зондирования. Проанализируем, например, эксперимент 17.12.1989, когда имело место 5 взрывов с 06:30 до 07:50 UT с $T_b = 20$ мин. Для сигнала с $f = 4940$ кГц (расстояние от места взрыва до середины трассы $R \approx 900$ км) через $\Delta t \approx 30 - 35$ мин ($v' \approx 0,6 - 0,5$ км/с) после каждого из первых четырех взрывов возникало значительное уширение доплеровских спектров, появлялись новые моды с $f_d \leq 1$ Гц, $\Delta T \approx 5 - 10$ мин. Одновременно имело место усиление волновых процессов с $T \approx 15$ мин, которое продолжалось и после последнего взрыва не менее 1 часа. Указанные эффекты наблюдались и для сигнала с $f = 6055$ кГц, однако они были выражены слабее. На трассе с $f = 1503$ кГц ($R \approx 700$ км) через 12 мин после каждого из первых четырех взрывов (после пятого - через 20 мин) возникали кратковременные ($\Delta T \approx 1 - 5$ мин) всплески амплитуды сигнала, а также появлялся слабый сигнал станции синхронного вещания со смещением $f_d \approx 0,2$ Гц. Ширина доплеровского спектра последнего

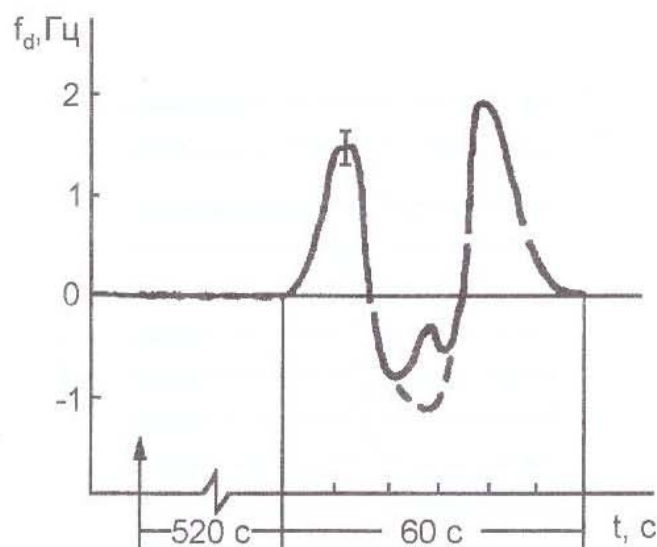


Рис. 9: Временные вариации доплеровского смещения частоты на вертикальной трассе ($f \approx 4,1$ МГц, $R \approx 30$ км) через 520 с после наземного химического взрыва с энерговыделением $\sim 10^{11} - 10^{12}$ Дж. Эксперимент проведен на полигоне Капустин Яр 12.10.1987.

с периодом около 10 мин изменялась в 1,5 – 2 раза. Этот сигнал исчез через 12 мин после последнего взрыва. Запаздыванию $\Delta t \approx 12$ мин соответствует $v \sim 1$ км/с ($v' \sim 1,7$ км/с). Эффекты на трассе с $f = 1593$ кГц выражены слабее.

Воздушные взрывы. При взрыве космического аппарата (КА) "Челленджер" 28.01.1986 в 08:39 UT (мыс Канаверал) на высоте около 14 км на трассе Великобритания – Харьков ($f = 16$ кГц) сначала наблюдалось увеличение фазы сигнала на 1,5 рад с $\Delta t_1 < 0,5$ часа и $\Delta T_1 \approx 0,5$ часа, а затем ее уменьшение до 1,5 рад ($\Delta t_2 \approx 1,5$ часа, $\Delta T_2 \approx 3,5$ часа). Одновременно с этим амплитуда сигнала уменьшается в 4-5 раз ($\Delta t_2 \approx 1,5$ часа, $\Delta T_2 \approx 3,5$ часа). Большему Δt соответствует $v \approx 2$ км/с. Поскольку энерговыделение и мощность источника были относительно невелики, нельзя уверенно утверждать, что описанные вариации радиосигналов вызваны взрывом КА, а не естественными процессами в среде. Надежных вариаций параметров ионограмм и магнитограмм после этого взрыва для $R \sim 10000$ км не зафиксировано.

Подземные ядерные взрывы. Они, как и химические взрывы, оказывают на атмосферу в основном газодинамическое (точнее акустическое) воздействие. Рассмотрим пример регистрации методом частичных отражений глобальных возмущений, возникших после взрыва на невадском полигоне 13.08.1987 ($E \sim 10^{14} - 10^{15}$ Дж). Эксперимент проведен в предвечернее время (15:00 UT), заход Солнца над местом наблюдения произошел почти через 3 часа. Первое значительное увеличение (до порядка) средней интенсивности $\overline{A_{\pm}^2}$ ЧО-сигнала имело место через $\Delta t \approx 3 - 5$ мин ($v \approx 50 - 30$ км/с) на высоте $z \approx 105$ км, а через 20 мин возмущение регистрируется во всей D-области; их продолжительность $\Delta T \approx 1 - 3$ мин. Наблюдается 2 – 3 всплеска с квазипериодом около 6 мин. На меньших высотах величина Δt больше. Кажущаяся скорость распространения возмущений сверху вниз составляет около 300 м/с. На 20 – 40 мин возмущения исчезают, а затем появляются вновь. Очередная группа всплесков $\overline{A_{\pm}^2}$ наблюдается с запаздыванием 65 – 85 мин ($v' \approx 3 - 2$ км/с). При этом имеют место значительные вариации интенсивности шума $\overline{A_{\text{ш}}^2}$ в полосе частот $\Delta f = 50$ кГц на частоте 2,2 МГц. Всплески $\overline{A_{\pm}^2}$ обычно связаны с усилением интенсивности неоднородной структуры электронной концентрации ΔN^2 и увеличением N в ионосфере.

Величины $v' \approx 2 - 3$ км/с и $v' \approx 6 - 8$ км/с близки к скоростям поверхностных и объемных сейсмических волн. Значение $v \approx 30 - 50$ км/с свидетельствует о генерации волн иной природы (по-видимому, гиротропных волн или магнитного звука). Скорости $v \sim 1 - 2$ км/с имеют медленные магнитогидродинамические (МГД) волны.

Возмущение E- и F-областей в этом же эксперименте изучалось при помощи многочастотного зондирования. Так, на квазивертикальной трассе с $f \approx 4$ МГц реакция среды возникла уже на 3–5 мин. Она заключается в появлении квазипериодических возмущений f_d с периодом около 15 и 30 мин, продолжительностью $\Delta T \approx 80$ мин и постепенно нарастающей амплитудой от 0,1 Гц до 0,2 Гц. Спустя 38 мин приходит второе возмущение длительностью около 20 мин, которое накладывается на первое; оно, скорее всего, связано с воздействием акустического импульса на ионосферу, поэтому $\Delta t' \approx 28$ мин, $v' \approx 6$ км/с. Первое возмущение имеет $v \approx 30 - 50$ км/с. После прихода обоих возмущений доплеровский спектр сигнала уширяется и появляются новые моды с $f_d \sim 0,1 - 0,2$ Гц.

Показательным также является подземный ядерный взрыв, проведенный в 04:00 UT 14.08.1988 г. на полигоне Семипалатинск ($E \approx 6 \cdot 10^{14}$ Дж). Для диагностики возмущений использовались трассы гектометрового диапазона ($f = 1485$ кГц, расстояние между передатчиком и приемником $D \approx 70$ км, ориентация трассы север – юг; $f = 1539$ кГц, $D \approx 50$ км, ориентация трассы юг – север) и декаметрового диапазона ($f = 4940$ и 6020 кГц, $D \approx 480$ км, ориентация трассы запад – восток; $f = 9410$ кГц, $D \approx 2500$ км, ориентация трассы запад – восток). Поскольку эксперимент проведен в утреннее время, то необходимо проанализировать роль восходных эффектов. Для трасс гекто- и декаметрового диапазонов восход Солнца в ионосфере произошел примерно за 1,5 – 2 часа до воздействия источника. Учитывая, что реакция на прохождение терминатора длится обычно около одного часа, можно утверждать, что он не оказал существенного влияния на изучаемые эффекты. Наиболее ярко реакция на воздействие взрыва выражена на частоте 6020 кГц в виде увеличения уровня сигнала, $\Delta t \approx 6,5$ мин, $R \approx 3200$ км. В то же время для сигнала с $f = 9410$ кГц, который отражается примерно на той же высоте, $\Delta t \approx 8,5$ мин, $R \approx 4220$ км. Знание значений Δt и R для двух сигналов позволяет оценить время развития процесса Δt_0 и скорость распространения возмущений v' . Оказалось, что в пределах разрешающей способности по времени, равной 30 с, имеем $\Delta t_0 \approx 0$, $v' \approx 8,2$ км/с. Продолжительность эффекта равна 5 – 7 мин. Затем для сигнала с $f = 6020$ кГц через $\Delta t \approx 13$ мин наблюдается уширение доплеровского спектра, многомодовость, $\Delta T \approx 10$ мин. Если учесть время запаздывания акустической волны, равное примерно 6 мин, то $\Delta t' \approx 7$ мин, $v' \approx 8$ км/с. Следующая группа возмущений имеет запаздывание $\Delta t \approx 25$ мин или $\Delta t' \approx 19$ мин ($v' \approx 2,8$ км/с). Поведение сигнала с частотой $f = 4940$ кГц иное. Это связано с тем, что он отражается значительно выше (около 200 км). Первый отклик появляется с запаздыванием $\Delta t \approx 3$ мин, при этом доплеровский спектр сужается, амплитуда основной моды растет, процесс периодически повторяется с $T \approx 6$ мин. Такое запаздывание соответствует скорости $v \approx 20$ км/с.

Для всех трасс гектометрового диапазона $\Delta t \approx 24,5$ мин или же $\Delta t' \approx 20$ мин, $v' \approx 2,7$ км/с.

Подземные ядерные взрывы, проведенные утром 02.08.1987 на полигонах Семипалатинск (01:00 UT) и Новая Земля (02:00 UT) с $E \sim 10^{14} - 10^{15}$ Дж привели к изменению фазы на 0,6 рад для сигнала с $f = 60$ кГц на трассе Великобритания – Харьков. Время $\Delta t \approx 0,5$ часа для обоих взрывов. Ему соответствует $v \approx 1,7$ км/с. По сравнению с контрольными днями 01.08.1987 и 03.08.1987, в день взрыва утреннее опускание нижней ионосферы (а точнее, формирование верхней стенки волновода Земля – ионосфера) задерживается примерно на 1 час.

Рассмотрим результаты, полученные при помощи сети ионозондов. Наблюдения осуществлялись на станциях Харьков, Нижний Новгород, Москва, Караганда и Паратунка (Камчатская обл.). Проанализирована реакция ионосферы на 12 подземных ядерных взрывов, для чего обработано около 1000 ионограмм. Величина E составляла $\sim 10^{14} - 10^{15}$ Дж, R изменялось от 750 до 10000 км. Например, после взрыва 19.04.1987 (04:00 UT, $E \approx 7 \cdot 10^{13}$ Дж, $R \approx 750$ км) f_oF2 изменяется на 0,2 – 0,3 МГц с $\Delta t \approx 15; 45$ и 105 мин. Им соответствуют $v' \approx 2,5; 0,4$ и 0,1 км/с. В контрольные дни 18.04.1987 и 20.04.1987 такие вариации отсутствовали. Изменения f_{\min} 19.04.1987 возникали с $\Delta t \approx 30; 90$ и 135 мин, т. е. имели место $v' \approx 0,5; 0,15$ и 0,1 км/с. Скорее всего зафиксирован один процесс с $v' \approx 0,5$ км/с и $T \approx 60$ мин. В этот же день воздействие взрыва сопровождалось возникновением слоя E_s . Опишем далее эксперимент 22.04.1986 (полигон Невада, 15:30 UT, $E \sim 10^{14} - 10^{15}$ Дж). Наблюдение осуществлялось в трех пунктах, расстояние от каждого из них до источника $R \approx 10000$ км. Первый и второй пункты находились примерно на одном меридиане, а первый и третий – на одной широте с источником. Первое увеличение f_{\min} на 0,3 – 0,4 МГц имело место с $\Delta t \leq 15$ мин. Это дает оценку $v \geq 10$ км/с. Такое изменение f_{\min} , по-видимому, связано с увеличением N в нижней ионосфере. Кроме того, здесь имело место слабо выраженное колебание f_{\min} с $\Delta t \approx 90; 135$ и 180 мин. Ему соответствует $v' \approx 2$ км/с и $T \approx 45$ мин. В области F задержки $\Delta t \approx 30; 120; 150$ и 225 мин. Тогда $v' \approx 8; 1,5; 1,2$ и 0,8 км/с. Для второго пункта, удаленного на запад примерно на 2500 км от первого, через $\Delta t \approx 15 - 30$ мин после взрыва наблюдались значительные (до 1,5 МГц) увеличения f_{\min} и f_oF2 . Кроме того, имела место генерация квазипериодических ($T \approx 45 - 60$ мин) возмущений.

Трудно предположить, что столь сильные эффекты вызваны взрывами. Скорее всего на естественные предзаходные эффекты накладываются процессы, связанные со взрывом. Для последних $\Delta t \approx 15; 75; 120$ и 195 мин ($v \geq 15; 2,5; 1,5$ и $0,8$ км/с) в нижней ионосфере и $\Delta t \approx 0; 30; 90$ и 195 мин ($v' \geq 10; 8; 2,5$ и $0,8$ км/с) в F-области. Для третьей станции $\Delta t \approx 30; 75; 135$ и 165 мин ($v' \approx 7; 2,5; 1,3$ и 1 км/с) в нижней ионосфере и $\Delta t \approx 30; 90$ и 150 мин ($v' \approx 8; 2,5$ и $1,2$ км/с) в области F. Как видно из анализа эффектов в трех пунктах наблюдения, величины времен запаздывания в целом согласуются между собой. Скорее всего, кажущиеся скорости распространения возмущений в меридиональном и широтном направлениях близки.

Приведем результаты статистического анализа вариаций f_{\min} и f_oF2 и их времен запаздывания для $R \approx 10000$ км [12, 42]. Оказалось, что изменение f_{\min} и f_oF2 равно $0,3 \pm 0,1$ МГц. Наблюдается пять групп $\Delta t \approx 30 \pm 5; 80 \pm 5; 150 \pm 12$ и 250 ± 14 мин ($v' \approx 8,3 \pm 1,4; 2,4 \pm 0,1; 1,2 \pm 0,1$ и $0,69 \pm 0,04$ км/с). Эти скорости не противоречат результатам, полученным другими методами.

Таким образом, мощные взрывы в атмосфере и под землей вызывают генерацию АГВ, акустических и сейсмических волн, для которых $v' \sim 0,1 - 0,2; 0,3 - 0,7; 3 - 4$ и $6 - 8$ км/с. Эти волновые процессы, как и процессы с $v' \sim 1000$ км/с (быстрые МГД волны), изучались другими авторами еще в 60-е годы. Несколько позже была также исследована возможность генерации медленных МГД волн ($v' \sim 1 - 2$ км/с). Нами же обнаружены волновые процессы с $v' \sim 30 - 50$ км/с, по-видимому, связанные с распространением в ионосфере магнитного звука и гиротропных волн.

МОЩНОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ

Мощное радиоизлучение оказывает в основном тепловое и химическое (связанное с изменением скоростей химических реакций) воздействия на околоземную плазму. Оно является экологически наиболее чистым источником возмущений. Этот источник вызывает в ионосферно-магнитосферной системе радиофизические, геофизические и слабые оптические эффекты.

Аномальные эффекты. Исследования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения в ХГУ проводятся с начала 70-х годов. В первых экспериментах наряду с хорошо известными эффектами нагревного типа зафиксированы некоторые аномалии в поведении радиосигналов [23]. Они проявлялись преимущественно при первом в данном эксперименте включении мощного радиоизлучения с запаздыванием $\Delta t \approx 5 - 10$ мин и имели продолжительность $\Delta T \approx 1 - 2$ мин. Величина эффекта и его появляемость определялись геофизической обстановкой. В частности, обнаружено аномальное увеличение коэффициента амплитудной кроссмодуляции, увеличение на $0,2 - 0,4$ МГц частоты f_{\min} , значительное увеличение $A_{\pm}^2, A_{\text{ш}}^2$, аномальное ослабление зондирующих сигналов, прошедших через возмущенную область. Все описанные эффекты наблюдались в пределах диаграммы направленности антенны мощной установки, однако их появление нельзя было объяснить непосредственным воздействием радиоизлучения на ионосферную плазму. Скорее всего оно стимулировало развитие процессов, подобных естественным. С 1983 г. стали исследоваться возмущения, возникающие на значительных удалениях от нагревных установок. Они получили название крупномасштабных. В настоящее время накоплен экспериментальный материал, охватывающий полный цикл солнечной активности, для различных расстояний между возмущающей и зондирующей установками (от 100 до 2700 км) и их взаимного расположения. Измерения выполнены с привлечением ряда радиофизических методов [24 - 31].

Крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере. Первые экспериментальные исследования крупномасштабных возмущений были проведены 31.05.1983 - 03.06.1983 при работе мощного стенда "Сура" вблизи г. Нижний Новгород в режиме: несущая частота радиоволны обыкновенной поляризации $f = 4785$ и 5828 кГц, без модуляции, эффективная излучаемая мощность $PG = 300$ МВт.

Диагностика возмущений методом ЧО проводилась в РФО, расстояние до возмущающей установки составляло $R \approx 1100$ км. Усреднение интенсивностей ЧО сигналов выполнено на минутных интервалах времени с такой же сдвижкой. Обнаружен значительный (в 2 - 3 раза) рост A_{\pm}^2 на 14 - 15 мин после начала работы нагревного стенда. Кратковременные (1 - 2 мин) всплески интенсивностей связаны с моментами включения-выключения возмущающей установки. Записи флуктуаций горизонтальных компонент геомагнитного поля в полосе частот $0,01 - 0,3$ Гц (высокочастотный -ВЧ- канал магнитометра), произведенные в обсерватории ИФЗ РАН в п. Борок Ярославской обл. ($R \approx 400$ км), показали, что примерно в это же время возникало увеличение на $0,5 - 1$ нТл их амплитуды.

В серии экспериментов, выполненных в апреле 1984 г., интересны дни, когда возмущающая установка работала короткими циклами ($T_{\text{ц}} < 3$ мин), $f = 4785$ и 6815 кГц, $PG = 300$ МВт. Первое увеличение A_{\pm}^2 в 1,5 - 2 раза появляется на 7 - 8 мин после первого включения установки, а макси-

мальное увеличение (более чем в 4 раза) возникает на 15 – 16 мин. Продолжительность этих возмущений составляет 5 – 6 мин. Вариации не связаны с каждым отдельным включением и выключением, а имеет место интегрирование возмущений. Через 9 – 10 мин после первого включения возмущающей установки появляются довольно значительные ($\sim 2 - 3$ нТл) флуктуации геомагнитного поля. Более четко они прослеживаются для компоненты "север – юг" и имеют преобладающий период 4 – 6 мин для низкочастотного (НЧ) канала (полоса частот 0,0015 – 0,02 Гц) и 1 – 2 мин – для высокочастотного. Максимальная амплитуда возмущений геомагнитного поля наблюдается на 23 – 28 мин для ВЧ канала (2 нТл) и 40 – 45 мин для НЧ канала (около 4 нТл) после начала работы мощного стенда.

Рассчитанные по экспериментальным данным профиль невозмущенной электронной концентрации N_0 и профили относительного возмущения N/N_0 в разные моменты времени свидетельствуют о появлении слоя повышенной ионизации с $\Delta N/N_0 \leq 1$ на высотах 70 – 80 км.

В период с 19.11.1986 по 21.11.1986 были проведены эксперименты, в которых возмущение ионосферы производилось радиоволной обыкновенной поляризации, излучаемой мощной декаметровой установкой НИИ Радио (г. Москва), $R \approx 800$ км. Режим ее работы следующий: $PG = 80$ МВт, $f = 5905$ кГц, $T_{\text{ц}} = 45$ мин, продолжительность нагрева – 30 мин, излучение было промодулировано синусоидой с частотой 1 кГц, глубина модуляции 60 %. В середине интервала нагрева производилось уменьшение мощности установки в 2 раза. Опишем основные результаты по регистрации, полученной 20.11.1986. Увеличение в 2 – 5 раз A_{\pm}^2 обнаружено на высотах $z = 75 - 87$ км через $\Delta t \approx 10$ мин после включения возмущающей установки, его продолжительность достигает 15 мин. Следующее, менее продолжительное (порядка 5 – 8 мин), увеличение A_{\pm}^2 наблюдается через 15 – 16 мин после первого и, видимо, связано с переключением излучаемой мощности нагревного стенда. Третий максимум наблюдается через 16 мин после полного выключения возмущающей установки. Более слабо выражены увеличения интенсивности ЧО сигналов, связанные со следующим включением стенда. Аналогичное поведение A_{\pm}^2 характерно и для экспериментов 19.11.1986 и 21.11.1986. Примерно после часа работы установки на всех трех экспериментальных регистрациях наблюдается уменьшение практически до нуля интенсивностей ЧО сигналов, особенно A_{\pm}^2 , которое сохраняется практически до конца эксперимента и, видимо, связано с возросшим поглощением. Благодаря продолжительным (15 мин) интервалам между переключениями мощности нагревного стенда на магнитограммах обнаружены увеличения амплитуды флуктуаций напряженности горизонтальных компонент геомагнитного поля продолжительностью 5 – 7 мин в диапазоне частот 0,01 – 0,3 Гц через 3 – 5 мин после каждого переключения.

Для исследования зависимости параметров крупномасштабных возмущений от мощности нагревного стенда 15.12.1987 был проведен эксперимент, в котором излучаемая мощность изменялась от включения к включению, принимая значения 0,8; 0,36 и 0,1 от максимальной. Стенд "Сура" работал в следующем режиме: $PG_{\text{max}} = 300$ МВт, $f = 4802$ кГц, $T_{\text{ц}} = 10$ мин, продолжительность нагрева 0,5 мин. При $R \approx 1100$ км обнаружено, что через 10 – 14 мин после включений с мощностью $0,8 \cdot P_{\text{max}}$ и $0,36 \cdot P_{\text{max}}$ интенсивность рассеянного сигнала A_{\pm}^2 с высоты $z = 93$ км возрастает в 2 – 3 раза по сравнению с невозмущенным значением. Продолжительность возмущений 2 – 3 мин. Реакции на включения с мощностью $0,1 \cdot P_{\text{max}}$ не обнаруживаются.

Активные эксперименты по нагреву полярной ионосферы вблизи г. Тромсе (Норвегия, $R \approx 2700$ км) проводились 12.11.1991 – 15.11.1991. Нагрев ионосферы осуществлялся мощной ($PG = 360$ МВт) радиоволной обыкновенной поляризации на частоте $f = 7,953$ МГц. Данный цикл измерений представлял интерес по той причине, что возмущение ионосферы производилось в высоких широтах, где высыпания частиц из магнитосферы значительно интенсивнее среднеширотных, а требуемые для этого величины возмущений геомагнитного и геоэлектрического полей меньше. Недостатком этих экспериментов является то, что наблюдения проводились в переходное время суток и в ионосфере присутствовали значительные возмущения, связанные с заходом Солнца. Общим для дней, когда производилось возмущение, является продолжительное (около 1 часа) увеличение A_{\pm}^2 , обнаруживаемое через 30 – 35 мин после начала работы нагревной установки в г. Тромсе. Такому запаздыванию соответствует $v \approx 1,3 - 1,5$ км/с. В эксперименте 12.11.1991 оно наблюдается на высотах $z \approx 84 - 93$ км, причем уже после захода Солнца, и связано, по-видимому, с увеличением электронной концентрации на этих высотах. Дополнительным подтверждением этому может являться значительное ослабление сигнала, отраженного от слоя E, на высотах 96 – 110 км. Укажем также, что A_{\pm}^2 ослабляется более сильно, чем A_{\pm}^2 .

Нами впервые также зарегистрирована реакция нижней ионосферы на периодический (5 мин включено, 5 мин выключено) нагрев ионосферы мощным ($PG \approx 100 - 300$ МВт) радиоизлучением,

который осуществлялся вблизи г. Нижний Новгород. На трассе Чехия – Харьков ($f = 50$ кГц) в сеансах с нагревом обнаружены с запаздыванием $\Delta t \approx 15$ мин квазипериодические вариации фазы $\Delta\varphi \approx 7^\circ$ с $T \approx 5$ мин; 20 мин; $\Delta T \approx 40$ мин. Погрешность измерений фазы 3° [10].

Крупномасштабные возмущения в средней ионосфере. Кроме метода частичных отражений и магнитометрических средств, рассматриваемые возмущения исследовались методом вертикального зондирования с помощью сети ионозондов бывшего СССР, методами доплеровского вертикального и многочастотного (3 кГц – 30 МГц) наклонного зондирования [10, 13, 19, 20]. Проводились также панорамные измерения ионосферного радиошума в диапазоне частот 1 – 30 МГц. В частности, в эксперименте 29.01.1987 получены одновременные записи интенсивностей обыкновенной и необыкновенной компонент шума на частоте $f = 2,2$ МГц в полосе частот $\Delta f \approx 50$ кГц, доплеровского смещения частоты радиосигнала частотой $f \approx 2,4$ МГц на вертикальной трассе (место наблюдения – РФО), и геомагнитного поля (обсерватория Борок). Возмущение непрерывной радиоволной необыкновенной поляризации частотой $f = 1,35$ МГц ($PG = 10$ МВт) производилось вблизи г. Нижнего Новгорода. Оказалось, что через 7 – 10 мин после включения мощного радиоизлучения интенсивность шума уменьшается более чем в два раза, а отношение интенсивностей нормальных компонент шума – от 1 – 1,1 до 0,5 – 0,7. Продолжительность этих возмущений достигает часа и более. Доплеровское смещение частоты через $\Delta t_1 \approx 12$ – 15 мин возрастает в 1,2 – 1,5 раза, а через $\Delta t_2 \approx 20$ мин изменяет знак, достигая значения $-0,2$ Гц. В это же время в обоих частотных каналах несколько увеличивается амплитуда флуктуаций геомагнитного поля. Таким задержкам соответствуют $v_{1,2} \approx 1,2$ – 1,5 и 0,9 км/с. В других экспериментах нагрев приводил к возникновению квазипериодических ($T \approx 5$ – 20 мин при $z \approx 100$ – 300 км, $\Delta T \leq 1$ часа) возмущений в ионосфере, к усилению многомодовости и даже развалу доплеровских спектров сигнала. Обычно наблюдались $\Delta t \approx 25$ – 30 мин, т. е. $v \approx 0,7$ – 0,6 км/с при $f = 2$ – 4 МГц [25].

Из статистического анализа ионограмм (темп снятия – одна ионограмма за 15 мин) для ионозондов, удаленных от возмущающих станций на расстояние $R \approx 100$ км, следует, что возмущение проявляется в усилении вариаций f_{\min} и критической частоты f_oF2 на $0,3 \pm 0,1$ МГц, возникающем с запаздыванием $\Delta t < 15$ мин и имеющем продолжительность $\Delta T \approx 46 \pm 12$ мин. Для ионозондов, удаленных на $R \approx 1000$ км, величина вариаций f_{\min} , f_oF2 и их продолжительность примерно такая же, как и при $R \approx 100$ км, но теперь наблюдается два времени запаздывания возмущений: $\Delta t_1 < 15$ мин и $\Delta t_2 \approx 30 \pm 11$ мин, свидетельствующие о существовании двух механизмов возмущений [24].

Таким образом, воздействие мощного радиоизлучения сопровождается возникновением целого комплекса аномальных эффектов [23, 30, 31]. К обнаруженным их проявлениям относятся следующие: образование слоев ионизации на высотах $z \approx 70$ – 100 км, генерация или усиление спорадического слоя E_s , увеличение поглощения радиоволн с частотой $f \sim 1$ – 10 МГц, рост флуктуаций параметров сигналов в диапазоне частот $f \sim 1$ – 250 МГц, увеличение уровня ионосферных радиошумов при $f \sim 1$ – 10 МГц, а также генерация волновых возмущений, имеющих скорость $v \approx 0,3$ – 0,7 км/с и период $T \approx 5$ – 20 мин. Важно, что перечисленные процессы развивались через 1 – 10 мин после включения мощного радиоизлучения, могли заканчиваться до его выключения или же продолжаться (даже усиливаться) после прекращения воздействия источника возмущения. Эффекты наблюдались на удаленностях не менее 2700 км от нагревной установки. Их величина и появляемость существенно зависели от геофизической обстановки. Эти факты свидетельствуют о том, что мощное нестационарное радиоизлучение выступает в роли стимулятора естественных процессов.

Описанные выше эффекты можно объяснить стимулированным высыпанием частиц, запасенных в околоземном космическом пространстве. Известно, что вторгающиеся в атмосферу корпускулы вызывают увеличение электронной концентрации, особенно в нижней ионосфере, рост уровня шумового радиоизлучения в широком диапазоне частот, а также генерацию акустико-гравитационных волн с $v \approx 0,3$ – 0,8 км/с.

Стимулированному высыпанию частиц предшествует ряд процессов [30, 31]. Под действием мощного нестационарного радиоизлучения, в результате суммирования возмущений от отдельных импульсов длительностью $\tau < t_N$ ($t_N \approx 10$ – 100 с – время становления N) или при $\tau > t_N$, происходит увеличение электронной концентрации на высотах D-области ионосферы. При этом возникает неоднородность проводимости ионосферы. В присутствии внешнего ионосферного тока она поляризуется, что приводит к генерации низкочастотного электромагнитного излучения. Проникая в магнитосферу, последнее вызывает перераспределение захваченных частиц по питч-углам, а также их высыпание. При этом вновь происходит увеличение N , модуляция проводимости ионосферы и генерация упомянутых волн, т. е. усиление и повторение процесса первичного возмущения. Если границы зоны вторгающихся в ионосферу ($z \approx 100$ км) корпускул выходят за границы первоначально возмущенной

области, то должен иметь место распространяющийся за пределы диаграммы направленности антенны нагревной установки процесс за счет взаимодействия ионосфера – магнитосфера – ионосфера. В результате подвода энергии из магнитосферы распространяющиеся возмущения слабо затухают.

ИНЖЕКЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ РЕАГЕНТОВ

Выбросы (как правило при помощи взрыва) веществ оказывают на околоземную среду газодинамическое, химическое, ионизационное и тепловое воздействия. Этот вид активных экспериментов вполне может быть экологически чистым (при массе вещества, скажем, не более 1 – 10 кг).

Выбросы сопровождаются возникновением комплекса эффектов – геофизических, радиофизических, оптических и других.

Инжекция химических реагентов является удобным методом моделирования ряда естественных процессов (генерация квазистатических электрических и магнитных полей, неоднородностей N и т. п.). Кроме того, инжекция плазмообразующих веществ оказывается полезной при моделировании искусственных ионизированных образований (ИИО) другой природы (например, возникающих при высотных ядерных взрывах). Выбросы плазмогасящих веществ используют для ослабления влияния ионосферы, в частности, при решении задач декаметрового и гектометрового радиоастрономии. Некоторым из этих вопросов посвящены наши работы [3, 4, 32 – 34].

Образование ионосферных "дыр". Выброс в ионосферу значительного количества плазмогасящих веществ происходит при сгорании ракетного топлива на активном участке траектории стартующей ракеты. При этом в средней ионосфере образуется ионосферная "дыра" или область пониженной концентрации (ОПК). Для ее наблюдения использовался метод доплеровского зондирования. Измерения проводилось на полигоне Капустин Яр. Зондирующая установка расположена на удалении 150 – 200 км от активного участка траектории ракеты средней мощности. Развитие ОПК наблюдалось с 10 по 30 мин, а ее релаксация – с 30 по 80 мин после старта. На рис. 10 показана доплерограмма и зависимость изменения действующей высоты отражения сигналов доплеровского зондирования ($f = 3,7$ МГц). Изменения действующей высоты отражения достигают 30 – 40 км, а относительное уменьшение электронной концентрации в F-области не превышает 10 – 15 %. Процессы развития и релаксации ОПК сопровождаются генерацией волновых возмущений с квазипериодом 10 – 15 мин и $\Delta N/N_0 \approx 5$ %.

Плазмообразование. Доплеровское зондирование искусственных ионосферных образований (ИИО) выполнено в период проведения экспериментов по программе "Активные эксперименты в космосе" на полигоне Капустин Яр. Плазмообразующие реагенты инжестировались на высоте около 150 км с метеорокет МР - 12. Доплеровский ионозонд располагался на удалении около 50 км от точки проекции центра ИИО на земную поверхность.

Пример доплерограммы сигналов зондирования ИИО показаны на рис. 11. До момента выброса реагентов (в основном цезия) наблюдался только сигнал отражения от F-области (частота зондирования $f \approx 3,7$ МГц, строб по дальности 260 – 335 км). Примерно через 2 мин после инъекции зарегистрированы дополнительные сигналы прямого отражения от ИИО (строб по дальности 110–185 км) и рикошетирующего с последующим отражением от ионосферы (строб по дальности 335–410 км). Продолжительность наблюдения сигналов, отраженных от ИИО, составляла 45 мин, а доплеровское смещение частоты достигало $-0,5$ Гц.

Инжекция плазмообразующих веществ на высотах $z \sim 150$ км приводила также к увеличению в 5 – 10 раз A_{\pm}^2 ЧО-сигналов в диапазоне высот 70 – 100 км ($\Delta t \approx 1 - 2$ мин, $\Delta T \approx 1 - 3$ мин). Скорее всего при этом имело место стимулированное высыпание частиц из радиационного пояса.

ВЛИЯНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОСИГНАЛОВ

Вариации характеристик радиоволн существенно зависят от их диапазона и от типа источника энерговыделения [9, 10, 13, 35 – 37]. В целом же радиоволнам всех диапазонов свойственно увеличение глубины замираний и частоты их появления. Это свидетельствует об усилении плазменной турбулентности ионосферы во время возмущений.

Мириаметровые радиосигналы (3 – 30 кГц). Они проникают в нижнюю часть ионосферы (до высот 80 – 100 км днем и ночью соответственно). Возмущения в ионосфере вызывают флуктуации амплитуды A до 4 – 5 раз и фазы $\Delta\varphi$ до 1 – 2 рад [9, 10]. Параметры радиосигналов чувствительны к увеличению ионизации в нижней ионосфере, обусловленной, например, высыпанием частиц из магнитосферы. Иногда вариации A и φ – квазипериодические с периодом $T \approx 5 - 30$ мин. Скорость

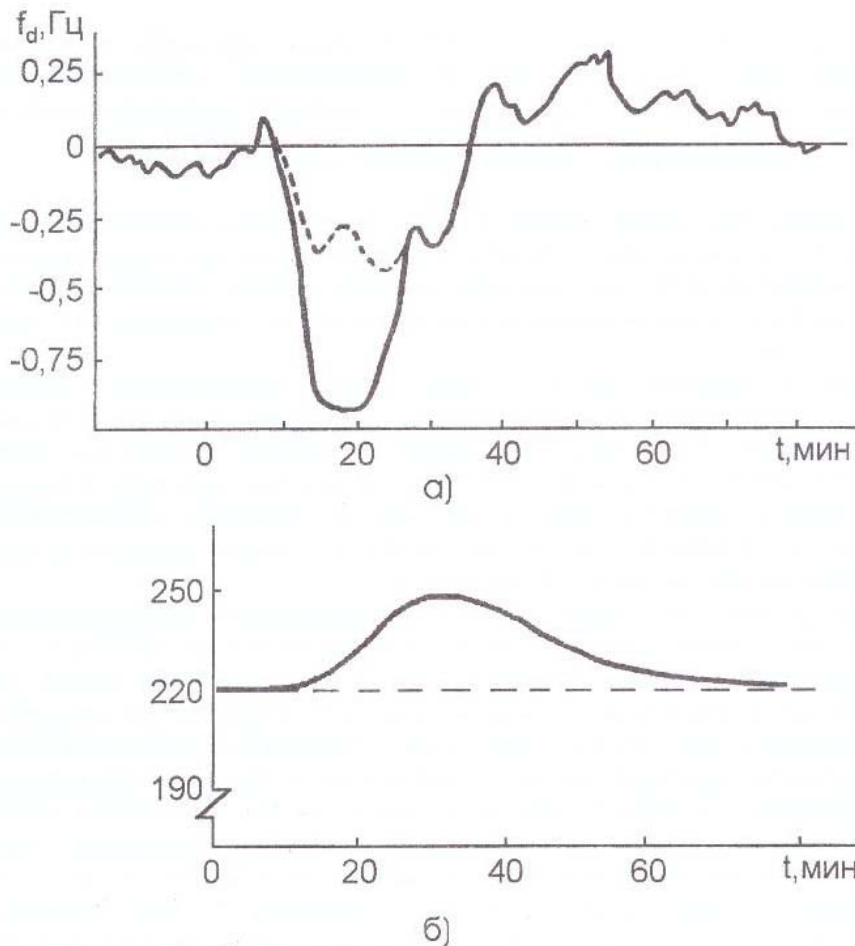


Рис. 10: Временные вариации доплеровского смещения частоты (а) и действующей высоты отражения волны (б) на вертикальной трассе ($f \approx 3,7$ МГц, $R \approx 150 - 200$ км) при развитии и релаксации ОПК, обусловленной инъекцией плазмогасящих веществ. Эксперимент проведен на полигоне Капустин Яр 18.09.1985.

распространения таких волновых возмущений $v \approx 10 - 300$ м/с. Продолжительность ΔT флуктуаций A или φ существенно зависит от источника; для большинства из них $\Delta T \approx 1$ час, а для молний – несколько секунд.

Километровые радиосигналы (30 – 300 кГц). Характер и величина вариаций подобны тем, что имели место в диапазоне частот 3 – 30 кГц: $\Delta\varphi \leq 0,5$ рад, $\Delta T \approx 1$ час, $T \approx 5 - 20$ мин. Флуктуации A выражены слабее и обычно не превосходят десятков процентов [9, 10].

Гектометровые радиосигналы (0,3 – 3 МГц). В исследованиях использовались как квазивертикальные трассы, так и наклонные с длиной $D \leq 1000$ км [9, 10, 13]. При возмущениях ионосферы наблюдались замирания сигналов, усиление многолучевости, появление сигналов станций синхронного вещания, сдвинутых в доплеровском спектре на 0,1 – 0,2 Гц, уширение доплеровских спектров. Квазипериодические вариации имели $T \approx 10 - 30$ мин и запаздывание, соответствующее скорости $v \approx 0,3$ км/с. Иногда наблюдались эффекты с $v \sim 10 - 30$ км/с.

Декаметровые радиосигналы (3 – 30 МГц). Для наблюдения использовались трассы различной ориентации и протяженностью $D \sim 100 - 3000$ км [9, 10, 13]. Обнаружены глубокие замирания уровня радиосигнала, развал доплеровских спектров, генерация или подавление волновых процессов с $T \approx 5 - 40$ мин. Наблюдались $v \sim 0,5 - 0,7$; 1; 2 – 3 и 10 – 30 км/с. Общая продолжительность эффектов около 1 – 2 часов.

Метровые и дециметровые радиосигналы (30 – 3000 МГц). В исследованиях применялись сигналы спутниковых радиомаяков [15, 16, 18]. Установлено, что возмущения сопровождаются резкими замираниями амплитуды сигналов, хаотическим поведением ионосферной составляющей приведенной

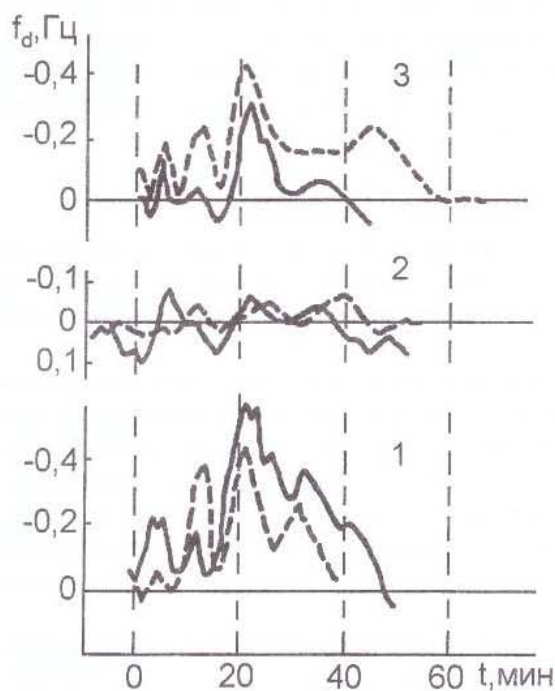


Рис. 11: Временные вариации доплеровского смещения частоты на вертикальной трассе ($f \approx 3,7$ МГц, $R \approx 50$ км) для различных стробов по дальности после инъекции плазмообразующего вещества на высоте около 150 км. Сплошная линия – 23.06.1986; штриховая линия – 18.10.1985; 1 – дальность 110–185 км; 2 – дальность 260 – 335 км; 3 – дальность 335 – 410 км. Эксперимент проведен на полигоне Капустин Яр.

доплеровской частоты $f_{дн}$.

Радиошумы. Возмущения в ионосфере часто сопровождаются вариациями уровня радиошумов в широком диапазоне частот (от ~ 1 кГц до ~ 1 ГГц) [8, 38 – 40]. Продолжительность вариаций от нескольких секунд до единиц, и даже десятков, минут. Механизмы генерации изучены недостаточно. Радиоизлучение с $f \sim 1 - 10$ кГц, видимо, является результатом взаимодействия волна-частица в магнитосфере, а более высокочастотное излучение обусловлено высыпанием энергичных частиц в атмосферу Земли. Кроме того, вариации уровня радиошумов (помех) могут быть вызваны изменением условий прохождения сигналов дальних радиостанций.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ВОЗМУЩЕНИЙ

Как показали экспериментальные исследования, возмущения в околоземной среде, вызванные воздействием источников энергетического выделения естественного и антропогенного происхождения, отличаются большим разнообразием. Источники оказывают газодинамическое, тепловое, химическое, электромагнитное и другие воздействия на среду. При этом возникают гидродинамические, геофизические, радиофизические, оптические и иные эффекты. Они заключаются в появлении движений в среде, волн плотности, генерации квазистатических электрических и магнитных полей, "низкочастотных" и "высокочастотных" электромагнитных волн и шумов, генерации неоднородной структуры с широким спектром размеров нерегулярностей, изменении скоростей химических реакций, высыпаний частиц из радиационного пояса и т. п. Поэтому задача их моделирования является сложной и многогранной. В полном объеме она не решена до сих пор.

Нами разрабатывались эмпирические и теоретические модели процессов и возмущений.

Эмпирические модели представляют собой совокупность пространственно-временных характеристик моделируемых процессов и их взаимных зависимостей (величина и знак отклонения, продолжительность, значение квазипериода, диапазон высот, скорость распространения возмущений, время их развития и релаксации и т. п.) [19, 20, 41 – 43].

Разработка теоретических моделей сводилась к формулировке исходных соотношений, описывающих источник и изучаемые процессы, и получение их решений. Как правило, отдавалось предпочтение простым, но адекватным моделям [44, 48, 49].

Моделированию подлежали как сами источники возмущений [46], так и первичные [44, 48], а также вторичные [46, 49] возмущения в околоземной среде. Разработаны аналитические и компьютерные модели, позволяющие рассчитать возмущение температур и концентрации частиц в среде, интенсивность неоднородной структуры, амплитуды генерируемых электромагнитных полей, потоки высыпающихся энергичных частиц и др. [45].

ВЫВОДЫ

1. Энергетические параметры источников искусственного происхождения сравнимы и даже превосходят соответствующие параметры естественных процессов. Поэтому локализованные источники часто становятся причиной крупномасштабных (100 – 1000 км) или глобальных (1000 – 10000 км) возмущений.

2. Литосфера, атмосфера, ионосфера и магнитосфера образуют единую открытую систему. Мощное воздействие на нее приводит к переносу энергии и вещества из одной подсистемы в другие, вызывая тем самым взаимодействие между ними. Кроме энергетического, воздействие может быть управляющим. В этом случае относительно слабое воздействие приводит к процессам со значительным энерговыделением, т. е. имеет место триггерный (спусковой) механизм высвобождения энергии. Примером такого процесса является высыпание частиц из радиационного пояса. Именно с таких позиций следует рассматривать взаимодействие различных областей околоземного пространства и формирование космической погоды.

3. Процессы переноса обусловлены генерацией и распространением волн различной природы (акустической, сейсмической, магнитогидродинамической и электромагнитной). Их скорости составляют около 0,1; 0,3 – 0,7; 1; 2 – 3; 6 – 8; 30 – 50 км/с и более.

4. В нижней ионосфере процессы чаще всего – аперриодические и обусловлены высыпанием частиц из радиационного пояса. Здесь также наблюдаются квазипериодические процессы с периодом около 5 мин и скоростью 0,1 – 0,3 км/с. В средней и внешней ионосфере обычно имеет место генерация (усиление) или подавление квазипериодических возмущений с периодом 10 – 40 мин и скоростью 0,1 – 0,7 км/с. На всех высотах ионосферы усиливается плазменная турбулентность.

5. Крупномасштабные и глобальные возмущения наблюдаются при энерговыделении в ионосфере, атмосфере и под Землей 10^7 – 10^8 , 10^{11} – 10^{12} и 10^{13} – 10^{14} Дж соответственно. Возможность их регистрации зависит также от чувствительности используемого метода.

6. Возмущения в околоземном пространстве существенно влияют на распространение радиосигналов с частотой 1 кГц – 1 ГГц. Наиболее характерными эффектами являются изменение глубины и частоты замираний уровня радиосигнала, а также флуктуации его фазы. Это обусловлено генерацией ионосферных неоднородностей различных масштабов.

7. Изучаемые возмущения обычно сопровождаются вариацией характеристик радишумов в широком диапазоне частот (1 кГц – 1 ГГц).

8. Получены основные элементы эмпирических моделей возмущений. Разработаны также элементы теоретических моделей соответствующих процессов.

Статья подготовлена при поддержке УНТЦ, проектное соглашение N 471.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гармаш К.П., Гоков А.М., Костров Л.С., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф., Федоренко Ю.П., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. // Вестник Харьковского университета. Радиофизика и электроника. 1998. N 405. С. 157 – 177.
2. Капанин И.И., Костров Л.С., Леус С.Г., Мисюра В.А., Пивень Л.А., Розуменко В.Т., Федоренко Ю.П., Черногор Л.Ф. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.1. Харьков. 1990. С. 56.
3. Мисюра В.А., Капанин И.И., Костров Л.С., Леус С.Г., Марков В.А., Мартыненко С.И., Пахомова О.В., Пивень Л.А., Поднос В.А., Похилько С.Н., Розуменко В.Т., Солодовников Г.К., Ткачев Г.Н., Толкачев А.А., Тырнов О.Ф., Федоренко Ю.П., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.2. Харьков. 1990. С. 151.
4. Гоков А.М., Гритчин А.И., Капанин И.И., Костров Л.С., Мартыненко С.И., Мисюра В.А., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф., Федоренко Ю.П., Цымбал А.М., Черногор Л.Ф. // XVII конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Секции 6,7,8. Ульяновск. 1993. С. 65.
5. Gritchin A.I., Dorohov V.L., Kapanin I.I., Karpachev A.I., Tyrnov O.F., Kostrov L.S., Leus S.G., Martynenko S.I., Mashtaler N.N., Milovanov Yu.B., Misyura V.A., Pakhomova O.V., Podnos V.A., Pokhilko S.N.,

- Protopor E.N., Rozumenko V.T., Somov V.G., Tsymbal A.M., Chernogor L.F., Chulakov S.G., Shemet A.S. // Физика космической плазмы: тр. междунар. семинара, Киев, 6 - 10 июня 1993 г. Киев. 1994. С. 161 - 170.
6. Tyrnov O.F., Garmash K.P., Gokov A.M., Gritchin A.I., Dorokhov V.L., Kontzevaya L.G., Kostrov L.S., Leus S.G., Martynenko S.I., Misyura V.A., Podnos V.A., Pokhil'ko S.N., Rozumenko V.T., Somov V.G., Tsymbal A.M., Chernogor L.F., Shemet A.S. // Turkish J. of Physics. 1994. Vol. 18. N 11. P. 1260 - 1265.
7. Rozumenko V.T., Kostrov L.S., Martynenko S.I., Misyura V.A., Tyrnov O.F., Tsymbal A.M., Chernogor L.F. // Turkish J. of Physics. 1994. Vol. 18. N 11. P. 1193 - 1198.
8. Губарев А.А., Леус С.Г., Мисюра В.А., Поднос В.А., Похилько С.Н., Черногор Л.Ф. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.1. Харьков. 1990. С. 224.
9. Гармаш К.П., Леус С.Г., Похилько С.Н., Ткачук А.А., Черногор Л.Ф. // Докл. IV науч.-техн. конф. "Метрология в дальнометрии", Харьков. 1992. ГНПО "Метрология". 1993. С. 71 - 75.
10. Chernogor L.F., Garmash K.P., Leus S.G., Pakhomova O.V., Pokhil'ko S.N., Sorokolet Yu.Ye. // Intern. Conf. "Physics in Ukraine", Kiev, 22 - 27 June 1993. Proc. Contributed Papers. Plasma Physics. Kiev. 1993. P. 58 - 61.
11. Гармаш К.П., Гритчин А.И., Леус С.Г., Пахомова О.В., Похилько С.Н., Черногор Л.Ф. // Физика космической плазмы: труды международного семинара, Киев, 6 - 10 июня 1993 г. Киев. 1994. С. 151 - 160.
12. Пахомова О.В., Черногор Л.Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71 - 74.
13. Леус С.Г., Похилько С.Н., Черногор Л.Ф. // XVII конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Секция 9. Ульяновск. 1993. С. 63.
14. Мисюра В.А., Пивень Л.А., Розуменко В.Т., Ткачев Г.Н. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.1. Харьков. 1990. С. 129.
15. Мисюра В.А., Корнис В.Ф., Саенко Ю.С., Федоренко В.Н., Федоренко Ю.П., Шагимурагов И.И. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.2. Харьков. 1990. С. 167.
16. Tyrnov O.F., Zakharov I.G., Misyura V.A., Pushin V.F., Fedorenko Yu.P., Tsymbal A.M., Chmyga T.V. // Turkish J. of Physics. 1994. Vol.18. N 11. P. 1254 - 1259.
17. Мисюра В.А., Пахомова О.В., Пивень Л.А., Черногор Л.Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. N 4. С. 677 - 679.
18. Федоренко В.Н., Федоренко Ю.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. N 1. С. 161 - 164.
19. Мисюра В.А., Пахомова О.В., Черногор Л.Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72 - 75.
20. Пахомова О.В., Черногор Л.Ф. // XVII конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Секции 6, 7, 8. Ульяновск. 1993. С. 66.
21. Пахомова О.В., Черногор Л.Ф. // Междунар. симпозиум "Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики". Томск. 1996. Сибирский физ.-тех. институт. 1996. С. 101 - 102.
22. Леус С.Г., Похилько С.Н., Черногор Л.Ф. // Междунар. симпозиум "Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики". Томск. 1996. Сибирский физ.-тех. институт. 1996. С. 87 - 88.
23. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф., Шварцбург А.Б. // Компьютерная оптика. 1989. N 6. С. 62 - 71.
24. Черногор Л.Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. N 3. С. 513 - 515.
25. Костров Л.С., Черногор Л.Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. N 1. С. 159 - 161.
26. Гармаш К.П., Гритчин А.И., Черногор Л.Ф. // XVII конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Секции 6,7,8. Ульяновск. 1993. С. 18.
27. Chernogor L.F., Garmash K.P., Leus S.G., Pakhomova O.V., Pokhil'ko S.N., Sorokolet Yu.Ye. // Intern. conf. "Physics in Ukraine", Kiev, 22-27 June 1993. Proc. Contributed Papers. Plasma Physics. Kiev. 1993. P. 62 - 65.
28. Гармаш К.П., Леус С.Г., Пахомова О.В., Похилько С.Н., Сороколет Ю.Е., Черногор Л.Ф. // Физика космической плазмы: труды международного семинара, Киев, 6 - 10 июня 1993 г. Киев. 1994. С. 182 - 191.
29. Chernogor L.F., Garmash K.P. // Abstracts 8-th Sci Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia (IAGA 97, Uppsala). IAGA 97 Abstract Book. 1997. P. 346.
30. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. N 6. С. 17 - 40.
31. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1. N 1. С. 90 - 110.
32. Мисюра В.А., Костров Л.С., Федоренко В.Н., Федоренко Ю.П. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.1. Харьков. 1990. С. 247.
33. Дорохов В.Л., Каширин А.И., Мартыненко С.И., Махота С.В., Мисюра В.А., Новохатский И.П., Ополонин А.Д., Пивень Л.А., Пушин В.Ф., Сомов В.Г., Хрюкин В.Г., Шемет А.С. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.1. Харьков, 1990. С. 248.
34. Dorokhov V.L., Kostrov L.S., Martynenko S.I., Misyura V.A., Pushin V.F., Somov V.G., Tyrnov O.F., Tsymbal A.M., Shemet A.S. // Intern. conf. "Physics in Ukraine", Kiev, 22 - 27 June 1993. Proc. Contributed Papers. Plasma Physics. Kiev. 1993. P. 83 - 85.
35. Karanin I.I., Kostrov L.S., Martynenko S.I., Misyura V.A., Rozumenko V.T., Tyrnov O.F., Fedorenko Yu.P.,

- Tsymbal A.M., Chernogor L.F. // Intern. conf. "Physics in Ukraine", Kiev, 22 – 27 June 1993. Proc. Contributed Papers. Plasma Physics. Kiev. 1993. P. 126 – 129.
36. Черногор Л.Ф. // Докл. IV науч.-техн. конф. "Метрология в дальнометрии", Харьков, 1992. ГНПО "Метрология". 1993. С. 76 – 81.
37. Черногор Л.Ф. // Докл. IV науч.-техн. конф. "Метрология в дальнометрии", Харьков, 1992. ГНПО "Метрология". 1993. С. 12 – 17.
38. Капанин И.И., Кириллов И.А., Марков В.А., Мизер Э.Г., Мисюра В.А., Пивень Л.А., Розуменко В.Т., Соломин В.Б., Толкачев А.А. // XVI Всес. конф. по распротр. радиоволн. Тез. докл. Ч.1. Харьков. 1990. С. 71.
39. Леус С.Г., Похилько С.Н., Черногор Л.Ф. // Междунар. симпозиум "Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно- земной физики", Томск, 1996. Сибирский физ.-тех. институт. 1996. С. 88 – 89.
40. Капанин И.И., Карпачев А.И., Розуменко В.Т. // Междунар. симпозиум "Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно- земной физики", Томск, 1996. Сибирский физ.-тех. институт. 1996. С. 66 – 67.
41. Черногор Л.Ф. // Всес. конф. по нетрадиционным идеям о природе и ее явлениях. Сб. докл. Т. 2. Гомель. 1990. С. 86 – 94.
42. Пахомова О.В., Черногор Л.Ф. // Докл. IV науч.-техн. конф. "Метрология в дальнометрии", Харьков, 1992. ГНПО "Метрология". 1993. С. 82 – 87.
43. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36. N 2. С. 75 – 81.
44. Мартыненко С.И., Черногор Л.Ф. // В кн.: Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. Киев. 1984. С. 163 – 176.
45. Черногор Л.Ф. // Изв. высш. учебн. зав. Радиофизика. 1985. Т. 28. N 1. С. 17 – 26.
46. Черногор Л.Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 1997. Т. 2. N 4. С. 463 – 472.
47. Черногор Л.Ф. // Космічна наука і технологія. 1998. Т. 4. N 2. С. 1 – 10.
48. Garmash K.P. // Conf. proc. 1998 Internat. Conf. on Mathem. methods in Electromagnetic Theory. 1998. Vol. 1. P. 349 – 351.
49. Chernogor L.F. // Abstracts 8-th Sci Assembly of IAGA with ICMA and STP Symposia (IAGA 97, Uppsala). IAGA 97 Abstract Book. 1997. P. 346.