

УДК 550.388,533.951,523.868

ОСОБЕННОСТИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ИНДУЦИРУЕМЫХ В ИОНОСФЕРЕ МОЩНЫМ ДЕКАМЕТРОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ВО ВРЕМЯ УМЕРЕННЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2021 г. Л. Ф. Черногор^{1, *}, В. Л. Фролов^{2, 3, **}

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
г. Харьков, Украина

²Научно-исследовательский радиофизический институт
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (НИРФИ ННГУ),
г. Нижний Новгород, Россия

³Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ),
г. Казань, Россия

*e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

**e-mail: frolov@nirfi.unn.ru

Поступила в редакцию 07.06.2020 г.

После доработки 06.10.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований аperiodических и квазипериодических возмущений в ионосфере, наблюдавшихся при воздействии мощным радиоизлучением стенда СУРА на ионосферную плазму в спокойных и магнитно-возмущенных условиях. Для диагностики использовался доплеровский радар вертикального зондирования, расположенный на расстоянии ~960 км от нагревного стенда. Регистрируемые аperiodические возмущения, имевшие время запаздывания ~25 мин, скорее всего, связаны с генерацией ударно-волнового возмущения, относящегося к атмосферно-гравитационным волнам. Квазипериодические 12–15-минутные возмущения имели период, равный периоду цикла нагрева. В других случаях период возмущений равнялся периоду собственных колебаний воздуха в атмосфере. Скорость квазипериодических возмущений составляла 300–400 м/с. Обнаружены эффекты искусственной генерации плазменной турбулентности, совместного действия солнечного терминатора и мощного радиоизлучения, а также резонансные эффекты, связанные с воздействием на ионосферу радиоволной с частотой, равной четвертой гармонике гирочастоты электронов. Отмечается роль магнитной активности в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, которая определила характер возмущений в ионосфере.

DOI: 10.31857/S0016794021040039

1. ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействию мощного радиоизлучения с околосферной плазмой традиционно уделяется много внимания [Гуревич и Шварцбург, 1973; Gurevich, 1978, 1999; Гершман и др., 1984; Молчанов, 1985; Митяков и др. 1989; Гуревич и др., 2005; Беликович и др., 2007; Гуревич, 2007; Черногор, 2014; Фролов, 2015, 2017; Streltsov et al., 2018]. При этом детально исследуется большое количество физических эффектов, возникающих в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда.

Воздействие мощным радиоизлучением на ионосферную плазму также является удобным инструментом для исследования взаимодействия подсистем в системе Земля–атмосфера–ионо-

сфера–магнитосфера, генерации и распространения возмущений далеко за пределы диаграммы направленности излучающей антенны [Гармаш и Черногор, 1998; Черногор, 2014]. Действительно, нагрев электронов под действием периодического радиоизлучения приводит к слабому нагреву ионов и нейтралов на высотах, больших 300–400 км, генерации акустико-гравитационных волн в нейтральной атмосфере, модуляции этими волнами концентрации электронов и распространению примерно на 1–2 тыс. км перемещающихся ионосферных возмущений [Бурмака и др., 2009; Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Mishin et al., 2012; Черногор, 2013]. Так проявляется взаимодействие подсистем ионосфера–магнитосфера–атмосфера–ионосфера. Но возмущения могут распространяться не толь-

ко в горизонтальном, но и в вертикальном направлениях. К последним относятся, например, потоки тепла и плазмы вдоль магнитных силовых линий, а также определенные типы волновых возмущений, достигающие высот 800 км, а, возможно, и больших [Васьков и др., 1992, 1995]. Особый интерес представляет возможность генерации квазипостоянных вариаций геоэлектрического и геомагнитного полей, а также достаточно низкочастотных электромагнитных волн, проникающих в магнитосферу и способных вызвать высыпание высокоэнергичных электронов из радиационного пояса и, как следствие этого — дополнительную ионизацию атмосферы [Гармаш и Черногор, 1998; Черногор и Фролов, 2013б; Черногор и др., 2014; Черногор, 2014; Фролов и др., 2019]. Так может реализовываться взаимодействие подсистем по схеме с обратной связью: ионосфера—магнитосфера—радиационный пояс—атмосфера—ионосфера [Черногор и Фролов, 2013б; Черногор и др., 2014; Черногор, 2014].

Взаимодействие подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера носит сложный характер и в настоящее время изучено еще недостаточно полно как в экспериментальном, так и в теоретическом плане. Требуется постановка целенаправленных экспериментов, и вместе с этим — поиск оптимальных режимов излучения нагревных стенов. Особый интерес представляет изучение взаимодействия подсистем в средних широтах, где в естественных условиях оно не так явно выражено, как в высоких широтах.

Усиление взаимодействия подсистем в средних широтах можно ожидать в течении слабых и умеренных магнитных бурь, когда система Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера “активируется”, становится метастабильной и ее легче перевести в нестабильное состояние, воздействуя относительно слабыми потоками мощного радиоизлучения [Черногор и Фролов, 2013б; Черногор и др., 2014; Черногор, 2014]. Как известно, в период геокосмических бурь на порядок увеличивается электрическое поле ионосферно-магнитосферного происхождения (в средних широтах от 0.1–0.3 до 1–5 мВ/м), в радиационном поясе накапливаются высокоэнергичные (с энергией порядка 1–100 кэВ) электроны, которые затем высыпаются в ионосферу на протяжении последующих 10–15 сут, поддерживая ее возмущенное состояние (см., например, [Buonsanto, 1999; Соколов, 2011; Черногор и Домнин, 2014]).

Настоящая измерительная кампания преследовала следующие цели:

1. Изучение влияния умеренных магнитных бурь на взаимодействие мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой, способное вызвать крупномасштабные возмущения в ионосфере.

2. Подтвердить эффект генерации крупномасштабных возмущений с периодом, равным периоду циклов нагрева.

3. Изучить возможности генерации или усиления квазипериодических возмущений с периодом, не равным периоду цикла излучения нагревного стенов.

4. Выявить аperiodическую реакцию ионосферы на включение радиоизлучения в режиме моноимпульсов.

5. Изучить эффект генерации (усиления) плазменной турбулентности под действием мощного радиоизлучения.

6. Выявить крупномасштабные эффекты при излучении мощной радиоволны вблизи четвертой гармоники гирочастоты электронов.

7. Оценить зависимость эффективности генерации крупномасштабных возмущений от мощности стенов.

8. Изучить совместное действие солнечного терминатора и мощного радиоизлучения на эффективность генерации крупномасштабных возмущений в ионосфере.

Достижение перечисленных выше целей оказалось возможным в измерительной кампании, проведенной 20–28 августа 2013 г. на среднеширотном стенов СУРА, когда воздействие на ионосферу осуществлялось в различных режимах излучения волны накачки на фоне развивающихся в это время трех умеренных геомагнитных бурь.

Целью настоящей работы является анализ результатов измерений крупномасштабных аperiodических и квазипериодических возмущений в *F*-области ионосферы, сопровождавших воздействие мощным радиоизлучением на околоземную плазму во время умеренных геомагнитных бурь, обсуждение эффектов искусственной генерации плазменной турбулентности, совместного действия солнечного терминатора и мощного радиоизлучения, а также эффектов, связанных с воздействием на ионосферу радиоволной с частотой, равной четвертой гармонике гирочастоты электронов. Отмечается подготовительная роль магнитной активности в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера, определившей характер возмущений в ионосфере.

Основные закономерности квазипериодических возмущений, возбуждаемых на ионосферных высотах, описаны ранее в работах [Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Черногор, 2014], возможность возникновения крупномасштабных аperiodических возмущений в нижних слоях ионосферы рассматривалась в работах [Черногор и Фролов, 2013б; Черногор и др., 2014; Черногор, 2014].

Таблица 1. Параметры магнитных бурь

Параметр	21 августа 2013 г.	23–25 августа 2013 г.	27 августа 2013 г.
Dst_{\min} , нТл	–45	–70	–110
p_{sw} , нПа	2.5	2.7	4.4
Dst_{\min}^* , нТл	–53	–76	–123
E , Дж	2×10^{15}	3×10^{15}	5×10^{15}
Δt , час	3.5	6	4
P , Вт	1.6×10^{11}	1.4×10^{11}	3.5×10^{11}

2. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

2.1. Общие сведения

20, 21 и 27 августа 2013 г. имело место резкое увеличение примерно на порядок концентрации частиц n_{sw} в солнечном ветре продолжительностью ~ 10 ч. Вариации температуры T_{sw} этих частиц достигали 3×10^5 К. Увеличение n_{sw} и T_{sw} привело к всплескам давления частиц в солнечном ветре, а также к увеличению мощности ϵ_A , внедряемой в магнитосферу Земли, и росту индексов AE , Kp и Dst , характеризующих уровень геомагнитной активности.

Первая магнитная буря началась около 12:00 UT 20 августа 2013 г. Ее развитие продолжалось до 02:00 UT 21 августа 2013 г. В интервале времени 02:00–05:00 UT имела место главная фаза бури, для которой $Bz_{\min} \approx -9$ нТл, $\epsilon_{A\max} \approx 10$ ГДж/с, $AE_{\max} \approx 600$ нТл, $Kp = 4+$, $Dst_{\min} = -45$ нТл. Далее регистрировалась фаза восстановления магнитной бури.

Главная фаза следующей магнитной бури наблюдалась в интервале с 18:00 UT 22 августа 2013 г. до 03:00 UT 23 августа 2013 г. При этом $Bz_{\min} \approx -5$ нТл, $\epsilon_{A\max} \approx 5$ ГДж/с, $AE_{\max} \approx 750$ нТл, $Kp_{\max} = 4+$, $Dst_{\min} = -70$ нТл. Фаза восстановления бури продолжалась до середины суток 26 августа 2013 г.

Главная фаза третьей магнитной бури началась в 16:00 UT и закончилась в 20:00 UT 27 августа 2013 г. Для этой бури $Bz_{\min} \approx -10$ нТл, $\epsilon_{A\max} \approx 10$ ГДж/с, $AE_{\max} \approx 920$ нТл, $Kp_{\max} = 5$, $Dst_{\min} = -110$ нТл. Фаза восстановления бури продолжалась до 09:00 UT 29 августа 2013 г.

2.2. Энергетика магнитных бурь

Энергию магнитных бурь можно оценить по приведенному в работах [Gonzalez, 1994; Черногор и Домнин, 2014] соотношению:

$$E_{st} = \frac{3}{2} E_m \frac{|Dst_{\min}^*|}{B_0},$$

где $E_m = 8 \times 10^{17}$ Дж – энергия дипольного магнитного поля Земли, $B_0 \approx 3 \times 10^{-5}$ Тл – значение индукции геомагнитного поля на экваторе. Скорректированное значение Dst_{\min}^* определялось как:

$$Dst_{\min}^* = Dst_{\max} - bp_{sw}^{1/2} + c.$$

Здесь $b = 5 \times 10^5$ нТл/Па^{1/2}, $c = 20$ нТл, p_{sw} – давление солнечного ветра в Па. При продолжительности главной фазы магнитной бури ΔT ее мощность дается очевидным соотношением:

$$P = \frac{E_{st}}{\Delta T}.$$

Основные параметры, описывающие энергетику магнитных бурь, приведены в табл. 1, из которой видно, что энергия всех бурь была порядка 10^{15} Дж, а их мощность – 10^{11} Вт. Такие бури, согласно классификации [Черногор и Домнин, 2014], относятся к умеренным. Они способны привести подсистемы в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера в метастабильное состояние, ионосфера при этом еще несильно возмущается. Все это создает благоприятные условия для оказания влияния на взаимодействие между подсистемами путем нагрева ионосферы мощным радиоизлучением.

3. СРЕДСТВА, МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

3.1. Нагревный стенд СУРА

Стенд СУРА расположен в 100 км восточнее г. Нижний Новгород, его географические координаты: 56°09' N, 46°06' E. Во время рассматриваемых в работе экспериментов три или, в отдельных случаях, два модуля стенда работали синфазно. При этом максимальная эффективная мощность PG излучения волны накачки изменялась в пределах 40–110 МВт. Во всех экспериментах диаграмма направленности антенны стенда была наклонена к югу на 12°. Использование в измерениях волн обыкновенной поляризации приводило к усилению генерации искусственных ионосфер-

ных возмущений за счет эффекта “магнитного зенита”, когда радиоволна с учетом ее рефракции в ионосфере распространяется вдоль силовых линий геомагнитного поля на уровне верхнего гибридного резонанса, что вызывает усиление ее взаимодействия с плазмой и приводит к более эффективному нагреву [Гуревич и др., 2005].

Конкретные режимы излучения волны накачки приведены ниже для каждого анализируемого в работе случая.

3.2. Доплеровский радар

Радар вертикального зондирования использовался для регистрации ионосферных возмущений, вызванных нагревом ионосферы мощным радиоизлучением стенда СУРА, находящимся на расстоянии 960 км от радара.

Радар расположен вблизи г. Харьков (Украина) на территории Радиофизической обс. Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, ее координаты: 49°38' N, 36°20' E. Основные параметры радара: диапазон частот $f = 1\text{--}24$ МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность зондирующего импульса – 500 мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления $G \approx 1\text{--}10$ в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха для обыкновенной волны q в ночное время может достигать $10^5\text{--}10^6$. В дневное время q обычно на 1–2 порядка меньше. Погрешность оценки доплеровского смещения частоты f_d около 17 мГц. Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку отраженного от ионосферы сигнала в реальном времени.

Во время экспериментов измерения выполнялись на частотах зондирования 3200 и 4200 кГц. Радиоволна на частоте 3200 кГц часто экранировалась слоем E_s , поэтому в работе проиллюстрированы и более детально представлены результаты измерений для радиоволны с $f = 4200$ кГц.

Высотная протяженность отраженного зондирующего сигнала близка к 150 км. Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью $\Delta z' = 75$ км в диапазоне действующих высот $z' = 75\text{--}450$ км, которому соответствует диапазон истинных высот 75–250 км, а дискретность отсчетов высоты $\Delta z \approx 30\text{--}35$ км. При этом выделяется основной канал, в котором амплитуда сигнала имеет максимальные значения.

3.3. Методы обработки данных

Первичная обработка. Комплексная амплитуда биений колебаний опорного генератора и отраженного сигнала записывалась в цифровом виде (частота опроса 10 Гц) на носитель информации, затем при помощи преобразования Фурье вычислялись доплеровские спектры в диапазоне возможных доплеровских сдвигов от -2.5 до $+2.5$ Гц на интервале времени 60 с.

Вторичная обработка. Анализ динамических спектров показал, что сигнал, как правило, имел одномодовую структуру, и эта мода соответствовала обыкновенной волне. Одномодовая структура сигнала позволила получить временные зависимости вариации доплеровского смещения частоты $f_d(t)$, которые далее подвергались системному спектральному анализу, использующему взаимодополняющие оконные преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование с базисной функцией Морле.

При анализе полученных данных в качестве дополнительной информации привлекались временные зависимости нормированной амплитуды отраженного сигнала, а также данные расположенного рядом цифрового ионозонда.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

4.1. Временные вариации доплеровских спектров 21 августа 2013 г.

В этот день режим излучения нагревного стенда был следующим. С 07:00 и до 07:50 UT стенд работал в циклическом режиме [5 мин излучения, 5 мин пауза] (далее используется обозначение [+5 мин, –5 мин]) на частоте $f = 4785$ кГц с эффективной мощностью $PG = 80$ МВт. В интервале времени 08:15–13:30 UT при подобных f и PG использовался режим [+15 мин, –15 мин]. С 14:00–14:20 UT волна накачки излучалась в режиме, [+1 мин, –1 мин] с $f = 5828$ кГц и $PG = 110$ МВт. Далее режим излучения волны накачки был следующим: с 14:20 и до 15:50 UT [+15 мин, –15 мин], с 15:55 и до 16:08 UT [непрерывно], с 16:08–16:20 UT, с 16:40 и до 17:00 UT, с 18:40 и до 19:00 UT [+1 мин, –1 мин] и в интервале времени 17:00–18:35 UT [+5 мин, –5 мин] при неизменной частоте и эффективной мощности излучения. С 19:40 и до 21:55 UT стенд излучал на частоте $f = 4300$ кГц с $PG = 70$ МВт в режиме [+15 мин, –15 мин]. На рисунках 1–7 интервалы времени, когда работал стенд СУРА, выделены затемненными участками.

Ниже для описания наблюдаемых эффектов будут использоваться следующие обозначения: Δt – время запаздывания появления возмущений относительно времени начала излучения волны накачки; ΔT – длительность цуга наблюдаемых возмущений; T – их период; f_d – доплеровское

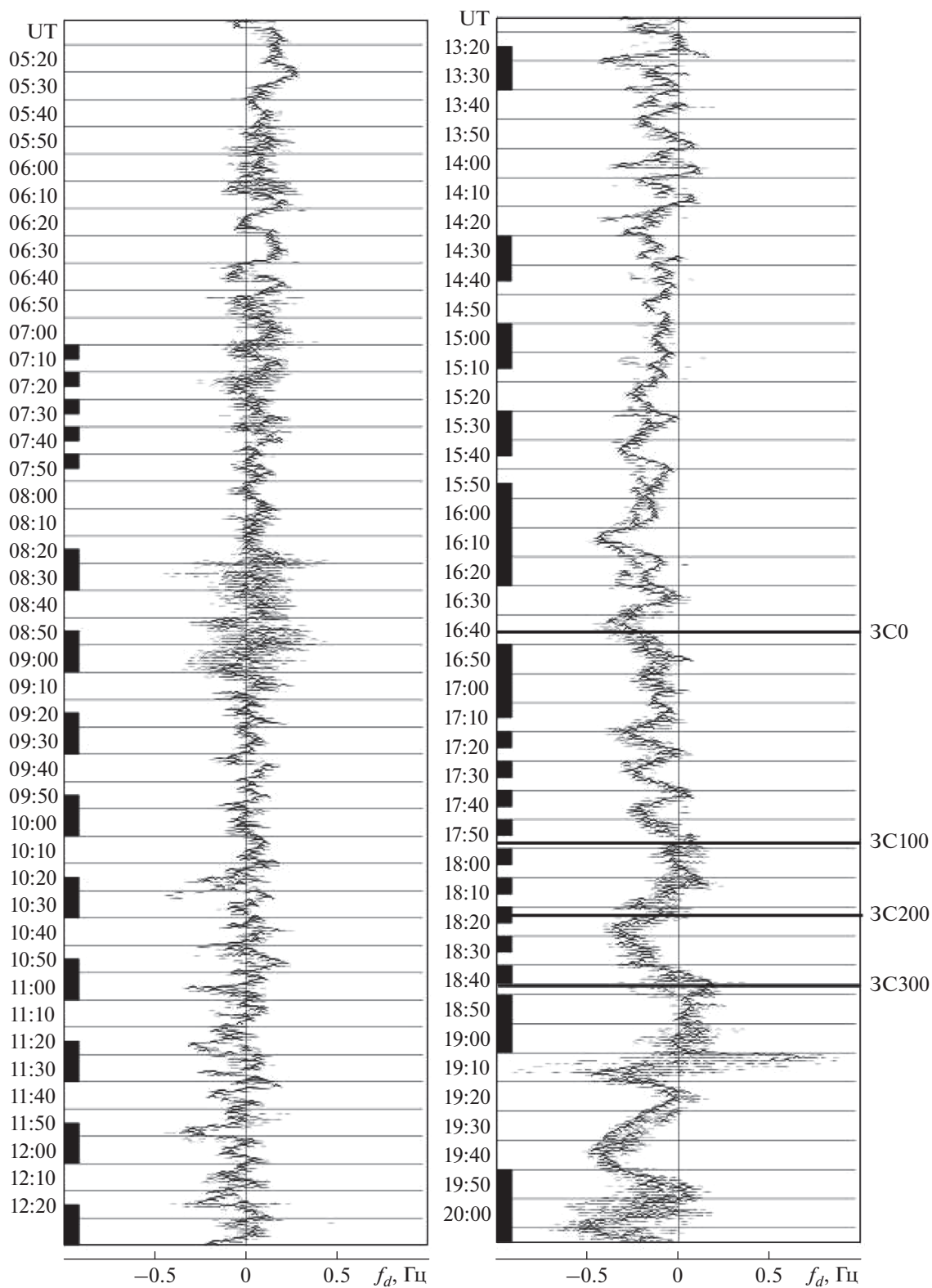


Рис. 1. Временные вариации доплеровских спектров 21 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км. Здесь и далее горизонтальными линиями отмечены моменты захода Солнца на высотах 0, 100, 200 и 300 км. Затемненными вертикальными линиями показаны интервалы времени излучения станда Сура.

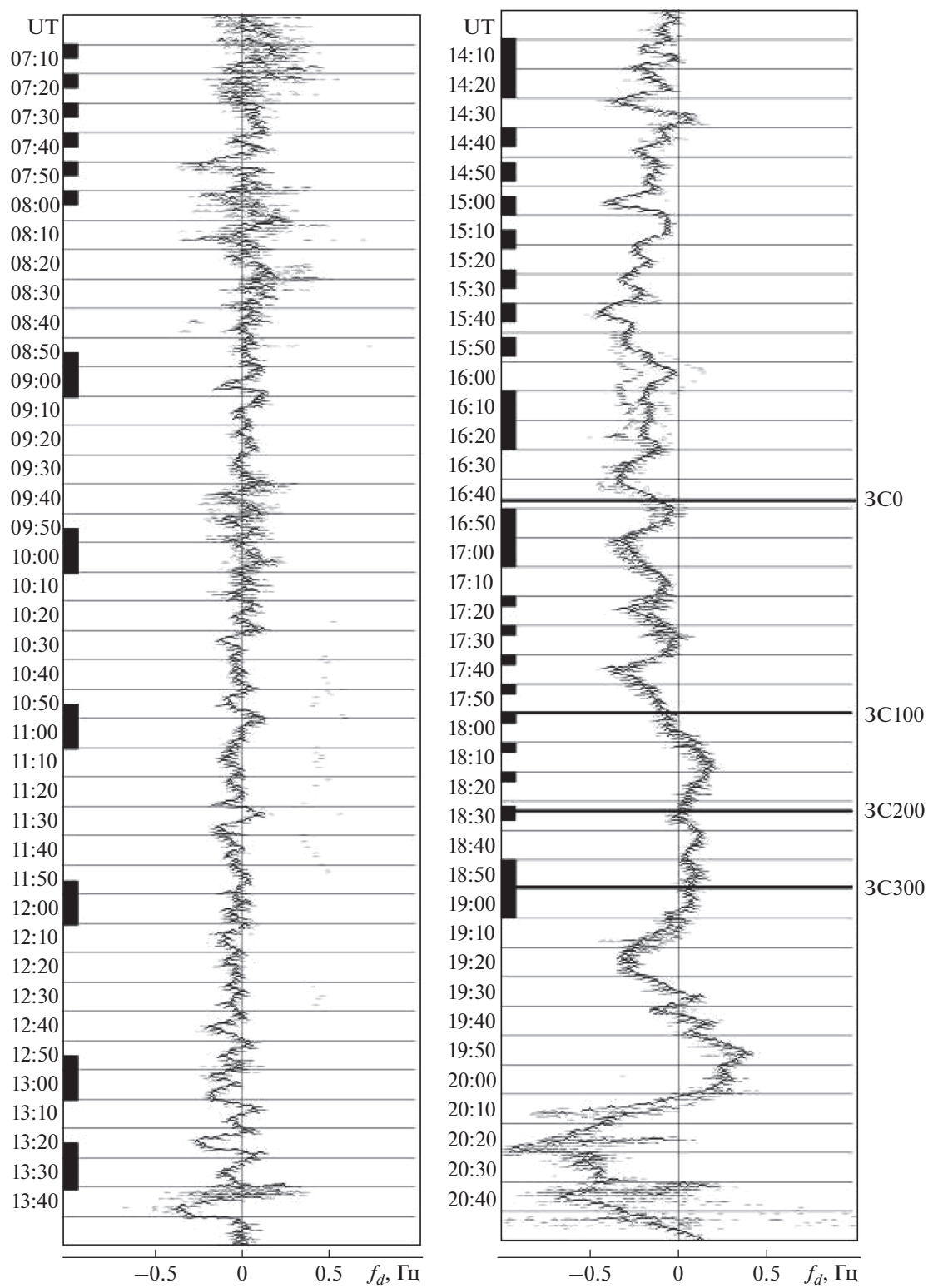


Рис. 2. Временные вариации доплеровских спектров 22 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км.

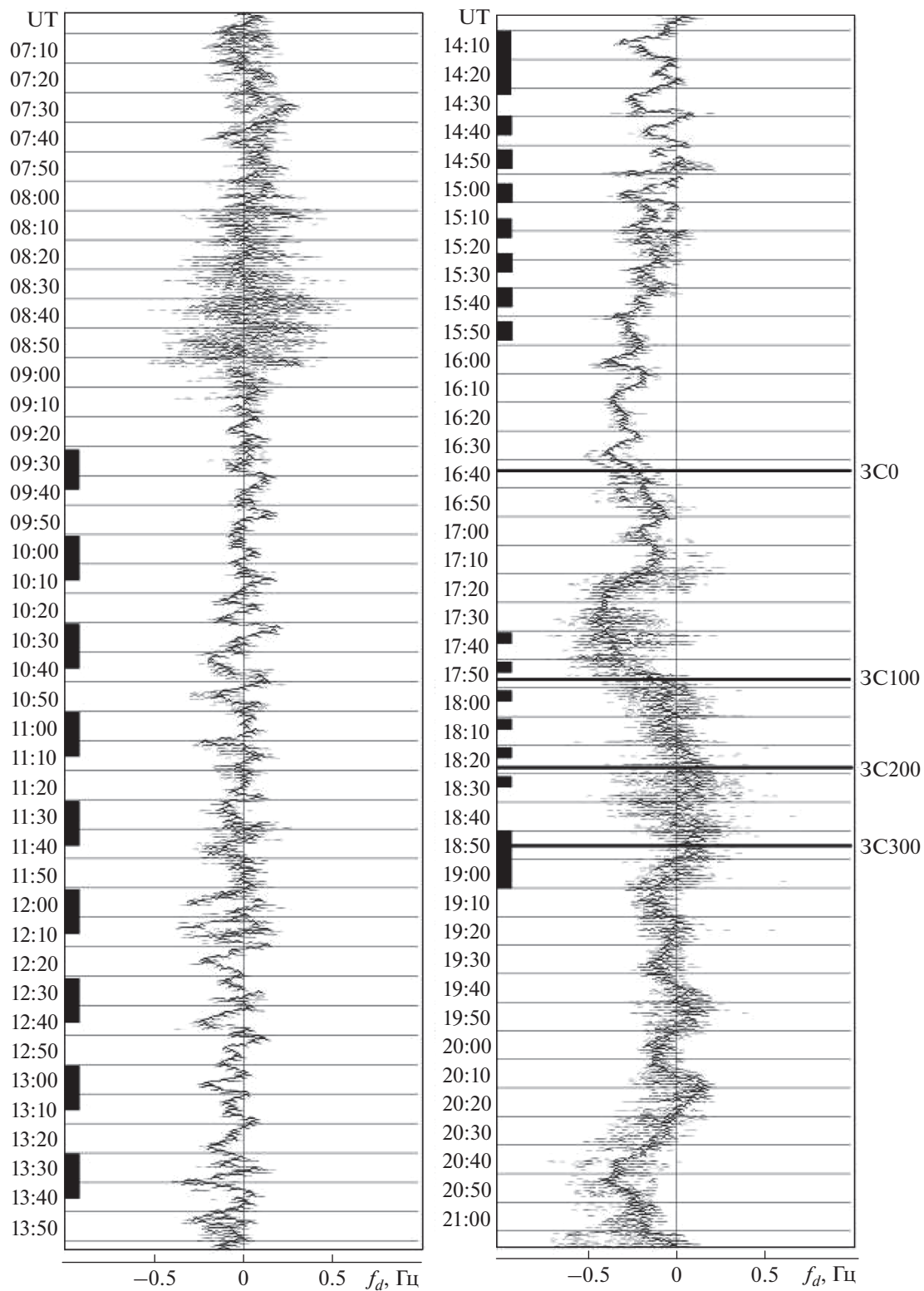


Рис. 3. Временные вариации доплеровских спектров 23 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км.

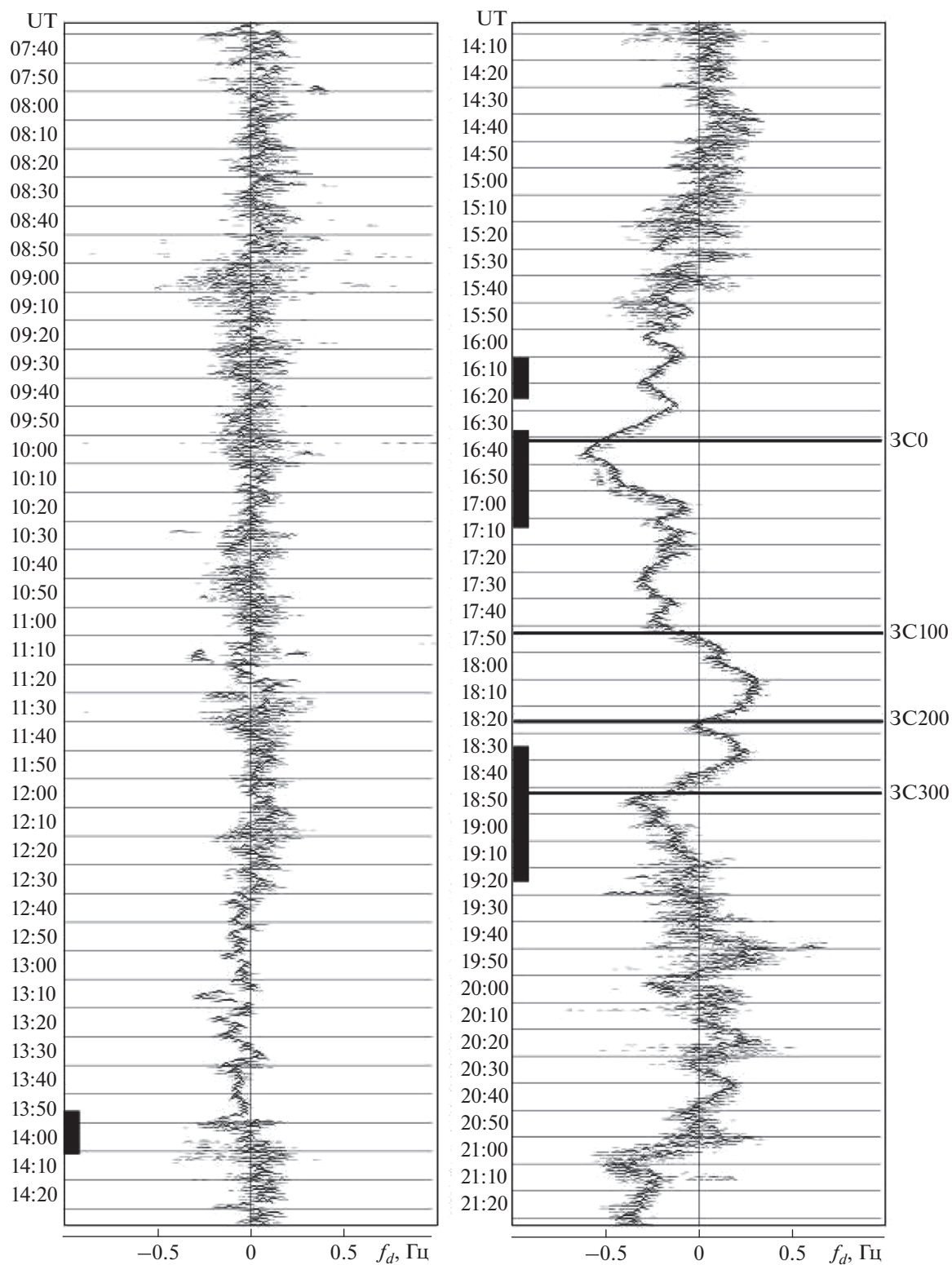


Рис. 4. Временные вариации доплеровских спектров 25 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км.

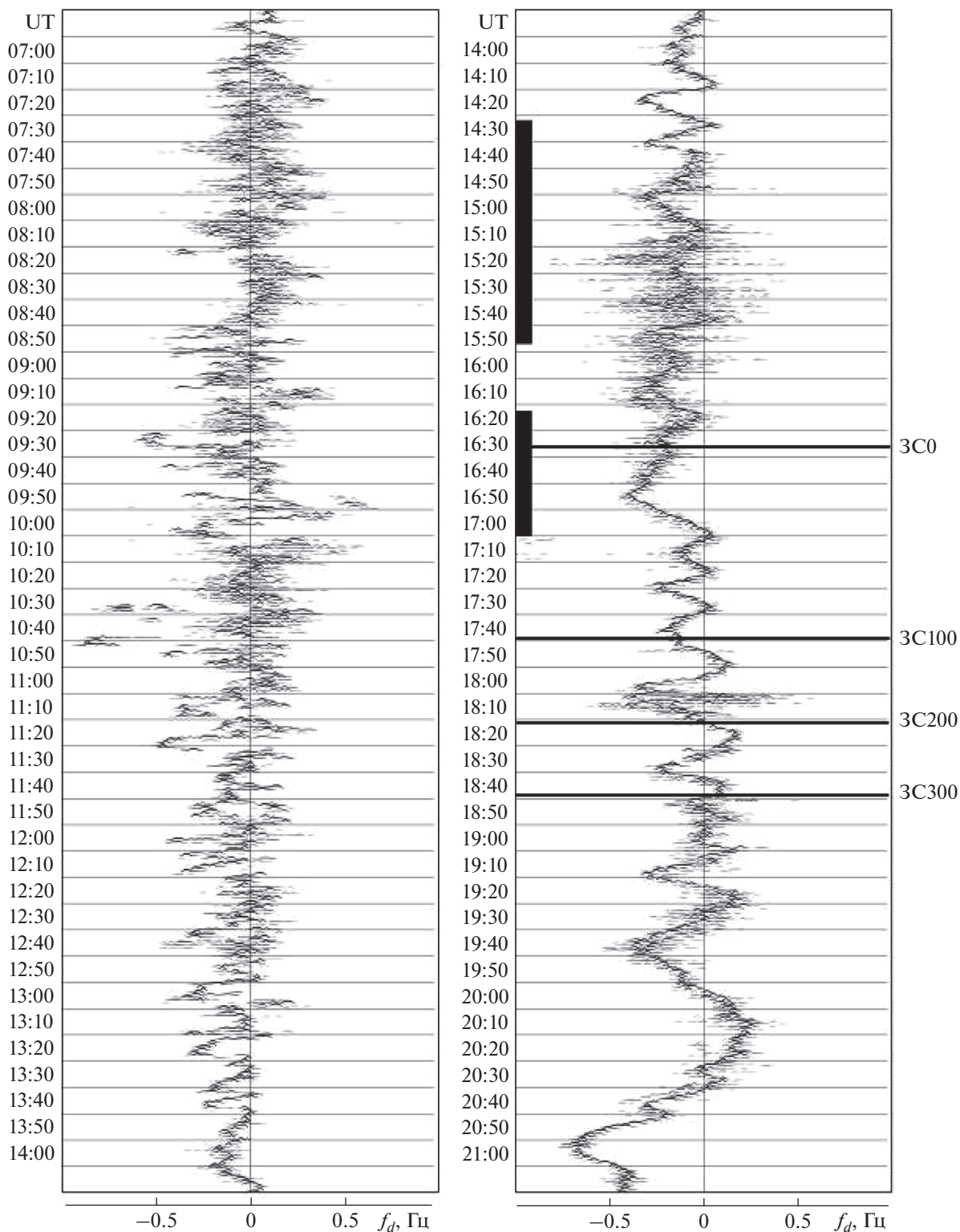


Рис. 5. Временные вариации доплеровских спектров 26 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км.

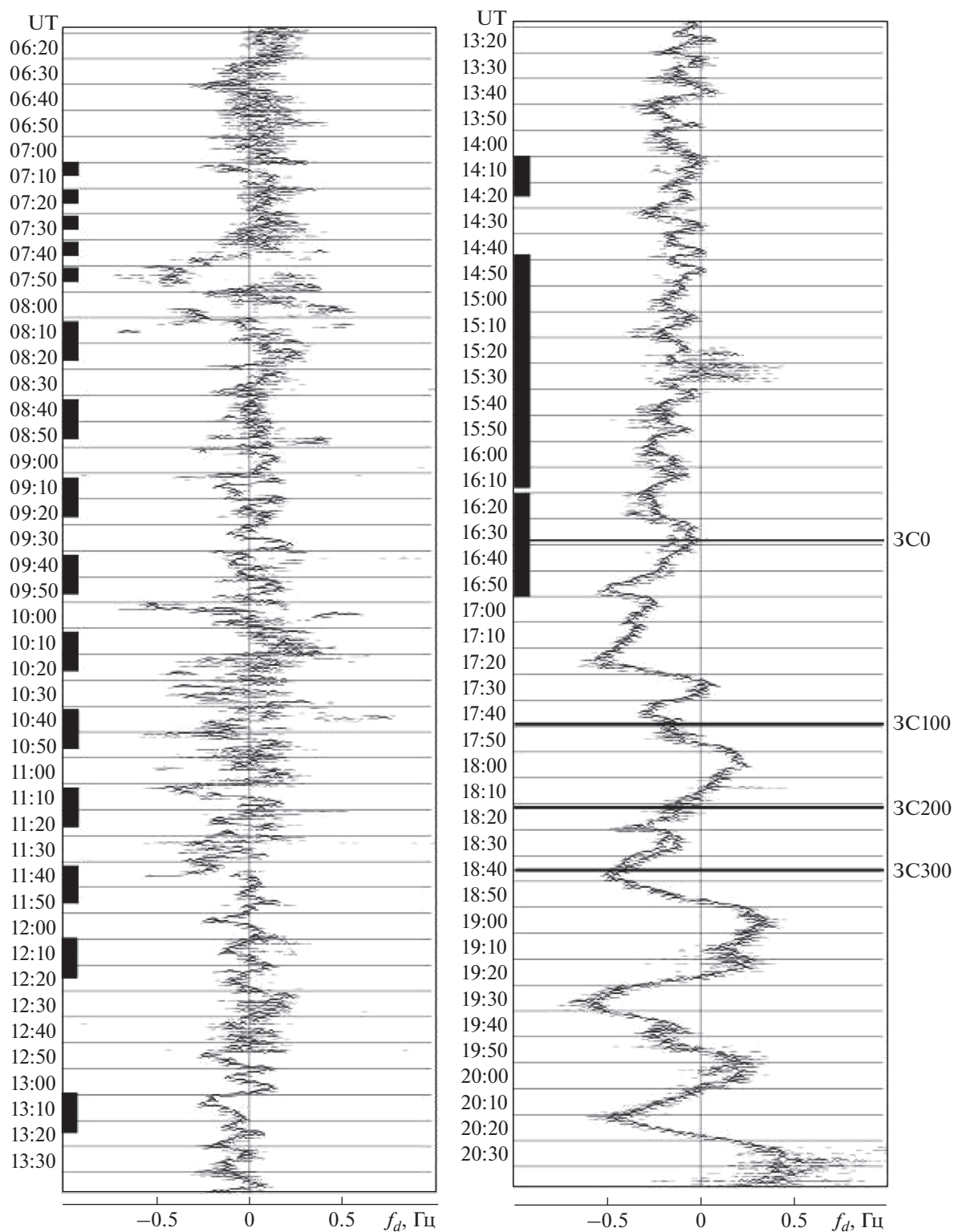


Рис. 6. Временные вариации доплеровских спектров 27 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км.

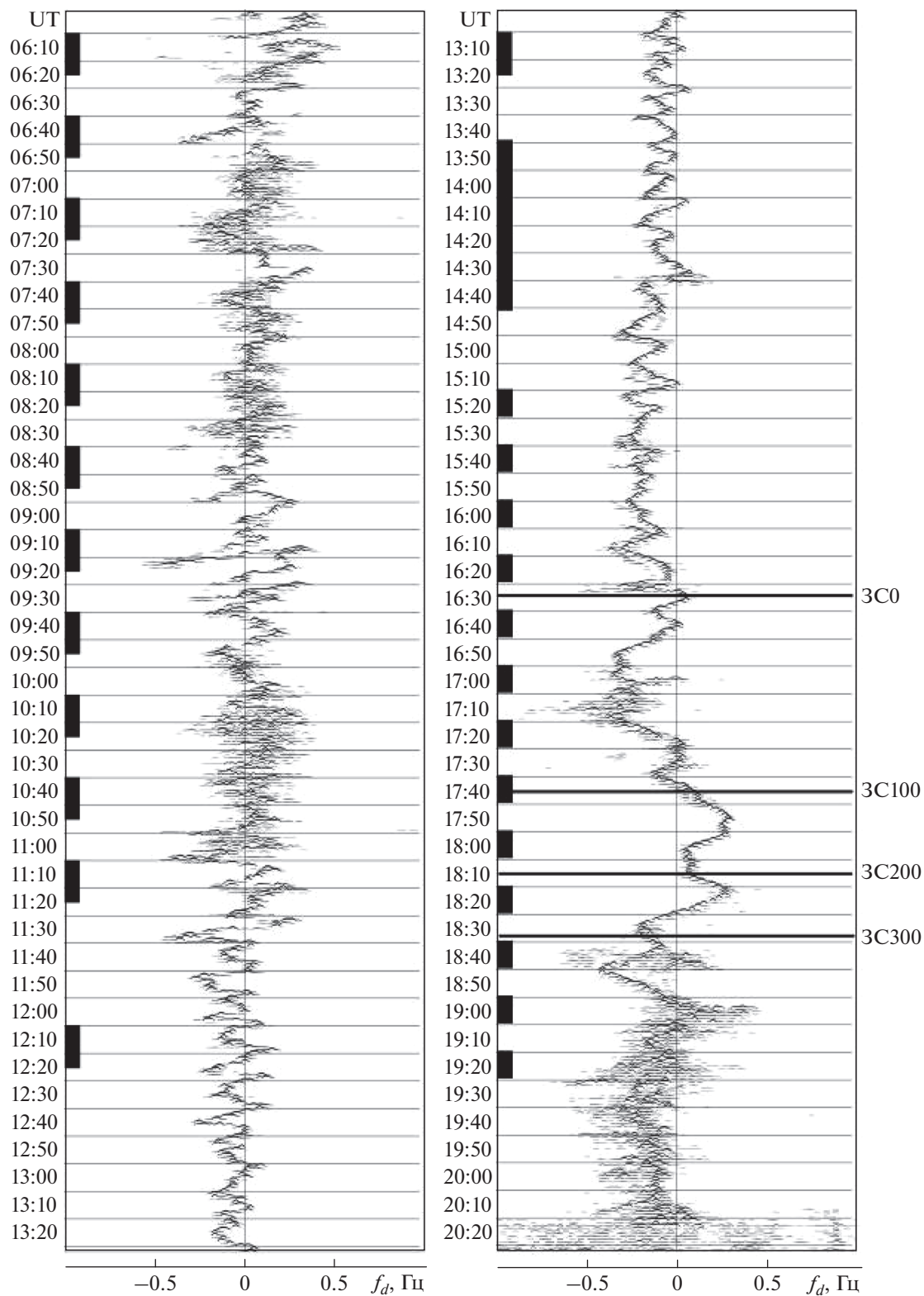


Рис. 7. Временные вариации доплеровских спектров 28 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км.

смещение частоты для наблюдаемых возмущений, f_{da} — его амплитуда.

При поиске возможной реакции ионосферы на воздействие мощным радиоизлучением отмечались любые изменения в характере вариаций доплеровских спектров.

До первого включения стенда существовали хаотические знакопеременные вариации доплеровского смещения частоты с характерным временем 15–20 мин (рис. 1). После первого включения стенда в 07:00 UT в режиме [+5 мин, –5 мин] в интервале времени 07:37–08:02 UT (с временем запаздывания $\Delta t \approx 37$ мин относительно начала сеанса) на частоте 4200 кГц возникло квазипериодическое колебание доплеровского смещения частоты f_d с периодом $T \approx 10$ мин, длительностью ΔT не менее 25 мин и с амплитудой $f_{da} = 0.1$ Гц.

С 08:15 и до 09:05 UT наблюдался “развал” доплеровских спектров на обеих частотах 3200 и 4200 кГц. Как указывалось выше, данные для частоты 3200 кГц в статье не приводятся ввиду их малой информативности. Начало этого процесса совпало со следующей серией циклов излучения нагревного стенда. Далее вплоть до 15:05 UT имели место достаточно хаотические вариации f_d . Как показал спектральный анализ, в интервале времени 10:00–14:30 UT в вариациях преобладали колебания с периодами 15 и 30 мин и амплитудами около 0.15 и 0.12 Гц соответственно.

После включения стенда в 14:20 UT с $PG = 110$ МВт в режиме [+15 мин, –15 мин] в интервале времени 15:10–16:35 UT (с временем запаздывания $\Delta t \approx 45$ мин) наблюдались квазипериодические вариации f_d с периодом 15 мин, длительностью $\Delta T = 90$ мин и $f_{da} = 0.15$ Гц. Следующее одиночное включение стенда в 15:55 UT сопровождалось подавлением квазипериодических колебаний f_d в интервале времени 16:35–17:05 UT. Очередное колебание f_d с периодом 15 мин, продолжительностью 40 мин с $f_{da} = 0.16$ Гц имело место в интервале времени 17:05–17:45 UT.

После 18:00 UT регистрировались длиннопериодическое колебание с $T = 30$ –40 мин и с амплитудой ~ 0.25 Гц.

4.2. Временные вариации доплеровских спектров 22 августа 2013 г.

После включения нагревного стенда в 07:00 UT на один час на частоте $f = 4785$ кГц с $PG = 80$ МВт в режиме [+5 мин, –5 мин] с временем запаздывания ~ 28 мин на частоте 4200 кГц появилось квазипериодическое колебание f_d с периодом 10 мин, которое в интервале времени 07:45–08:25 UT сменилось колебанием с $T = 20$ мин (рис. 2). Сигнал на частоте 3200 кГц в этом сеансе экранировался слоем E_s .

Начиная с 08:46 и до 13:01 UT, волна накачки излучалась на частоте $f = 4785$ кГц с $PG = 100$ МВт в режиме [+15 мин, –45 мин]. Такой режим отвечает, фактически, излучению моноимпульсов. После каждого включения стенда с временем запаздывания $\Delta t \approx 12$ –40 мин возникали всплески доплеровского смещения частоты характерной формы: два положительных всплеска f_{d+} , разделенные, как правило, более “глубоким” отрицательным всплеском f_{d-} . Наиболее четко это видно в интервалах времени 08:50–09:05 UT, 10:15–10:30 UT, 11:12–11:36 UT и 13:06–13:25 UT. Всего имело место 8 похожих событий. Это позволило оценить статистические характеристики всплесков:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta t} &= 25.0 \pm 3.8 \text{ мин}, \quad \overline{\Delta T} = 16.0 \pm 0.8 \text{ мин}, \\ \overline{f_{d+}} &= 0.10 \pm 0.01 \text{ Гц}, \quad \overline{f_{d-}} = -(0.21 \pm 0.02) \text{ Гц}. \end{aligned}$$

В 14:30 UT имело место включение стенда в режиме [+6 мин, –6 мин]. Примерно с 15:08 UT на частоте 4200 кГц в интервале времени 15:08–15:48 UT наблюдалось колебание с $\Delta t \approx 38$ мин, $T \approx 12$ мин, $f_{da} = 0.08$ Гц и $\Delta T \approx 40$ мин. На частоте 3200 кГц подобное колебание отмечалось с 15:17–16:20 UT. С 15:40 и до 16:40 UT в доплеровских спектрах наблюдалось три моды. С 16:00 и до 19:00 UT стенд излучал на частоте 4785 кГц с $PG = 45$ МВт. В интервалах времени 16:00–16:20 UT, 16:40–17:00 UT и 18:40–19:00 UT был режим [+1 мин, –1 мин], а с 17:00 и до 18:30 UT режим [+3 мин, –7 мин].

В интервале времени 16:15–17:45 UT на частоте 4200 кГц регистрировалось колебание с $T \approx 24$ мин и $f_{da} = 0.15$ Гц. После 17:50 UT на обеих частотах имели место длиннопериодические ($T \approx 60$ –70 мин) колебания с $f_{da} \approx 0.3$ Гц.

4.3. Временные вариации доплеровских спектров 23 августа 2013 г.

Стенд излучал с 09:21 UT на частоте 5828 кГц в различных временных режимах (рис. 3). Нагрев ионосферы с 09:21–13:36 UT осуществлялся радиоизлучением с $PG = 40$ МВт в режиме [+15 мин, –15 мин]. На первый взгляд мощное радиоизлучение в этом интервале времени заметно не повлияло на ионосферные процессы в месте наблюдения. Однако спектральный анализ показал, что в спектре сигнала присутствовали колебания с периодами 15 и 30 мин и амплитудами около 0.08 и 0.10 Гц соответственно. Низкий уровень сигнала, как этого и следовало ожидать, определялся малой эффективной мощностью излучения волны накачки (40 МВт).

С 14:00–17:45 UT мощность излучения составляла $PG = 100$ МВт. Режим излучения был [+1 мин, –1 мин] с 14:00 и до 14:21 UT, [+6 мин, –6 мин] с 14:31 и до 16:00 UT, [+1 мин, –1 мин]

с 16:01 и до 17:30 UT и [+3 мин, –7 мин] с 17:31 и до 18:30 UT. После этого мощность излучения была уменьшена до 45 МВт.

В интервале времени 15:40 и до 16:35 UT отмечались квазипериодические вариации f_d с $T \approx 12$ мин, $\Delta T = 55$ мин и $f_{da} = 0.1$ Гц. После 17:05 UT доплеровские спектры стали диффузными и без каких-либо выделенных квазипериодических вариаций доплеровской частоты.

4.4. Временные вариации доплеровских спектров 25 августа 2013 г.

До 13:46 UT нагревный стенд не излучал, поэтому интервал времени с 07:00–13:46 UT использовался в качестве контрольного. Отметим, что с 07:30 и до 12:30 UT наблюдался “развал” доплеровских спектров, вызванный здесь естественными процессами в ионосфере (рис. 4).

Сразу после начала модификации ионосферы в 13:46 UT на частоте $f = 5828$ кГц с $PG = 100$ МВт, длившейся до 14:01 UT, на зондирующей частоте 4200 кГц произошел “развал” доплеровских спектров, который продолжался до 15:50 UT. Подобный эффект для радиоволны с частотой 3200 кГц имел место в интервале времени 14:25–15:35 UT.

После включения нагревного стенда в режиме излучения несущей на частоте 4785 кГц с $PG = 90$ МВт с 16:01 и до 16:16 UT (режим моноимпульсного излучения волны накачки) с временем запаздывания около 8 мин на обеих частотах зондирования 3200 и 4200 кГц возник мощный апериодический процесс длительностью около 55 мин и изменением f_d от $-(0.18$ и до $0.63)$ Гц. Апериодический процесс представлял собой два положительных всплеска (в интервалах времени 16:09–16:25 UT и 16:50–17:00 UT), разделенных “глубоким” и продолжительным отрицательным всплеском. Подобные по форме, но с другими временными параметрами, вариации $f_d(t)$ неоднократно наблюдались 22 августа 2013 г. (см. рис. 2).

Следующий цикл работы нагревного стенда на частоте $f = 4785$ кГц и $PG \approx 90$ МВт в режиме [+5 мин, –10 мин] имел место в интервале времени 16:28–17:03 UT. С 17:10–17:15 UT до 17:53 UT, т.е. с временем запаздывания $\Delta t \approx 42$ –47 мин, в ионосфере над г. Харьков наблюдалось развитие колебательного процесса с амплитудой $f_{da} \approx 0.07$ Гц, $T = 15$ мин и $\Delta T = 35$ мин.

Последнее в этот день включение стенда на той же частоте и эффективной мощности излучения волны накачки в режиме [+10 мин, –10 мин] имело место с 18:25 до 19:15 UT. После 18:40 UT, т.е. через 15 мин после включения стенда, доплеровские спектры на частотах 3200 и 4200 кГц стали диффузными. Несмотря на это, в спектре $f_d(t)$ проявлялось слабое колебание с $\Delta t \approx 50$ мин и $T =$

$= 20$ мин, которое обнаруживалось после спектрального анализа $f_d(t)$.

4.5. Временные вариации доплеровских спектров 26 августа 2013 г.

С 07:00 и до 14:22 UT нагревный стенд не излучал, поэтому этот интервал времени использовался в качестве контрольного. Отметим, что с 07:00 и до 16:30 UT наблюдался слой E_s , который почти все время экранировал зондирующий сигнал на частоте 3200 кГц.

С 14:22 и до 15:52 UT нагревный стенд излучал в режиме [+2 мин, –3 мин] с $PG = 40$ МВт с перестройкой по частоте в диапазоне от 5405 до 5505 кГц. При этом частота радиоволны была близка к четвертой гармонике гирочастоты электронов $4f_B$ в области взаимодействия мощной радиоволны с плазмой. Примерно в 15:02 UT, т.е. с временем запаздывания $\Delta t \approx 40$ мин, в течение 90 мин имел место “развал” спектров (рис. 5).

В интервале времени 16:12–07:00 UT нагревный стенд излучал по 2 мин последовательно на частотах 5395, 5375, 5395 и 5435 кГц в режиме [+10 с, –10 с]. С 16:55 и до 17:42 UT, т.е. через 43 мин после начала работы стенда в этом режиме, в ионосфере усилилось колебание с $T \approx 15$ мин, $f_{dm} \approx 0.15$ Гц и $\Delta T \approx 50$ мин. Далее наблюдались процессы с постепенно увеличивающимся периодом от 25–80 мин.

4.6. Временные вариации доплеровских спектров 27 августа 2013 г.

Режимы работы нагревного стенда были следующими. С 07:00–14:15 UT стенд излучал на частоте 4785 кГц с $PG = 80$ МВт, причем в интервалах времени 07:00–07:46 UT и 08:01–11:46 UT в режимах [+5 мин, –5 мин] и [+15 мин, –15 мин] соответственно. С 12:00–14:15 UT стенд излучал в режиме [+15 мин, –45 мин] (режим моноимпульса). В интервале времени 14:39–16:07 UT стенд работал в режиме [+2 мин, –2 мин] с $PG = 110$ МВт с постепенно увеличивающейся частотой от 5395 до 5515 кГц вблизи частоты четвертой гармоники гирочастоты электронов. С 16:10–16:50 UT стенд излучал на частоте 5455 кГц с $PG = 110$ МВт в режиме [+10 с, –10 с].

В интервале времени 07:30–08:20 UT наблюдался “развал” доплеровских спектров на частоте 4200 кГц (рис. 6). На частоте 3200 кГц подобный эффект отмечался в интервале времени 07:20–07:45 UT. Следующий “развал” спектров на обеих частотах имел место с 09:50 до 11:35 UT. Заметим, что в достаточно хаотических вариациях доплеровских спектров спектральный анализ позволил выявить квазипериодические колебания с периодами 15 мин и 30 мин и амплитудами около 0.1 Гц,

которые наблюдались в интервале времени 08:50–12:20 UT.

Включения стэнда в режиме “несущая” с 12:00 до 12:15 UT сопровождалось “развалом” доплеровских спектров, который наблюдался в интервале времени 12:20–12:43 UT. Работе стэнда с 13:00 до 13:15 UT сопутствовало некоторое усиление вариаций доплеровских спектров в интервале времени 13:30–14:00 UT. Третье включение стэнда с 14:00 и до 14:15 UT с временем запаздывания около 12 мин сопровождалось характерными всплесками: двумя в сторону больших значений, которые разделялись всплеском в сторону меньших значений. Если бы не было отрицательной “подставки”, вызванной суточным ходом доплеровского смещения частоты, и равной -0.2 Гц, наблюдалось бы два положительных всплеска, разделенных отрицательным всплеском. Подобная картина неоднократно наблюдалась 22 августа 2013 г. (см. рис. 2).

Начало работы стэнда на частоте, близкой к четвертой гармонике гирочастоты электронов, с временем запаздывания около 5 мин сопровождалось “развалом” спектров на частоте 3200 кГц. Такой эффект наблюдался до 16:50 UT. При этом частичный “развал” спектров на частоте 4200 кГц наблюдался только в интервале времени 15:16–15:28 UT.

После 16:00 UT наблюдалось увеличение амплитуды колебаний от 0.15 и до 0.45 Гц и их периода от 20 и до 45 мин.

4.7. Временные вариации доплеровских спектров 28 августа 2013 г.

Режимы работы нагревного стэнда были следующими.

В интервале времени 06:00–11:15 UT стэнд излучал в режиме [+15 мин, –15 мин] на частоте $f = 4785$ кГц с $PG = 85$ МВт. С 12:00 и до 13:15 UT стэнд работал в режиме [+15 мин, –45 мин] (режим излучения моноимпульсов) с теми же f и PG .

С 13:39 и до 14:41 UT стэнд излучал в режиме [+2 мин, –2 мин] с $PG = 110$ МВт с пошагово увеличивающейся частотой на 20 кГц от 5365 до 5545 кГц вблизи четвертой гармонике гирочастоты электронов. Наконец, с 15:09 и до 19:19 UT нагревный стэнд излучал на частоте $f = 4544$ кГц с $PG = 70$ МВт в режиме [+10 мин, –10 мин].

Днем 28 августа 2013 г. имела место ионосферная буря, что привело к эффекту частичного “развала” доплеровских спектров на частоте 4200 кГц и к полному их “развалу” на частоте 3200 кГц. Лишь после 11:00 UT вариации доплеровского смещения частоты при $f = 4200$ кГц стали носить квазипериодический характер (рис. 7).

После включения стэнда в режиме “моноимпульса” с 12:00 до 12:15 UT характер вариаций f_d

несколько изменился в 12:25 UT возникло апериодическое колебание с двумя положительными всплесками, разделенными отрицательным выбросом. При этом $\Delta t \approx 25$ мин и $\Delta T \approx 15$ мин, заметно увеличивалась его амплитуда.

Следующее включение стэнда в режиме “моноимпульса” с 13:00–13:15 UT сопровождалось с временем запаздывания около 15 мин появлением всплесков f_d характерной формы: два всплеска в сторону положительных значений, разделенных всплеском в сторону отрицательного значения. В интервале времени 13:30–14:30 UT регистрировалось квазипериодическое изменение $f_d(t)$ с периодом около 10–12 мин и амплитудой около 0.07–0.11 Гц.

Следующий цуг колебаний длительностью около 60 мин и периодом 15 мин наблюдался в интервале времени 14:30–15:30 UT с $f_{da} = 0.11$ –0.15 Гц.

В 15:55 UT также начался квазипериодический процесс с $T \approx 12$ мин, который вскоре был разрушен. После 16:30 UT наблюдались колебания с $T \approx 20$ –30 мин и амплитудой около 0.1–0.2 Гц.

4.8. Временные вариации доплеровских спектров 29 августа 2013 г.

В этот день стэнд СУРА не работал. Доплеровские измерения использовались в качестве контрольных.

В течение дня имели место типичные для F -области квазипериодические вариации f_d , которые, на первый взгляд, мало чем отличались от квазипериодических вариаций, вызванных воздействием на ионосферу мощным радиоизлучением. Именно это обстоятельство осложняет идентификацию волновых возмущений искусственного происхождения. Естественно, в этот день отсутствовали апериодические возмущения, которые четко наблюдались 22 августа 2013 г.

В интервале времени 16:20–18:20 UT уверенно наблюдалась реакция ионосферы на движение вечернего терминатора, заключающаяся в генерации как в этот день, так и в другие дни длиннопериодных ($T \approx 20$ –30 мин) интенсивных волновых процессов с амплитудой 0.3–0.4 Гц.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе измерительной кампании 20–29 августа 2013 г. был подтвержден ряд, описанных нами ранее эффектов [Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б, Черногор, 2014], а также обнаружены новые явления. К обнаруженным ранее относятся эффекты генерации колебаний с периодом, равным периоду цикла нагрев–пауза, и усиления естественных колебаний; к новым – апериодические всплески доплеровского смещения частоты, сопровождав-

Таблица 2. Параметры квазипериодических колебаний

Дата	Время существования	f_{da} , Гц	T , мин	f , кГц	δ_N , %
22 августа 2013 г.	15:10–16:00 UT	0.08	12	4200	1.1
23 августа 2013 г.	15:20–16:50 UT	0.1	12	4200	1.4
25 августа 2013 г.	17:15–17:50 UT	0.07	15	4200	1.2
22 августа 2013 г.	16:58–18:00 UT	0.2	15	4200	3.5
26 августа 2013 г.	16:50–17:40 UT	0.2	15	4200	3.5
28 августа 2013 г.	14:30–15:25 UT	0.11–0.15	15	4200	2.0–2.6

шие излучение нагревного стенда СУРА в режиме моноимпульсов. Обсуждение всех этих эффектов приведено ниже.

При идентификации волновых возмущений искусственного происхождения, основываясь на результатах ранее выполненных исследований [Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Черногор, 2014], нами использовался ряд признаков, присущих искусственным возмущениям. К ним относятся: время запаздывания возмущений (их скорость распространения), увеличение скорости распространения при увеличении высоты (увеличении частоты зондирующей радиоволны), соответствие длительности волнового цуга длительности циклов нагрева, соответствие периодов возмущений периоду циклов нагрева, а также зависимость амплитуды возмущений от эффективной мощности излучения волны накачки. Рассмотрим подробнее полученные результаты.

5.1. Эффект генерации колебаний с периодом, равным периоду цикла нагрева

После включения нагревного стенда 22 августа 2013 г. в 14:00 UT в режиме [+6 мин, –6 мин] возникли квазипериодические колебания с периодом $T \approx 12$ мин и временами запаздывания 38 и 60 мин на частотах 4200 и 3200 кГц соответственно. При времени развития процесса Δt_0 , намного меньшем времени запаздывания возмущений Δt , скорость распространения возмущений v составляет 420 и 270 м/с соответственно. Такие скорости при периоде возмущений $T \approx 12$ мин соответствуют атмосферным гравитационным волнам на высотах 180–200 и 130–150 км, где и отражались зондирующие волны в дневное время [Госсард и Хук, 1978]. Амплитуда относительных возмущений концентрации электронов (см., например, [Черногор, 2014]) равна:

$$\delta_N = \frac{cT f_{da}}{4\pi L f},$$

где c – скорость света в вакууме, T – период колебания, L – характерный высотный масштаб (диапазон высот, дающий основной вклад в допле-

ровское смещение частоты), f – частота доплеровского радара.

Результаты оценки δ_N при $L \approx 30$ км и $f = 4200$ кГц для разных сеансов наблюдений приведены в табл. 2.

Аналогичное колебание наблюдалось 23 августа 2013 г. при включении нагревного стенда в таком же режиме (см. табл. 2).

При работе стенда СУРА 25 августа 2013 г. в режиме [+5 мин, –10 мин] наблюдалась генерация квазипериодического процесса с $T \approx 15$ мин, $f_{da} \approx 0.07$ Гц и $\Delta t \approx 42$ –47 мин ($v \approx 380$ –340 м/с). Важно, что длительность цуга колебаний $\Delta T \approx 35$ мин здесь соответствовала продолжительности цикла нагрева (35 мин). Это свидетельствует в пользу того, что цуг был сгенерирован работой нагревного стенда.

Таким образом, совпадение периода ионосферных возмущений с периодом циклов излучения стенда СУРА, соответствие длительности цуга колебаний длительности воздействия, увеличение v при увеличении высоты зондирования, величина скорости распространения волновых возмущений, δ_N и периодов, близких к тем, что описаны в работах [Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Черногор, 2014], подтверждает тот факт, что квазипериодические (волновые) возмущения генерировались периодическим радиоизлучением нагревного стенда.

Как отмечалось ранее в [Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Черногор, 2014], эффект генерации волновых возмущений заметно усиливался при мощности стенда больше 40 МВт и при периоде цикла больше примерно 10 мин, т.е. когда он превышал период Брента-Вяйсяля [Госсард и Хук, 1978; Брюнелли и Намгаладзе, 1988].

5.2. Эффект усиления естественных колебаний

О возможности усиления естественных волновых возмущений с периодом, не равным периоду цикла излучения нагревного стенда, упоминалось в работах [Черногор и др., 2011, 2014, 2019;

Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Черногор, 2014]. В настоящей измерительной компании этот эффект наблюдался, по крайней мере, трижды.

1) 21 августа 2013 г. после включения стенда в 16:08 UT в режиме [+1 мин; –1 мин] на фоне движения вечернего солнечного терминатора в интервале 16:58–17:45 UT по сравнению с предыдущим получасовым интервалом усилилось квазипериодическое колебание с $T \approx 15$ мин (см. табл. 2). Амплитуда этого колебания была близка к амплитуде колебания с периодом 15 мин, наблюдававшегося с 15:05 и до 16:35 UT и вызванного работой стенда в режиме [+15 мин; –15 мин]. Амплитуда δ_N при этом была примерно в 3 раза больше амплитуды колебаний в этот же день и в соседние дни, генерируемых только радиоизлучением нагревного стенда. Естественно предположить, что имело место синергетическое воздействие на ионосферу двух источников энерговыделения: солнечного терминатора и мощного радиоизлучения.

2) Включение стенда 26 августа 2013 г. 16:12 UT в режиме [+10 с, –10 с] с временем запаздывания около 43 мин ($v \approx 370$ м/с) привело к усилению колебаний, генерируемых вечерним солнечным терминатором с $T \approx 15$ мин (см. табл. 2). Длительность цуга колебаний, равная 47 мин, практически совпала с длительностью циклов нагревного стенда (48 мин). Все параметры возмущения свидетельствуют о факте усиления за счет нагрева ионосферы естественного возмущения, вызванного движением терминатора.

3) После включения нагревного стенда 28 августа 2013 г. в 13:39 UT в режиме [+2 мин; –2 мин] с временем запаздывания около 51 мин ($v \approx 310$ м/с) в ионосфере усилилось квазипериодическое колебание с $T \approx 15$ мин длительностью около 60 мин, практически равной продолжительности циклов нагревного стенда (58 мин) (см. табл. 2). Во всех случаях фигурировал один и тот же период – 15 мин. Этот период близок к периоду собственных колебаний атмосферы на высотах слоя F2 ионосферы (периоду Брента-Вяйсяля).

Заметим, что перечисленные выше режимы излучения с короткими (≤ 2 мин) импульсами эквивалентны режиму непрерывного излучения с $\overline{PG} = PG/2$.

Механизм усиления естественных колебаний (волн) представляется следующим. В атмосферном волноводе, расположенному на высотах 150–250 км, возбуждаются и распространяются на расстояния ~ 1000 км прежде всего собственные моды, параметры которых зависят от параметров волновода, т.е. состояния атмосферы. Высокоэнергичные источники своим “ударным” воздействием возбуждают (подпитывают уже существующие) моды. В этих случаях период возбуждаемых волн не обязательно совпадает с периодом

воздействующего источника. Подобный эффект был обнаружен авторами [Полякова и Ясюкевич, 2015], которые наблюдали усиление колебаний, генерируемых солнечным терминатором за счет энергии тропического циклона (тайфуна). Естественно, что при совпадении (или близости) периода собственных колебаний с периодом воздействующего источника эффективность генерации возрастает (см. подраздел 4.1).

5.3. Аперриодический эффект

Наиболее четко аперриодическая реакция ионосферы на включения радиоизлучения в режиме “несущая” наблюдалась 22 августа 2013 г. (см. рис. 2). Сменяющие друг друга положительные – отрицательные – положительные всплески (точнее приращения) доплеровского смещения частоты свидетельствуют сначала о росте концентрации электронов N в слое ионосферы толщиной $L \approx 30$ –40 км вблизи высоты отражения зондирующей радиоволны, затем о ее уменьшении. Временной интервал между началом первого и концом второго положительных всплесков f_d был близок к продолжительности воздействия (15 мин). Похоже на то, что всплески N возникали при включении стенда, т.е. имел место эффект ударного воздействия при резком изменении мощности радиоизлучения [Черногор и др., 2014]. Этот эффект четко проявляется при моноимпульсном возмущении ионосферы длительностью 15 мин и не наблюдался при длительности воздействия 2 мин. Заметим, что аперриодические всплески могли появляться, например, при режиме ± 15 мин, но они маскировались квазипериодическими процессами с периодами 15 и 30 мин.

Оценим величину возмущения концентрации электронов в течении положительных всплесков, исходя из следующего соотношения (см., например, [Черногор, 2014]):

$$\delta_N = \frac{c \Delta t \Delta f_{dm}}{2L f},$$

где Δf_{dm} – максимальное изменение f_d , Δt – продолжительность положительного всплеска. При $\Delta f_{dm} = \overline{f_{d+}} \approx 0.1$ Гц, $\Delta t \approx 4$ мин, $f = 4200$ кГц, $L \approx 30$ км имеем $\delta_N \approx 2.9\%$.

Сменяющие друг друга положительные – отрицательные – положительные всплески свидетельствуют о том, что к месту диагностики возмущений пришел знакопеременный импульс возмущения концентрации электронов. Сначала фаза сжатия ($\Delta N > 0$) длительностью около 8 мин, а затем фаза разрежения ($\Delta N < 0$) такой же длительности. При времени запаздывания $\overline{\Delta t} \approx 25$ мин имеем кажущуюся скорость $v \approx 640$ м/с. В принципе, эта скорость близка к скорости атмосфер-

ных гравитационных волн в F -области ионосферы. В этом случае наблюдаемый знакопеременный процесс вызван перемещающимся ионосферным возмущением, возникшим под действием радиозлучения нагревного стенда ударно-волновым возмущением атмосферно-гравитационной природы.

Двухфазное возмущение концентрации может представлять собой слабую квазистационарную ударную волну N с амплитудой около 2.9%, бегущую вдоль ионосферы от диаграммы направленности антенны нагревного стенда. Квазистационарность обеспечивается примерным уравниванием нелинейного укращения профиля волны диффузионным расплыванием возмущения ΔN .

Возможен и третий механизм аperiodических вариаций $f_d(t)$. Знакопеременные изменения $f_d(t)$ вызваны знакопеременными движениями области отражения радиоволны с вертикальной скоростью

$$v_z = B_x E_y / B^2,$$

где $B_x = B \cos \theta$, $B \approx 5 \times 10^{-5}$ нТл — значение индукции главного магнитного поля, θ — угол наклона вектора индукции к горизонту, E_y — горизонтальная (зональная) составляющая электрического поля. При $\theta = 76^\circ$ и $v_z = 4 - 7$ м/с имеем $E_y \approx 0.8 - 1.4$ мВ/м. Значение v_z оценено из $f_d \approx 0.1 - 0.2$ Гц. Появление таких значений $E_y \sim 1$ мВ/м может быть связано с умеренной геомагнитной бурей, имевшей место 22 августа 2013 г. Механизм генерации возмущений зональной компоненты может быть следующим. Нагрев электронов в пределах диаграммы направленности приводит к уменьшению коэффициента рекомбинации α_r электронов на высотах $\sim 100 - 200$ км, а значит — к резкому (с характерным временем $t_N = (2\alpha_r N)^{-1} \approx 3 - 17$ с) увеличению N на $\sim 1 - 10\%$ и такому же росту проводимости ионосферной плазмы. В результате ударного воздействия генерируется импульс квазистационарного электрического поля поляризации, способного распространяться в горизонтальном направлении. Характерной скоростью распространения может быть скорость медленных МГД-волн ($v \sim 10^2 - 10^3$ м/с) [Сорокин и Федорович, 1982]. В нашем случае $v \approx 640$ м/с.

5.4. Эффект генерации (усиления) плазменной турбулентности

Появление 21 августа 2013 г. через несколько минут после включения нагревного стенда в 08:15 UT плазменной турбулентности, регистрируемой по эффекту “развала” доплеровских спектров, возникновению отражений в высотном канале 75–150 км, а также по появлению диффузности на ионограммах вертикального зондирования

в г. Харьков могут свидетельствовать о ее искусственном происхождении (см. рис. 1). Конечно, нельзя исключать и простого совпадения, когда “развал” спектра был бы вызван естественными процессами.

Второй раз плазменная турбулентность, регистрируемая на частоте 3200 кГц, появлялась через семь минут после включения нагревного стенда 26 августа 2013 г. в 14:22 UT. Такая турбулентность может вызываться плазменными неустойчивостями, которые возбуждаются, например, пульсирующими потоками энергичных электронов, высыпавшимися из радиационного пояса Земли.

Механизмом турбулизации слоев ионизации в средних широтах может быть дополнительная ионизация атмосферы высокоэнергичными электронами, т.е. механизм связан с взаимодействием подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера. Локализация слоя по высоте обусловлена энергией высыпавшихся электронов. Известно, что дополнительная ионизация в E - и F -областях ионосферы возникает при энергиях электронов 1–100 кэВ (см., например, [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]). Толщина слоя с дополнительной ионизацией при этом порядка 10 и 100 км в E - и F -областях соответственно. Так, слой E_s первого класса (по терминологии авторов [Беспрозванная и Шука, 1978]) по структуре схож с регулярным слоем E . Такой слой систематически проявляется в ионосфере высоких широт. Его особенности в высоких широтах хорошо изучены, чего не скажешь о слое E_s первого класса в средних широтах. Добавим, что сам факт высыпания энергичных электронов в средних широтах надежно установлен, но его свойства изучены значительно меньше, чем в высоких широтах. Это объясняется тем, что потоки частиц в средних широтах заметно меньше и система Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера в средних широтах более стабильная, чем в высоких широтах. Высыпания активируются во время умеренных магнитных бурь, о чем свидетельствуют результаты работ [Wratt, 1976; Tadokoro et al., 2007; Соколов, 2011; Марков и др., 2010, 2012], где наблюдались плотности потока электронов $\Pi_e \approx 10^8 - 10^{10}$ м⁻² с⁻¹. Наши оценки Π_e близки к этим значениям (см., например, [Черногор, 2014]).

Добавим, что на спутнике DEMETER в полосе до 1200 км вдоль меридиана и до 400 км в поперечном к нему направлении регистрировались потоки высыпавшихся электронов с энергиями порядка 100 кэВ и плотностью $\sim 10^8 - 10^9$ м⁻² с⁻¹, вызванные действием мощного радиоизлучения стенда СУРА [Марков и др., 2010, 2012; Фролов и др., 2019]. Есть причины, по которым высыпания электронов могут наблюдаться вдали от диаграммы направленности антенны. К ним относится генерация полей поляризации, сопровож-

дающих высыпания электронов [Cole, 1971; Park and Helliwell, 1971; Walker, 1978; Гармаш и Черногор, 1998]. Скорее всего, этот механизм имел место и в наших экспериментах, а его срабатыванию способствовала повышенная магнитная активность. Заметим, что выполненные в 2019 г. с помощью спутников NOAA исследования, показали присутствие высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли не только в ночных условиях, как это наблюдалось в [Фролов и др., 2019], но и в условиях освещенной Солнцем ионосфере.

Дозированное воздействие мощным радиоизлучением на среднеширотную ионосферу позволит лучше изучить особенности высыпания электронов в средних широтах и подтвердить определяющую подготовительную роль магнитных бурь.

5.5. Эффекты при излучении мощной радиоволны вблизи четвертой гармоники гирочастоты электронов

Излучение 26 и 27 августа 2013 г. радиоволны с частотой, близкой к четвертой гармоники гирочастоты электронов, сопровождалось “развалом” доплеровских спектров, вызванных, по-видимому, усилением рассеяния зондирующей радиоволны в результате генерации плазменной турбулентности (см. рис. 5–6). 28 августа 2013 г. подобный эффект также наблюдался на частоте 3200 кГц, но был выражен не так четко. В целом, в другие дни эффект лучше был выражен на частоте 3200 кГц. Его время становления 27 и 28 августа 2013 г. составляло около 7 мин. Важно, что продолжительность существования равнялась примерно 25 мин, что практически совпало с длительностью нагрева вблизи четвертой гармоники гирочастоты электронов. На частоте 4200 кГц этот эффект наблюдался не так уверенно. Это означает, что слой турбулентной плазмы, приводящий к “развалу” доплеровских спектров, был локализован вблизи высоты 100–120 км. Известно, что практически одновременно с генерацией искусственных неоднородностей на уровне отражения волны накачки в F2-слое ионосферы наблюдается развитие неоднородностей и на высотах E-области. И это не прораствание неоднородностей сверху, а прямая генерация в E-слое [Bakhmetieva et al., 2018].

Если только все три случая “развала” спектров после включения мощного радиоизлучения не являются совпадением, можно предположить, что излучение на частоте $4f_B$ стимулирует развитие еще недостаточно изученных процессов в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, одним из результатов которого является генерация слоя турбулентной плазмы. Разумеется, этот эффект требует дополнительных исследований [Белякова и др., 1991].

В работе [Черногор и Фролов, 2012] отмечалось, что при близости частоты волны накачки к частоте $4f_B$ эффективность генерации ВГВ возрастала. Естественно предположить, что при этом усиливалась и турбулентность в ионосфере, что и проявлялось в “развале” доплеровских спектров.

5.6. Зависимость эффективности генерации возмущений от эффективной мощности излучения волны накачки

При эффективной мощности излучения менее 40–50 МВт генерируемые в ионосфере возмущения малы и значения δ_N часто $\sim 0.1\%$. Их удается обнаружить при помощи системного спектрального анализа [Черногор, 2014; Черногор и Домнин, 2014]. Приведем примеры обнаружения таких возмущений.

23 августа 2013 г. в интервале времени 09:21–13:36 UT стенд излучал в режиме [+15 мин, –15 мин] с $PG \approx 40$ МВт. Примерно через 40 мин после первого включения стенда в спектре вариаций доплеровского смещения частоты усилились гармоники с периодами 15 и 30 мин (см. рис. 9). Гармоники с $T = 15$ мин имела амплитуду около 0.05 Гц, чему соответствовало значение $\delta_N \approx 0.85\%$. Амплитуда гармоники с $T = 30$ мин была еще меньше (см. рис. 9). Времени запаздывания, равному 40 мин, соответствует скорость распространения волнового возмущения, равная 400 м/с. Важно, что длительность волнового цуга была близка к длительности излучения стенда в указанном режиме (4 ч 15 мин). Значения скорости, периода и продолжительности цуга свидетельствуют в пользу того, что возмущение было, скорее всего, сгенерировано мощным радиоизлучением.

Показательным примером роста интенсивности возмущений в ионосфере являются наблюдения 23 августа 2013 г. В интервале времени 13:50 и до 14:00 UT стенд работал с $PG \approx 40$ МВт, а с 14:00 и до 14:21 UT с $PG \approx 100$ МВт. Примерно в 14:45 UT произошло изменение характера временных вариаций f_d , точнее, имело место разрушение квазипериодического колебания, наблюдаемого на частоте 4200 кГц (см. рис. 3). По-видимому, при увеличении PG произошла генерация волнового возмущения в противофазе с существовавшим в естественных условиях колебанием. Если подавление колебания вызвано увеличением мощности стенда, то $\Delta t \approx 45$ мин, а $v \approx 355$ м/с. Такая скорость свойственна акустико-гравитационным волнам. Следовательно, есть основания считать, что увеличение PG с 40 до 100 МВт действительно привело к генерации колебания в противофазе с существовавшим естественным колебанием.

Отмеченные особенности согласуются с результатами наших более ранних наблюдений

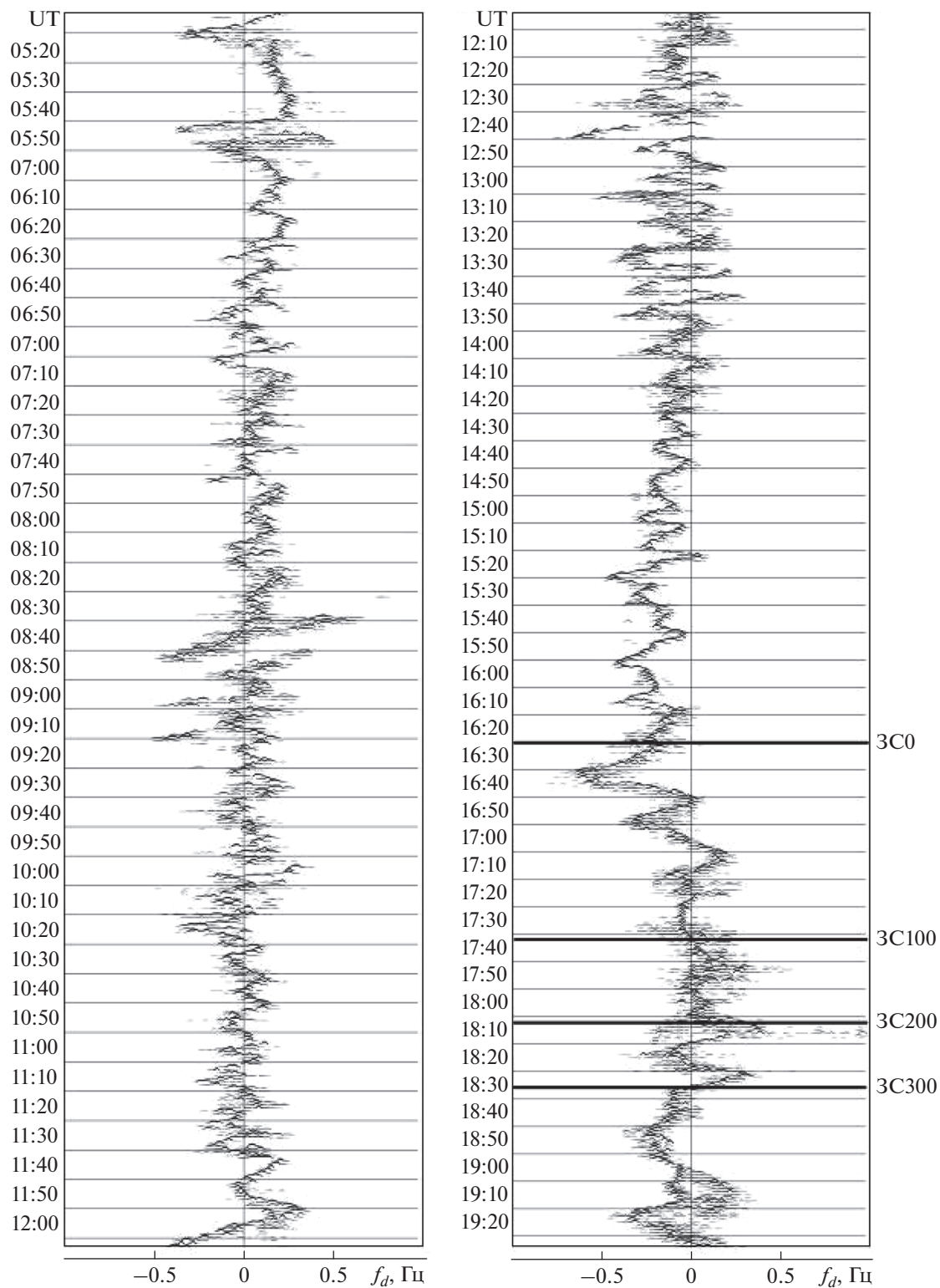


Рис. 8. Временные вариации доплеровских спектров 30 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц. Диапазон действующих высот 225–300 км.

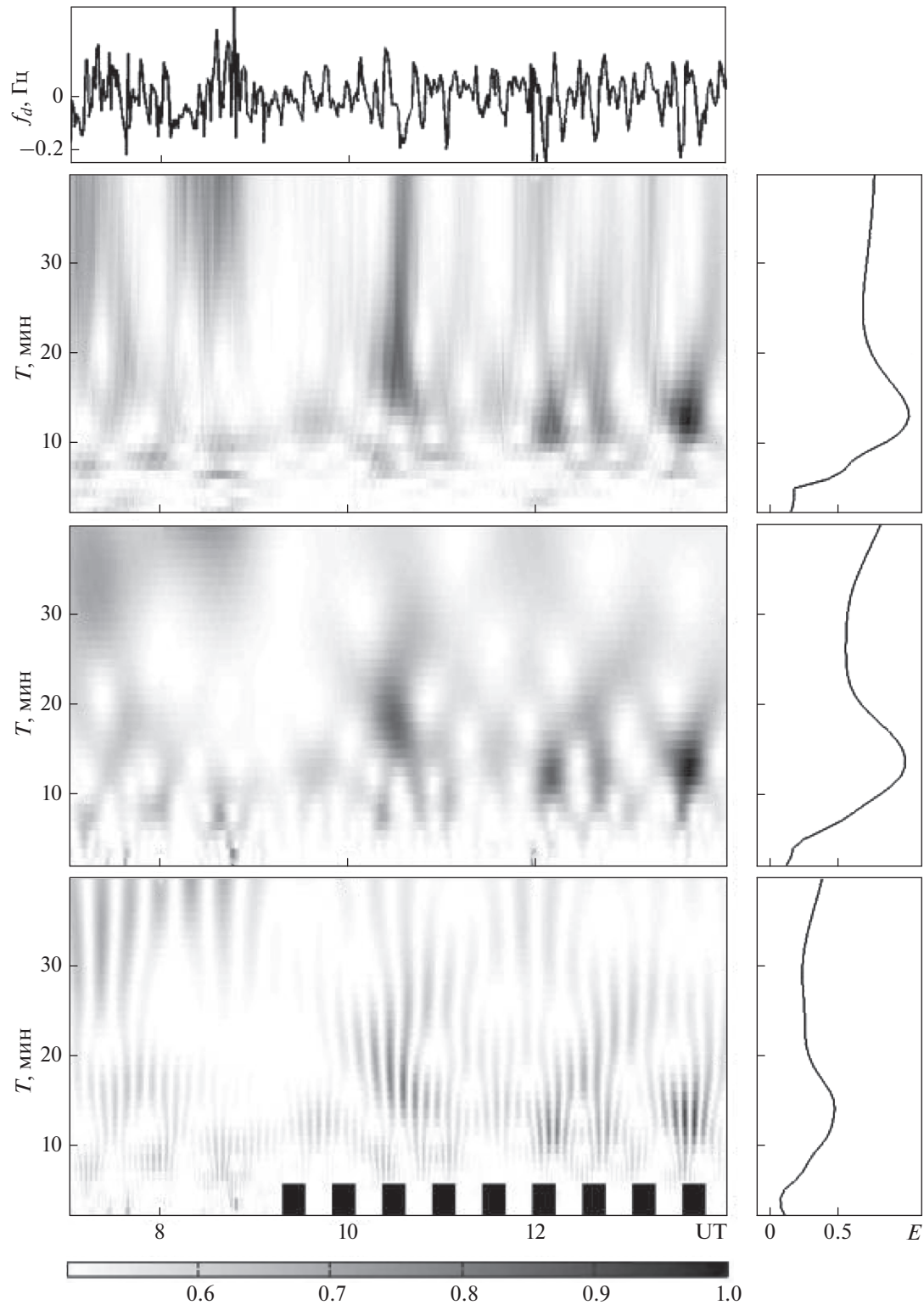


Рис. 9. Результаты системного спектрального анализа временных вариаций доплеровского смещения частоты 23 августа 2013 г. на частоте 4200 кГц (диапазон действующих высот 225–300 км): исходный сигнал; спектрограмма оконного преобразования Фурье; спектрограмма адаптивного преобразования Фурье; спектрограмма вейвлет-преобразования (панели сверху вниз). Справа показаны энергограммы соответствующих спектрограмм.

[Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Черногор, 2014].

5.7. Влияние вечернего солнечного терминатора

Реакция ионосферы на движение солнечного терминатора начиналась примерно в 16:00 UT, т.е. еще до захода Солнца на уровне поверхности Земли. Это объясняется генерацией волновых возмущений, скорость распространения которых превышает скорость движения терминатора. В разные дни реакция, вообще говоря, отличалась. Общим является увеличение периода колебаний f_d до 30–40 мин, а также их амплитуды до 0.5 Гц (см., например, рис. 6). Такому значению f_d соответствует $\delta_N \approx 25\%$, что значительно превышает значение δ_N для волн, сгенерированных мощным радиоизлучением. Значительное усиление колебаний f_d , скорее всего, обусловлено сложением в фазе двух колебаний, а именно от солнечного терминатора и от магнитной бури 27 августа 2013 г. Как известно, магнитные бури сопровождаются внедрением энергии солнечного происхождения на широтах $\sim 70^\circ$ N и генерацией акустико-гравитационных волн. Их время распространения до широты наблюдения ($\sim 50^\circ$ N) составляло не менее 1–2 ч.

Воздействие мощного радиоизлучения может приводить в одних случаях к усилению волновых возмущений, генерируемых солнечным терминатором, в других (при сложении колебаний в противофазе) – к их ослаблению или даже разрушению (см. рис. 7). Из рисунка 7 видно, что квазипериодический процесс, начавшийся в 16:00 UT, был разрушен возмущением от солнечного терминатора. Подобный эффект упоминался в работах [Черногор и др., 2011, 2014, 2019; Черногор и Фролов, 2011, 2012, 2013а, б; Черногор, 2014].

В пользу влияния удаленных на значительные расстояния высокоэнергичных источников на волновые возмущения от терминатора свидетельствуют также результаты работы [Полякова и Ясюкевич, 2015].

6. ВЫВОДЫ

1. На фоне умеренных магнитных бурь 21–27 августа 2013 г. обнаружены знакопеременные всплески, точнее приращения, доплеровского смещения частоты, сопровождавшие включения нагревного стенда в режиме несущей (режиме монопольных) и имеющие среднее время запаздывания 25.0 ± 3.8 мин, длительность 16.0 ± 0.8 мин, амплитуду доплеровского смещения частоты 0.1–0.2 Гц и $\delta_N \approx 1.4$ –2%. Такие всплески в магнитно-спокойных условиях ранее нами не отмечались. Описаны механизмы генерации знакопеременных приращений доплеровской частоты. Можно предположить, что умеренные магнитные бури

могли играть подготовительную роль в генерации знакопеременных аperiodических возмущений.

2. Во всех трех случаях включения мощного радиоизлучения с частотой, близкой к четвертой гармонике гирочастоты электронов, наблюдался “развал” доплеровских спектров. Время развития процесса было около 7 мин. Продолжительность эффекта фактически совпала с продолжительностью нагрева. Конечно, для подтверждения факта не простого совпадения требуется проведение дополнительных экспериментов в периоды умеренных магнитных бурь. При других режимах излучения мощной радиоволны явная связь “развала” доплеровских спектров с включением нагревного стенда не была замечена.

3. Подтверждено, что волновые возмущения, генерируемые мощным радиоизлучением, обнаруживаются на расстоянии около 1000 км при эффективной мощности не менее 40 МВт. Дальнейшее увеличение эффективной мощности, как и следовало ожидать, приводило к усилению интенсивности волновых возмущений.

4. Подтверждено, что мощное периодическое радиоизлучение приводит к генерации волновых возмущений с периодом, равным длительности цикла нагрева.

5. В ряде случаев мощное радиоизлучение приводило к усилению естественных волновых возмущений, хотя периоды возмущений и цикла нагрева не совпадали. Предложено возможное объяснение этому факту. Подобный эффект обнаружен также при воздействии других мощных источников энерговыделения.

6. Магнитная буря могла приводить к усилению волновых возмущений, вызванных движением вечернего солнечного терминатора. Влияние умеренных магнитных бурь на эффективность генерации искусственных волновых возмущений, в отличие от эффективности генерации аperiodических возмущений, не обнаружено. Этого и следовало ожидать при слабых и умеренных бурях. Влияние сильных магнитных бурь на упомянутую эффективность требует специальных исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда СУРА за оказанную ими помощь в проведении экспериментальных исследований. Работа В.Л. Фролова выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Работа Л.Ф. Черногора частично поддержана государственной бюджетной НИР учреждений МОН Украины, государственной регистрации № 0119U002538, а также финансированием Национального фонда исследований Украины, проект № 2020.02/0015

“Теоретические и экспериментальные исследования глобальных возмущений естественного и техногенного происхождения в системе Земля–атмосфера–ионосфера”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беликович В.В., Грач С.М., Караштин А.Н., Котик Д.С., Токарев Ю.В. Стенд “Сура”: исследования атмосферы и космического пространства (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 50. № 7. С. 545–576. 2007.
- Белякова В.Н., Березин И.В., Васьков В.В. и др. Особенности возбуждения плазменной турбулентности полем мощной радиоволны в условиях кратного гирорезонанса // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 31. № 3. С. 466–471. 1991.
- Беспрозванная А.С., Шука Т.И. Полярная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи. Апатиты: ПГИ КФАН. С. 13. 1978.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука. 521 с. 1988.
- Бурмака В.П., Домнин И.Ф., Урядов В.П., Черногор Л.Ф. Вариации параметров рассеянных сигналов и ионосферы, сопутствовавшие воздействию на плазму мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 52. № 11. С. 859–880. 2009.
- Васьков В.В., Димант Я.С., Рябова Н.С., Клименко В.В., Дункан Л.М. Тепловые возмущения магнитосферной плазмы при резонансном нагреве F-слоя ионосферы полем мощной радиоволны // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 32. № 5. С. 140–152. 1992.
- Васьков В.В., Комраков Г.П., Рябова Н.А. Тепловые возмущения околоземной плазмы, создаваемые мощным радиоизлучением комплекса Сура // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 35. № 5. С. 75–82. 1995.
- Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // Успехи современной радиоэлектроники. № 6. С. 17–40. 1998.
- Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука. 392 с. 1984.
- Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир. 532 с. 1978.
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. Т. 177. № 11. С. 1145–1177. 2007.
- Гуревич А.В., Зыбин К.П., Карлсон Х.С. Эффект магнитного зенита // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 48. № 9. С. 772–787. 2005.
- Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 272 с. 1973.
- Марков Г.А., Белов А.С., Комраков Г.П., Парро М. Возбуждение каналированных КНЧ–СНЧ-излучений при воздействии на плазму F₂-области ионосферы полем мощной радиоволны // Физика плазмы. Т. 38. № 3. С. 244–250. 2012.
- Марков Г.А., Белов А.С., Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Парро М. Возбуждение магнитосферного мазера воздействием на ионосферу Земли мощным коротковолновым радиоизлучением наземного передатчика // ЖЭТФ. Т. 138. Вып. 6(12). С. 1037–1042. 2010.
- Митяков Н.А., Грач С.М., Митяков С.Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. Т. 9. С. 1–140. 1989.
- Молчанов О.А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. М.: Наука. 224 с. 1985.
- Полякова А.С., Ясюкевич Ю.В. Усиление возмущений полного электронного содержания в зоне действия тайфунов в ночное время // Международная байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XIV конференции молодых ученых “Взаимодействие полей и излучения с веществом”, Иркутск. С. 181–183. 2015.
- Рябов А.О., Фролов В.Л. Искусственные высыпания энергичных электронов в магнито-сопряженной области при стимуляции ионосферы Земли мощными КВ радиоволнами стенда Сура // Тр. XXVI Всероссийской открытой научной конференции “Распространение радиоволн”. Т. 2. С. 75–8. 2019.
- Соколов С.Н. Магнитные бури и их эффекты в нижней ионосфере. Различия бурь разных типов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 51. № 6. С. 757–768. 2011.
- Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергоиздат. 136 с. 1982.
- Фролов В.Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ-радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 2. С. 22–48. 2015.
- Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Шорохова Е.А., Белов А.С., Парро М., Рош Ж.-Л. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F₂-области мощным радиоизлучением стенда СУРА // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 59. № 3. С. 198–222. 2016.
- Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. 468 с. 2017.
- Фролов В.Л., Акчуринов А.Д., Болотин И.А., Рябов А.О., Бертлье Ж.-Ж., Парро М. Высыпания энергичных электронов из радиационного пояса Земли, стимулированные модификацией среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 62. № 9. С. 641–663. 2019.
- Черногор Л.Ф. Крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере, вызванные воздействием мощного нестационарного радиоизлучения // Радиофизика и радиоастрономия. Т. 18. № 1. С. 49–64. 2013.
- Черногор Л.Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина. 448 с. 2014.
- Черногор Л.Ф., Гармаш К.П., Фролов В.Л. Крупномасштабные возмущения в нижней и средней ионосфере, сопровождавшие воздействие на нее радиоизлучением стенда “Сура” // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 62. Вып. 6. С. 440–459. 2019.

- Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. Физика геокосмических бурь: Монография. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 408 с. 2014.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности распространения акустико-гравитационных волн, генерируемых мощным периодическим радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 56. № 4. С. 219–239. 2013а.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Особенности волновых возмущений в ионосфере при периодическом нагреве плазмы радиоизлучением стенда Сура // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 56. № 5. С. 307–321. 2013б.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Барабаш В.В. Аперийодические крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере: результаты ионозондовых наблюдений // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 57. № 2. С. 110–128. 2014.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л., Комраков Г.П., Пушин В.Ф. Вариации спектра ионосферных волновых возмущений при периодическом нагреве плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 54. № 2. С. 81–96. 2011.
- Черногор Л.Ф., Фролов В.Л. Перемещающиеся ионосферные возмущения, генерируемые периодическим нагревом плазмы мощным высокочастотным радиоизлучением // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 55. № 1–2. С. 14–36. 2012.
- Bakhmetieva N.V., Frolov V.L., Vyakhirev V.D., Kalinina E.E., Akchurin A.D., Zykov E.Y. The lower ionosphere response to its disturbances by powerful radio waves // Adv. Space Res. V. 61. № 7. P. 1919–1930. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.022>
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms – A review // Space Sci. Rev. V. 88. № 3–4. P. 563–601. 1999.
<https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>
- Cole K.D. Formation of field-aligned irregularities in the magnetosphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 33. № 5. P. 741–750. 1971.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(71\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(71)90027-4)
- Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M. What is a geomagnetic storm? // J. Geophys. Res.–Space. V. 99. № A4. P. 5771–5792. 1994.
<https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- Gurevich A.V. Modern problems of ionospheric modification // Radiophys Quantum Electron. V. 42. № 7. P. 525–532. 1999. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1999R&QE...42..525G/doi:10.1007/BF02677558
- Gurevich A.V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York, Heidelberg, Berlin: Springer – Verlag, 465 p. 1978.
- Mishin E., Sutton E., Milikh G., Galkin I., Roth C., Förster M. F2-region atmospheric gravity waves due to high-power HF heating and subauroral polarization streams // Geophys. Res. Lett. V. 39. № 11. L11101. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012GL052004>
- Park C.G., Helliwell R.A. The formation by electric fields of field-aligned irregularities in the magnetosphere // Radio Sci. V. 6. № 2. P. 299–304. 1971.
<https://doi.org/10.1029/RS006i002p00299>
- Streltsov A.V., Berthelier J.-J., Chernyshov A.A., Frolov V.L., Honary F., Kosch M.J., McCoy R.P., Mishin E.V., Rietveld M.T. Past, present and future of active radio frequency experiments in space // Space Sci. Rev. V. 214. № 8. P. 122. 2018.
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>
- Tadokoro H., Tsuchiya F., Miyoshi Y., Misawa H., Morioka A., Evans D.S. Electron flux enhancement in the inner radiation belt during moderate magnetic storms // Ann. Geophys. V. 25. № 6. P. 1359–364. 2007. www.ann-geophys.net/25/1359/2007/
- Walker A.D.M. Formation of whistler ducts // Planet. Space Sci. V. 26. № 4. P. 375–379. 1978.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(78\)90121-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(78)90121-6)
- Wratt D.S.J. Ionisation enhancement in the middle latitude D-region due to precipitating high energy electrons // Atmos. Terr. Phys. V. 38. № 5. P. 511–516. 1976.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(76\)90008-8](https://doi.org/10.1016/0021-9169(76)90008-8)