

Вариации характеристик радиоволн низкочастотной части декаметрового диапазона на квазивертикальных радиотрассах

К. П. Гармаш, С. Г. Леус, С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор

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

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2010 г.

Приведены результаты наблюдений за временными вариациями доплеровских спектров и амплитуд сигналов отраженных от ионосферы радиоволн частотой 3.2 и 4.2 МГц. Проанализирована суточная зависимость этих вариаций в период осеннего равноденствия. Выявлены квазипериодические и аperiodические процессы, сопровождавшие движение солнечного терминатора и периодический нагрев ионосферной плазмы мощным ВЧ радиоизлучением станда “Сура”. Периоды и амплитуды квазипериодических процессов соответствовали параметрам внутренних гравитационных волн. Включение/выключение мощного радиоизлучения сопровождалось усилением квазипериодических процессов в ионосфере, а также увеличением концентрации электронов. Последнее, скорее всего, связано со среднеширотным высыпанием высокоэнергичных электронов из магнитосферы.

Ключевые слова: солнечный терминатор, мощное радиоизлучение, аperiodические и квазипериодические процессы, среднеширотное высыпание электронов

1. Введение

Ионосфера, входящая в систему Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (СМСМИАЗ), испытывает на себе влияние потоков энергии, вещества и излучения как “сверху”, так и “снизу”, включая техногенное воздействие [1-5]. Под действием этих потоков в ионосфере возникают нестационарные процессы, являющиеся результатом взаимодействия подсистем. Они определяют состояние космической, а отчасти и атмосферной погоды, взаимодействие двух погодных систем.

Ионосфера по-прежнему остается одним из основных каналов, широко используемых при решении задач телекоммуникаций, радиолокации, радионавигации и т. п.

Изменчивость космической погоды, нестационарные процессы в системе СМСМИАЗ существенно влияют на работу радиотрасс, атмосферно-ионосферного канала телекомму-

никаций, искажают передаваемую информацию и ограничивают потенциальные возможности технических средств телекоммуникаций, радиолокации и радионавигации.

По указанным причинам изучение нестационарных процессов в системе СМСМИАЗ является актуальной задачей. Для ее решения удобными оказываются радиофизические методы исследования, основанные на анализе вариаций характеристик радиоволн, прошедших (либо отраженных, рассеянных) через изучаемую среду.

Целью настоящей работы является исследование суточных вариаций амплитудно-фазовых характеристик радиоволн на квазивертикальных радиотрассах и процессов в ионосфере, вызывающих эти вариации. Значительное внимание уделено эффектам, сопровождавшим движение солнечного терминатора и воздействие на ионосферную плазму мощного ВЧ радиоизлучения станда “Сура”. Получены количественные оценки эффектов.

Для радиофизических наблюдений выбраны две трассы, ориентированные примерно в направлении запад – восток, расстояние между радиопередающим и радиоприемным устройствами составляло около 50 км. Для изучения нестационарных процессов в E- и F-областях ионосферы выбраны соответственно частоты 3.2 и 4.2 МГц.

2. Состояние космической погоды

Состояние космической погоды накануне и в день измерений было спокойным. Во второй половине суток 20 сентября 2010 г. имело место увеличение концентрации частиц в солнечном ветре от $(1 \div 2) \cdot 10^6$ до $(8 \div 18) \cdot 10^6$ м⁻³, давления в солнечном ветре от 0.1 ÷ 0.2 до 1.6 ÷ 3.4 нПа. 21 сентября 2010 г. скорость частиц в солнечном ветре увеличилась примерно от 300 ÷ 320 до 400 ÷ 450 км/с, а их температура – от $(2 \div 4) \cdot 10^4$ до $(1 \div 1.8) \cdot 10^5$ К. Компонента V_z межпланетного магнитного поля 20–22 сентября 2010 г. флуктуировала в пределах ± 5 нТл. Значения всплесков энергетической функции Акасофу, по нашим расчетам, были менее 1 ÷ 1.5 ГДж/с.

Индекс K_p 21 сентября 2010 г. не превышал 3, а 22 сентября – 1.

21 сентября 2010 г. Dst -индекс флуктуировал в пределах от –5 до +15 нТл, а 22 сентября – от –2 до +10 нТл.

Можно утверждать, что состояние космической погоды было исключительно благоприятным для наблюдения эффектов в ионосфере, связанных с солнечным терминатором и воздействием мощного периодического ВЧ радиоизлучения.

3. Технические средства

3.1. Радиопередающая система

В качестве источника радиосигналов использовался доплеровский радар. Он расположен в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета (ХНУ) имени В. Н. Каразина вблизи с. Гайдары Харьковской области, Украина (географические координаты: 49°38′ с. ш., 36°20′ в. д.) [6]. Основные параметры радара, излучающего

радиоимпульсы вертикально вверх, следующие: диапазон частот $f = 1 \div 24$ МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства – 1 кВт, длительность импульса $\tau \approx 500$ мкс, частота повторения импульсов – 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприемного устройства – 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с коэффициентом усиления $G \approx 1 \div 10$ в зависимости от частоты волны. Отношение сигнал/помеха достигает $10^5 \div 10^6$. Радар сопряжен с персональным компьютером, образуя программно-аппаратный комплекс, ведущий измерения и предварительную обработку сигнала в реальном масштабе времени.

3.2. Приемно-обрабатывающая система

Для исследования характеристик радиоволн, отраженных от ионосферы, и нестационарных процессов в ионосферной плазме разработан комплекс пассивного радиозондирования ионосферы.

Комплекс может работать в режиме доплеровского радиозондирования с использованием радиосигналов, распространяющихся на наклонных трассах, или в режиме панорамных измерений радиопомеховой обстановки. Источником сигналов для режима доплеровского зондирования являются станции радиовещания, радионавигации, службы точного времени или немодулированное радиоизлучение специального радиопередающего устройства.

Режим панорамных измерений основан на анализе в заданном диапазоне частот статистических характеристик мощности электромагнитного поля, которое есть суперпозицией излучений радиопередающих устройств разного назначения и шумоподобных радиосигналов, генерируемых природными источниками. При этом диапазон частот выбирается относительно широким, чтобы в него с большой вероятностью попадало достаточное количество узкополосных удаленных источников радиоизлучения.

Конструктивно комплекс реализован на базе IBM-совместимого персонального компьютера с подключенным к нему блоком управления радиоприемниками синтезаторного типа P-399A (“Катран”) для приема радиосигналов в диапазоне 1 ÷ 31 МГц и P-391B2 для приема радиосигналов в диапазоне частот 30 кГц ÷ 3 МГц,

блока третьих смесителей частоты с фильтрами нижних частот и синтезатора частоты Ч6-31 в качестве общего 3-го гетеродина, а также распределителя антенного сигнала.

Опорные генераторы использованных радиоприемных устройств и синтезатора обеспечивают относительную нестабильность частотно-временных параметров комплекса не хуже $5 \cdot 10^{-8}$.

Блок управления позволяет одновременно управлять состоянием пяти радиоприемных устройств. Этот блок принимает от компьютера через согласующие интерфейсные блоки и сохраняет во внутренних регистрах плат управления бинарные коды информации, которые определяют частоту настройки соответствующего радиоприемного устройства, род его работы, ширину полосы пропускания усилителя промежуточной частоты (УПЧ), коэффициент усиления УПЧ и значение ослабления входного аттенюатора. Для управления коэффициентом усиления УПЧ на каждой плате есть десятипозиционный цифро-аналоговый преобразователь. Радиоприемные устройства работают в режиме полного дистанционного управления. Это позволяет с помощью одного радиоприемного устройства циклически производить измерения на нескольких (чаще всего до четырех) радиотрассах при сохранении достаточной разрешающей способности как по частоте, так и по времени.

К антенным входам радиоприемных устройств сигнал поступает с распределителя антенного сигнала, а с выходов их усилителей 2-й промежуточной частоты, равной 215 кГц, сигналы поступают в блок третьих смесителей частоты и фильтров нижних частот. Преобразованные и отфильтрованные низкочастотные колебания подаются на соответствующие платы управления, где с помощью установленных там 10-разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) типа Ф7077М/1 происходит их преобразование в цифровой код. Эти цифровые данные считываются компьютером, и производится их первичная обработка, результаты которой сохраняются в файле регистрации на жестком диске.

Программное обеспечение комплекса пассивного радиозондирования ионосферы включает набор тестовых программ для проверки и ремонта отдельных узлов блока управления ра-

диоприемными устройствами, измерительные программы для двух вышеупомянутых режимов работы, а также программы для обработки и анализа экспериментальных данных.

Программно-аппаратный комплекс пассивного радиозондирования ионосферы расположен в обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина вблизи с. Граково Харьковской области, Украина (географические координаты: $49^{\circ}38'$ с. ш., $36^{\circ}56'$ в. д.).

3.3. Нагревный стенд “Сура”

Нагревный стенд излучал 20 – 23 сентября 2010 г. с 15:50 до 20:40 (здесь и далее время киевское, которое отстает примерно на 20 мин от местного).

Воздействие на ионосферу осуществлялось в циклическом режиме (20 мин нагрев, 10 мин пауза) немодулированной радиоволной обыкновенной поляризации на частоте $f_1 = 4.7$ МГц (значение f_1 сначала было меньше критической частоты f_oF2 , которая в ходе эксперимента изменялась от 6.0 до 4.4 МГц). Три радиопередатчика работали синфазно, суммарная мощность P составляла около 0.5 МВт, коэффициент усиления антенны $G \approx 160$. Эффективная мощность системы $P_1G_1 \approx 80$ МВт. Были задействованы три антенные секции. Диаграмма направленности антенны ориентировалась на магнитный зенит, т. е. была наклонена к югу на 12° .

Стенд “Сура” расположен вблизи с. Васильсурск Нижегородской области, Россия (географические координаты: 56.1° с. ш., 46.1° в. д.).

4. Методики обработки и анализа характеристик радиоволн

4.1. Первичная обработка

На выходе фильтра нижних частот 3-го преобразователя частоты присутствует аналоговый сигнал в полосе частот $0 \div 300$ Гц. Он преобразуется с помощью АЦП в цифровой вид с частотой дискретизации 600 Гц, и этот поток данных поступает в компьютер, где происходит его первичная обработка в реальном масштабе времени. В процессе этой обработки последовательно производится фильтрация данных узкополосным цифровым фильтром и децимация результатов 1:15.

Для цифровой фильтрации был синтезирован оптимальный полосовой фильтр с конечной импульсной характеристикой [7]. Этому типу фильтров присуща абсолютная устойчивость к различного рода погрешностям данных, они имеют линейную фазовую характеристику и достаточно просто синтезируются по таким заданным параметрам, как длина фильтра, ширина полосы на уровнях пропускания и задержания, а также соотношение неравномерностей амплитудно-частотных характеристик в полосах пропускания и задержания. Здесь оптимальность полосового фильтра понимается в смысле максимального подавления в полосе задержания при заданных параметрах.

Синтезированный цифровой фильтр длиной 120 точек имеет ширину полосы пропускания $0.04f_n$ на уровне 0.1 (здесь f_n – частота дискретизации), центральная частота равняется $0.25f_n$, а коэффициент подавления внеполосных составляющих превышает 40 дБ. Для нашего случая $f_n = 600$ Гц, поэтому на выходе такого фильтра остается сигнал с центральной частотой 150 Гц и шириной полосы приблизительно 20 Гц.

Следующая затем децимация 1:15 преобразует его в сигнал с частотой в полосе от 0 до 20 Гц при частоте дискретизации 40 Гц. Эти данные, блоками по 512 точек (или по 12.8 с времени измерения) с описательными заголовками, сохраняются в “суточном” файле на компьютере. В заголовке каждого блока данных фиксируется время начала регистрации данного блока и частота радиосигнала. Заметим, что в “суточном” файле хранятся блоки данных, полученные со всех приемников комплекса и для всех наблюдаемых радиочастот.

Результатом первичной обработки является узкополосный ($0 \div 20$ Гц) цифровой сигнал, содержащий информацию о доплеровском смещении частоты (ДСЧ) и амплитуде отраженного сигнала (АОС).

4.2. Вторичная обработка

Вторичная обработка данных заключается в выделении из “суточного” файла блоков данных измерения на конкретной радиочастоте, получении по ним спектральных оценок

с заданными точностью и частотным разрешением, а также в выявлении основных мод радиосигнала (этими модами могут быть как различные магнитоионные компоненты, так и лучи, отражающиеся от различных ионосферных слоев). И если первая задача – техническая, то решение двух остальных имеет принципиальный характер и определяет качество конечных результатов.

Традиционно для спектрального оценивания используются различные вариации алгоритма преобразования Фурье как наиболее разработанные и легко реализуемые в настоящее время даже на аппаратном уровне. К сожалению, присущее этому преобразованию влияние функции окна на разрешающую способность по частоте не позволяет получить приемлемую оценку для наших данных. Действительно, при продолжительности записи блока данных 12.8 с разрешение по частоте будет не лучше $0.3 \div 0.4$ Гц, т. е. имеет такой же порядок, как и величина наблюдаемых в эксперименте доплеровских флуктуаций частоты отраженного от ионосферы декаметрового радиосигнала. Другой подход основан на параметрическом описании случайного процесса, который порождается суммой отраженных от ионосферы и принятых приемником радиосигналов, а конкретнее – на модели авторегрессионного процесса [8]. Эта модель хорошо описывает данные измерений при ограниченном числе сильных мод и отношении сигнал/помеха порядка или более 10. Для расчета коэффициентов авторегрессионной модели нами был реализован метод совместной минимизации квадратичных ошибок прямого и обратного линейного предсказания (модифицированный ковариационный метод [8]). Вычисленные по этим коэффициентам спектры позволяют для наших данных определять частоту моды с точностью до $0.01 \div 0.02$ Гц, а разрешение по частоте достигает $0.06 \div 0.08$ Гц.

Ширина линий в авторегрессионных спектрах, как правило, весьма мала. Поэтому проследить динамику мод на соседних спектрах, даже вычисленных с интервалом 15 с, может оказаться весьма непросто, если за это время частота моды изменится на величину, значительно превосходящую ширину линии. С дру-

гой стороны, блочная структура данных не позволяет использовать для расчетов “скольжение”, т. е. части соседних блоков, поскольку данные в них не являются непрерывными по времени и фазе. Для вычисления промежуточных спектров мы воспользовались межблочной интерполяцией авторегрессионных коэффициентов. В большинстве проанализированных нами случаев интервал времени 7.5 с между спектральными оценками уже позволяет достаточно уверенно судить о динамике модового состава. В связи с этим в процессе вторичной обработки, после расчета “базовых” спектров по имеющимся блокам экспериментальных данных, вычислялись “интерполированные” спектры с указанным интервалом времени между ними.

Автоматизированное выявление во временной последовательности спектров отдельных мод и анализ их динамики в общем случае является сложной алгоритмической задачей из области экспертных систем и теории распознавания образов. На данном этапе мы ограничились интерактивным анализом плоскости динамического спектра (или сонограммы), где по одной координате отсчитывается время измерения, по другой – частота, а амплитуда спектральной составляющей имеет цветояростное представление. Вначале оператор определяет области, где, по его мнению, присутствует “след” одной конкретной моды, а затем программа определяет ее частоту и амплитуду в каждый момент времени. Выделенные таким образом “следы” в дальнейшем подвергаются системному спектральному анализу для определения параметров волновых ионосферных возмущений.

Результатом вторичной обработки является получение динамических доплеровских спектров (ДС), временных зависимостей ДСЧ, соответствующего частотной составляющей в ДС с наибольшей энергией, и АОС.

4.3. Системный спектральный анализ

Для спектрального анализа временных зависимостей ДСЧ и АОС применялся системный подход, изложенный в работах [9-11]. ДСЧ и АОС усреднялись на интервале времени 75 с. Предварительно вычитался тренд на интервале времени 90 мин при спектраль-

ном оценивании в поддиапазонах 2.5 ÷ 30 мин и 30 ÷ 90 мин.

Использовались оконное преобразование Фурье (ОПФ), адаптивное преобразование Фурье (АПФ) и вейвлет-преобразование (ВП), имеющие вид [10, 11]:

$$Sf(T, \tau) = \sqrt{\frac{2}{t_{wS}}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{t_{wS}/2}\right) \exp\left(-i \frac{2\pi t \tau}{T}\right) dt,$$

$$Af(T_v, \tau) = \sqrt{\frac{2}{v_1 T_v}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g\left(\frac{t-\tau}{v_1 T_v/2}\right) \exp\left(-i \frac{2\pi}{T_v}(t-\tau)\right) dt,$$

$$Wf(T_v, \tau) = \sqrt{\frac{2}{v_2 T_v}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{v_2 T_v/2}\right) dt,$$

где $f(t)$ – исследуемый временной ряд, $g(t)$ – вещественная оконная функция, обладающая свойством локализованности вдоль оси времени t ; τ – параметр, описывающий смещение оконной функции относительно сигнала вдоль временной оси; t_{wS} – ширина окна для ОПФ; v_1 и v_2 – коэффициенты, равные числу периодов гармонической функции, укладываемых на ширине оконной функции в АПФ и материнского вейвлета $\psi(t)$ соответственно; T и T_v – величины, имеющие физический смысл текущих значений периода, символом “*” обозначается комплексное сопряжение.

При ОПФ и АПФ использовалось следующее окно:

$$g(t) = \gamma[0.54 + 0.46 \cos \pi t],$$

где $\gamma \approx 1.12$ – нормирующий множитель.

Для ВП в качестве материнской функции $\psi(t)$ применялся вейвлет Морле, который задается известным выражением:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2) \cos 5t.$$

Кроме спектрограмм $P_{Sf}(T, \tau) = |Sf(T, \tau)|^2$, $P_{Af}(T_v, \tau) = |Af(T_v, \tau)|^2$ и $P_{Wf}(T_v, \tau) = |Wf(T_v, \tau)|^2$, нормированных на максимальное значение, анализировались энергограммы, имеющие вид:

$$E_S(T) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{Sf}(T, \tau) d\tau,$$

$$E_A(T_v) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{Af}(T_v, \tau) d\tau,$$

$$E_W(T_v) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{Wf}(T_v, \tau) d\tau,$$

которые также нормировались на максимальное значение.

Результатом системного спектрального анализа является получение время-периодных зависимостей спектральной плотности мощности ДСЧ и АОС, а также распределений средней энергии квазипериодических процессов по периодам (энергограмм).

5. Результаты наблюдений

5.1. Временные вариации ДСЧ

Временные вариации ДС и ДСЧ радиоволн на обеих частотах в течение суток в целом были подобными (см. рис. 1–3). Незначительные отличия в ДСЧ наблюдались в период существования слоя E_S (примерно с 08:00 до 17:00). В этот период радиоволна частотой 3.2 МГц отражалась от слоя E_S . В ночное время (с 23:00 предыдущих суток до 04:00) в среднем ДСЧ было близким к нулю, наблюдались квазипериодические вариации ДСЧ с периодами $T \approx 15 \div 30$ мин. Амплитуда колебаний эпизодически достигала 0.3 Гц, но в среднем она составляла 0.15 и 0.2 Гц для частот 3.2 и 4.2 МГц соответственно. В интервале времени с 03:30 до 07:30 амплитуда колебаний ДСЧ увеличилась до $0.2 \div 0.25$ Гц. Постоянная составляющая ДСЧ при этом сначала увеличивалась, а затем уменьшалась. Ее максимальное значение, примерно равное 0.32 и 0.43 Гц соответственно для частот 3.2

и 4.2 МГц, наблюдалось в интервале времени 05:30 – 06:00.

Среднее значение ДСЧ оставалось близким к нулю в интервале времени 07:30 – 17:00. Наблюдались квазипериодические вариации ДСЧ, лучше выраженные на частоте 4.2 МГц. Их амплитуда была близка к 0.1 Гц. На частоте 3.2 МГц из-за отражения от слоя E_S временное поведение ДСЧ было скорее хаотическим.

Примерно с 17:00 до 20:40 среднее значение ДСЧ становится отрицательным. Его минимальное значение достигает -0.25 Гц для частоты 3.2 МГц около 20:00 и -0.31 Гц в то же время для частоты 4.2 МГц. На описанную усредненную временную зависимость ДСЧ накладывались квазипериодические вариации. Их амплитуда достигала наибольших значений ($0.30 \div 0.35$ Гц) в интервале времени 21:25 – 24:00. Преобладали колебания с периодом около 30 мин.

5.2. Временные вариации АОС

АОС в течение суток испытывали в определенной степени хаотические и значительные (до $5 \div 10$ раз) флуктуации. В этих флуктуациях выделялись квазипериодические вариации с периодами от 5 до 30 мин. Средние значения АОС в ночное время были примерно в $4 \div 5$ раз выше, чем в дневное, для обеих частот.

6. Результаты спектрального анализа

Приведем для примера результаты спектрального анализа временных зависимостей ДСЧ и АОС с применением ОПФ, АПФ и ВП для интервала времени 15:00 – 23:00, охватывающего периоды работы нагревного стенда (15:50 – 20:40) и наблюдения эффектов вечернего терминатора (17:00 – 20:40). Поскольку АОС изменялась значительно, анализировалась временная зависимость логарифма (натурального) нормированной амплитуды.

6.1. Временные вариации спектральных составляющих ДСЧ

Временные вариации ДСЧ для обеих частот подобны, поэтому далее опишем результаты спектрального анализа для частоты 4.2 МГц (рис. 4, 5).

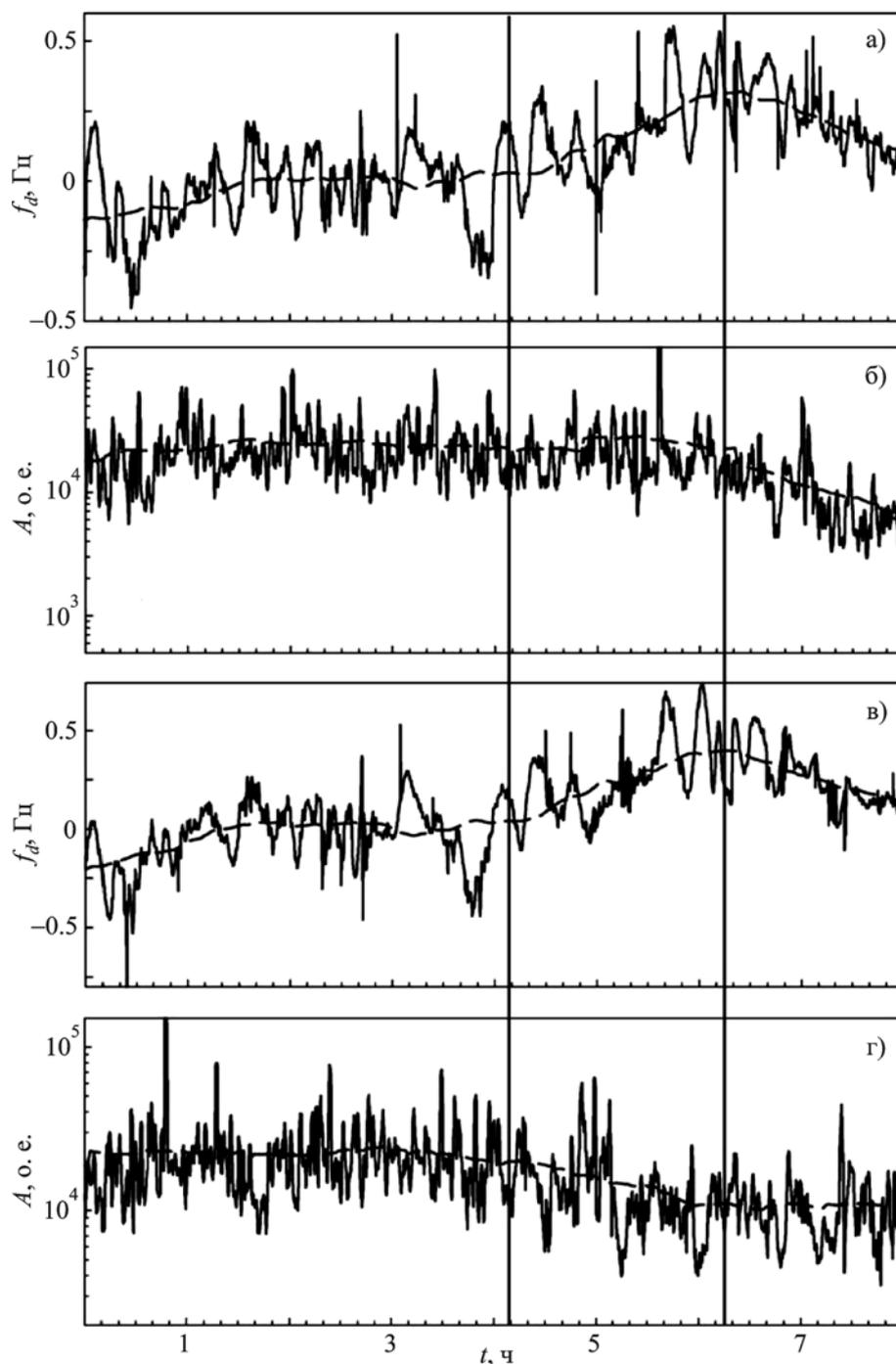


Рис. 1. Временная зависимость ДСЧ моды с наибольшей энергией зондирующей радиоволны частотой 3.2 МГц (а) и ее АОС (б), ДСЧ моды с наибольшей энергией зондирующей радиоволны частотой 4.2 МГц (в) и ее АОС (г). Пунктирные линии на графиках соответствуют усредненным на интервале 90 мин значениям. Здесь и далее вертикальными сплошными линиями показаны восход Солнца на высотах 400 и 0 км, а также заход Солнца на высотах 0 и 400 км соответственно. Эксперимент проведен 22 сентября 2010 г. с 00:00 по 08:00

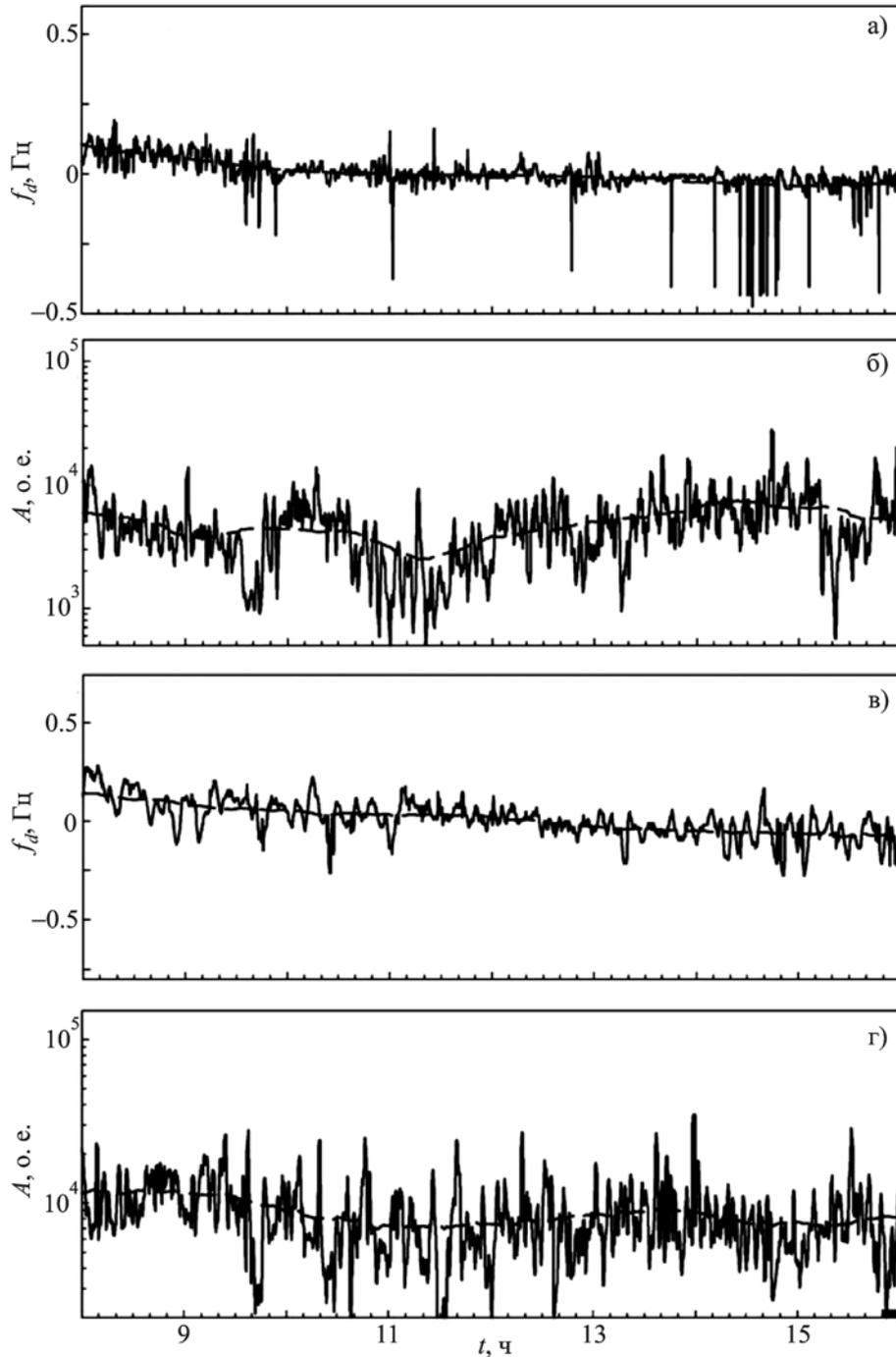


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для интервала времени 08:00 – 16:00. Здесь и далее на оси времени жирной линией показан интервал времени излучения станда “Сура”

Спектральный анализ выполнен для двух поддиапазонов: $T = 2.5 \div 30$ мин (см. рис. 4) и $T = 30 \div 90$ мин (см. рис. 5). Примерно с 16:10 в ионосфере усилились квазипериоди-

ческие процессы с периодами около 10, 20 и 30 мин. Наибольшую амплитуду имел процесс с периодом 30 мин. Она достигала примерно 0.15 Гц (см. рис. 4).

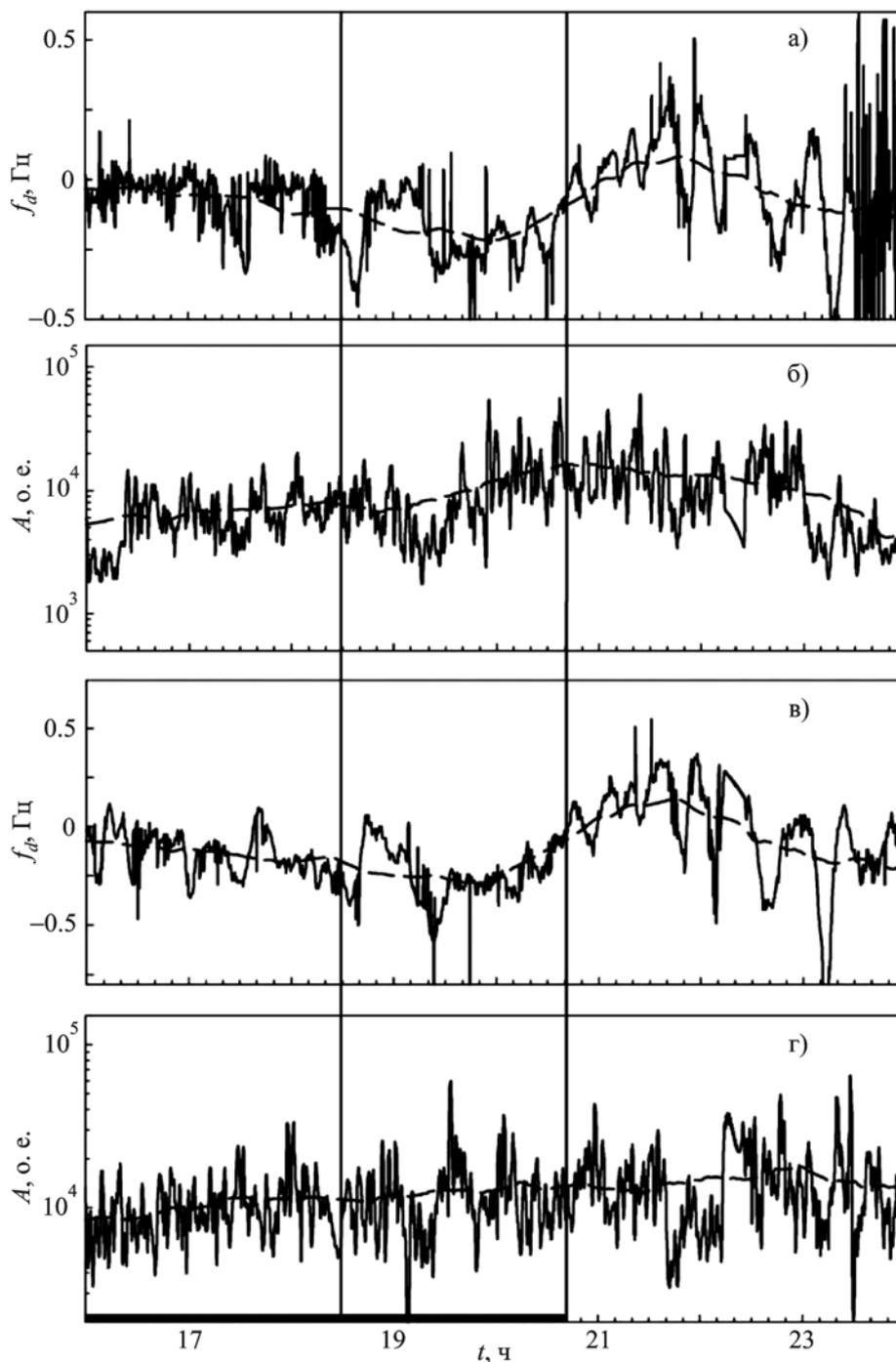


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для интервала времени 16:00 – 24:00

После 21:20 наблюдалось также усиление квазипериодических процессов с $T \approx 20 \div 30$ мин. Их амплитуда составляла около 0.30 Гц (см. рис. 4). Процесс продолжался не менее 150 мин.

Из рис. 5 видно, что значительное увеличение амплитуды квазипериодического процесса с $T \approx 65 \div 75$ мин имело место в интервале времени 17:30 – 19:30. С 22:10 до 23:30 наблюдалось усиление колебания с периодом $30 \div 35$ мин.

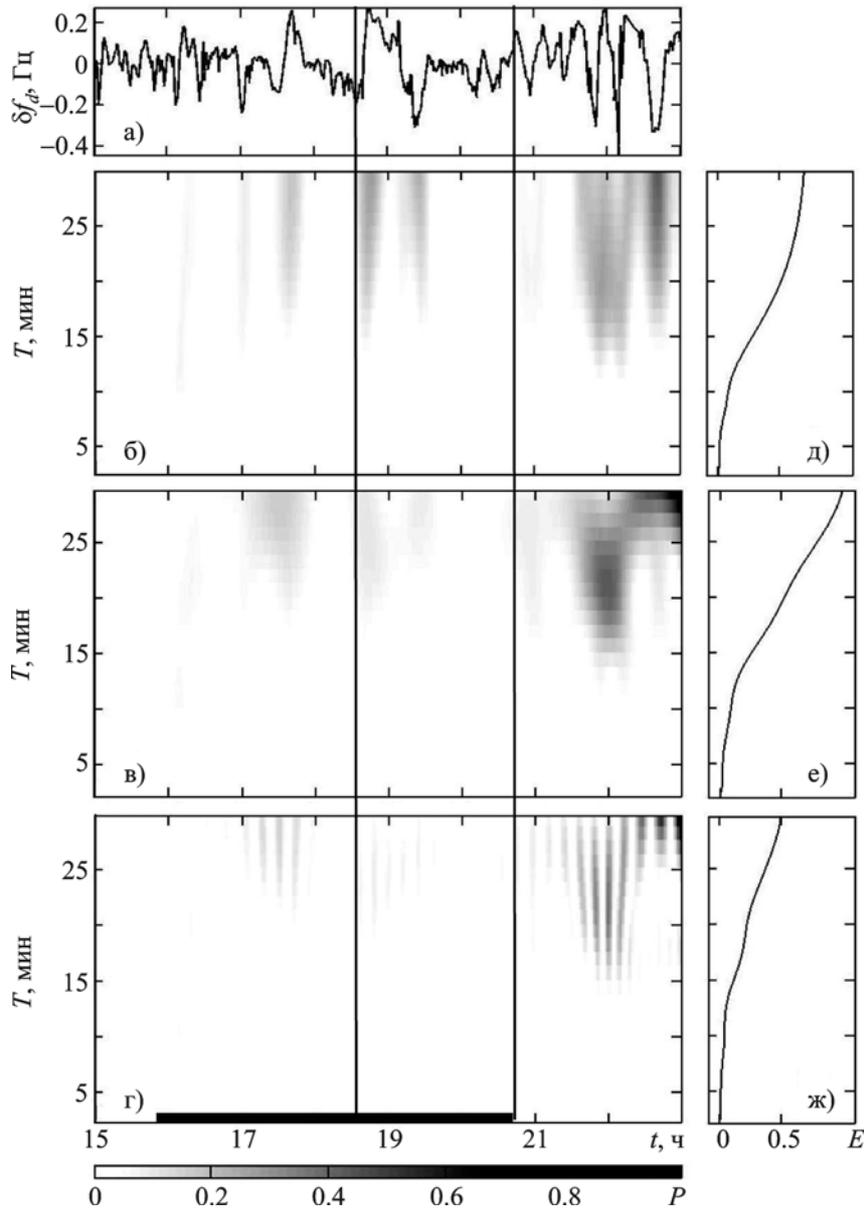


Рис. 4. Результаты спектрального анализа временных вариаций ДСЧ на частоте 4.2 МГц в поддиапазоне периодов $2.5 \div 30$ мин: а) – анализируемый сигнал; б), в), г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е), ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП

6.2. Временные вариации спектральных составляющих АОС

В интервалах времени 16:00 – 18:00 и 22:15 – 23:30 заметно усиливались процессы с периодом $5 \div 10$ мин (рис. 6). Эпизодически имело место усиление спектральных составляющих с $T = 15 \div 20$ мин. Наибольшую амплитуду, однако, имели составляющие с периодом око-

ло $30 \div 40$ мин (рис. 6, 7). Наиболее четко это проявлялось в интервале времени 17:30 – 23:30.

Из рис. 7 видно, что в интервалах времени 15:00 – 16:00, 19:00 – 20:00 и 22:00 – 23:00 имели место достаточно резкие изменения АОС. Им соответствовало резкое увеличение уровня спектральных составляющих с периодами $40 \div 60$, $30 \div 50$ и $50 \div 80$ мин соответственно.

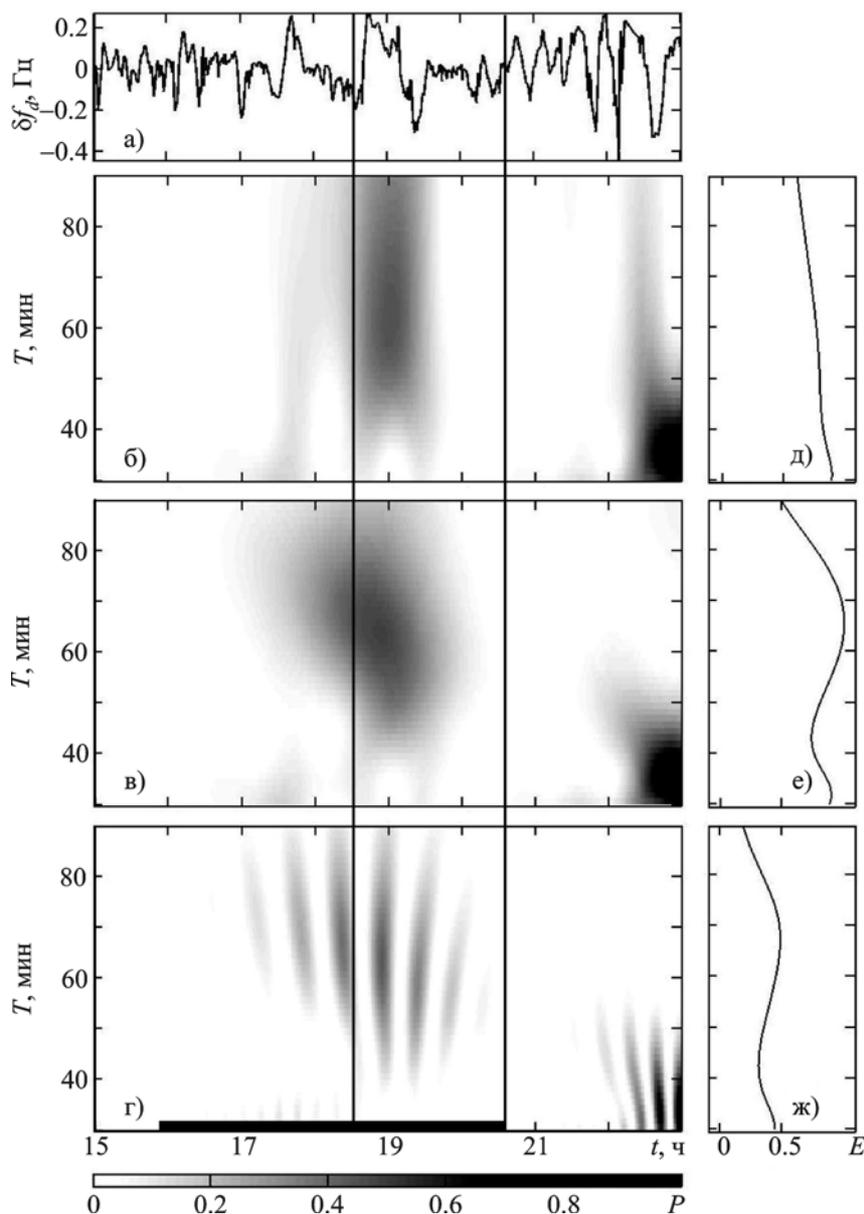


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для поддиапазона периодов 30 ÷ 90 мин

7. Обсуждение

7.1. Эффект утреннего терминатора

Восход Солнца во внешней ионосфере имел место примерно с 03:40 до 04:30, а на уровне Земли – около 06:15. Начиная с 04:30 и до 06:00 наблюдался значительный рост среднего значения ДСЧ от $f_d \approx 0$ Гц до $f_{dm} \approx 0.32$ и 0.43 Гц для частот 3.2 и 4.2 МГц соответственно. При этом высота отражения дви-

галась вниз с постепенно увеличивающейся скоростью v . Заметим, что отношение частот радиоволн равнялось приблизительно 1.31, а отношение их ДСЧ – приблизительно 1.34. Это означает, что основной вклад в эффект Доплера давали высоты, прилегающие к высоте отражения. Пренебрегая здесь и далее отличием квазивертикальных трасс от вертикальных, запишем (см., например, [12-14]):

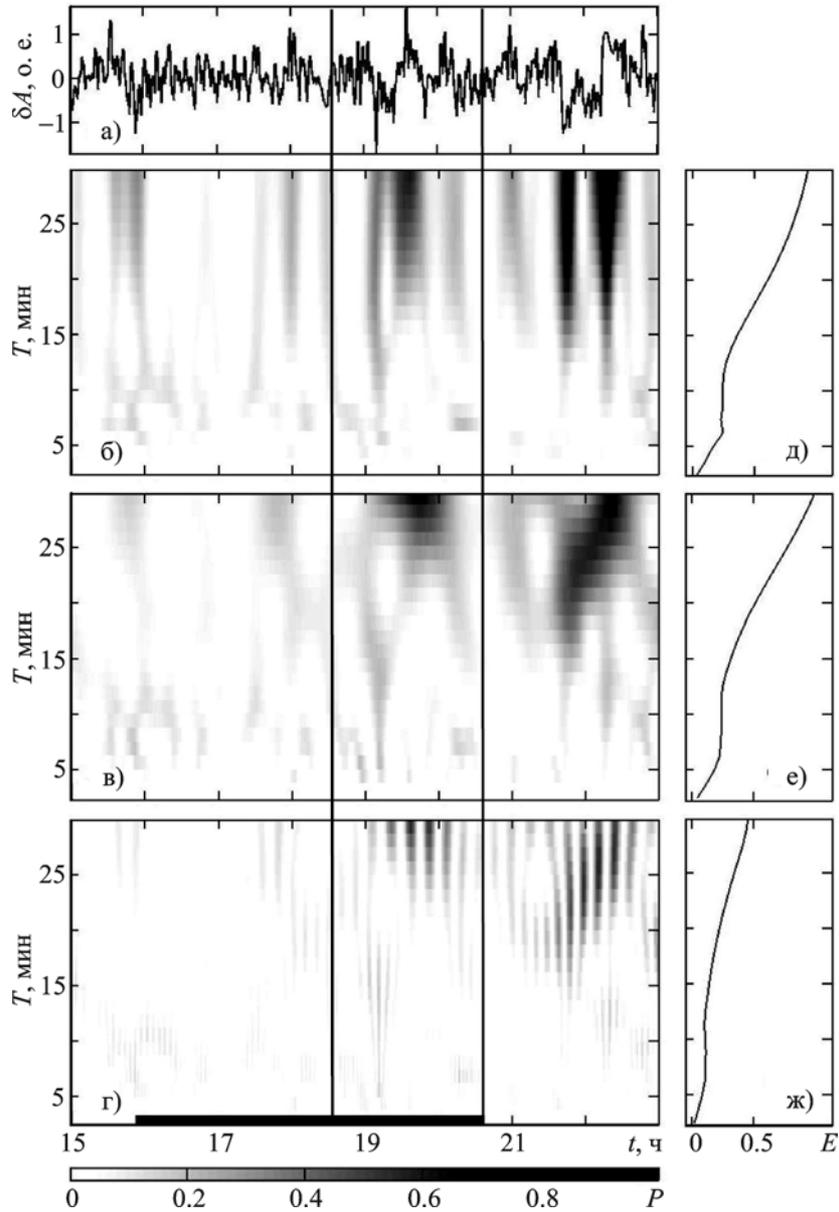


Рис. 6. Результаты спектрального анализа временных вариаций логарифма (натурального) АОС на частоте 4.2 МГц в поддиапазоне периодов 2.5÷30 мин: а) – анализируемый сигнал; б), в), г) – спектрограммы (в относительных единицах) соответственно ОПФ, АПФ и ВП; д), е), ж) – энергограммы (в относительных единицах) соответственно для ОПФ, АПФ и ВП

$$f_d = -2f \frac{v}{c}, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме. Из формулы (1) следует, что ДСЧ, равному 0.4 и 0.5 Гц

на частотах 3.2 и 4.2 МГц, соответствует максимальное значение $v_m \approx 14 \div 15$ м/с.

В интервале времени 06:00 – 09:00 среднее значение ДСЧ постепенно уменьшалось от f_{dm} практически до нуля. Опускание области отражения радиоволн длилось в основном в те-

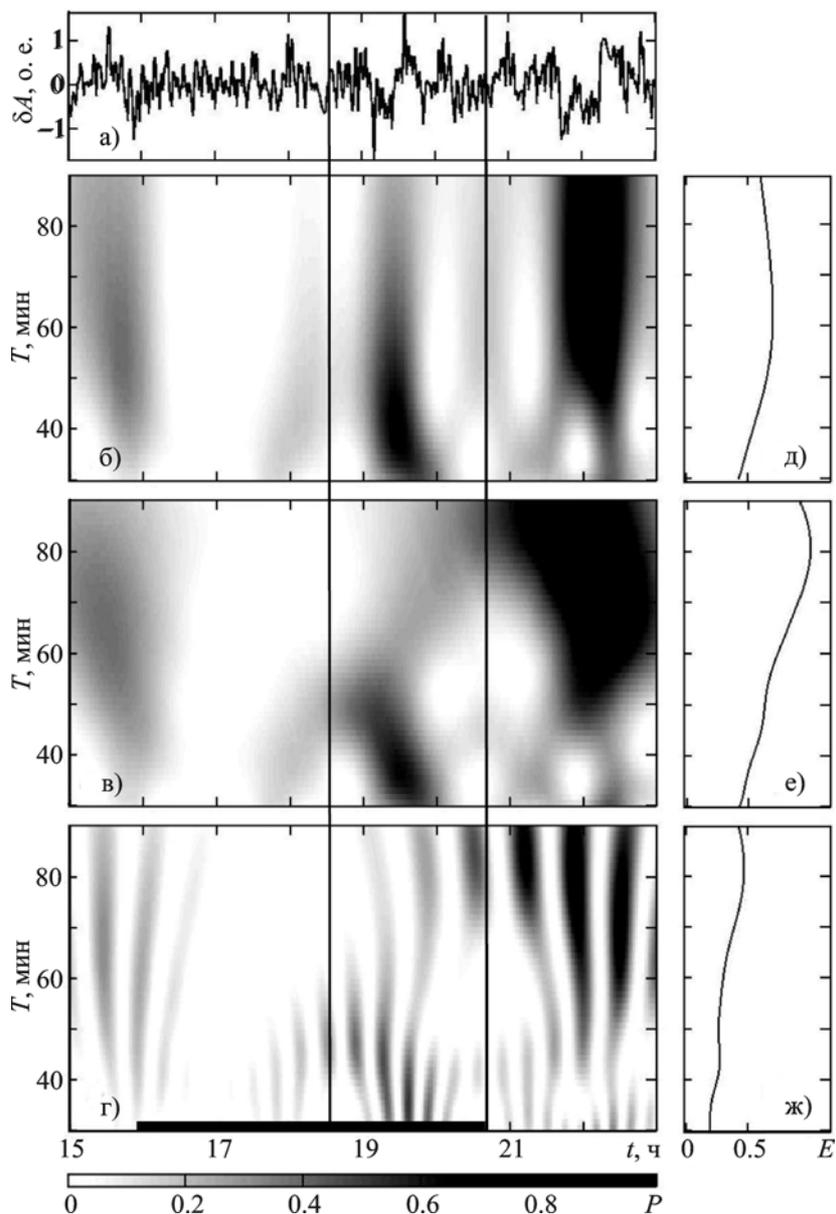


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, для поддиапазона периодов 30 ÷ 90 мин

чение времени $\Delta t \approx 220$ мин. При этом она опустилась на $\Delta z \approx v_m \Delta t / 2 \approx 100$ км.

В течение примерно 220 мин наблюдалось также усиление квазипериодических колебаний, сопровождавших движение утреннего терминатора. При этом на регулярный ход высоты отражения $z_r(t)$ накладывались ее колебания. Им соответствовала амплитуда скорости

$$v_a = c \frac{f_{da}}{2f}, \quad (2)$$

где f_{da} – амплитуда ДСЧ. При $f_{da} \approx 0.15$ Гц и $f = 3.2$ МГц из соотношения (2) имеем $v_a \approx 7.0$ м/с. Оценка v_a по ДСЧ, равному 0.20 Гц для $f = 4.2$ МГц, дает близкое значение – 7.1 м/с.

Колебания высоты отражения можно трактовать как квазипериодические изменения концентрации электронов N в ионосфере. При этом справедливо следующее приближенное соотношение [13, 14]:

$$f_{da} = \frac{2\pi\beta L}{cT} f\delta_{Na}, \quad (3)$$

где β – коэффициент, зависящий от формы высотного профиля $N(z)$ (для линейного слоя $\beta = 1.5$); L – характерный масштаб, который можно полагать равным меньшей из двух величин – L_N/β или $2H$, L_N – характерный масштаб изменения N в области отражения, H – приведенная высота нейтральной атмосферы; δ_{Na} – относительная амплитуда квазипериодических колебаний N .

Используя соотношение (3), выполним оценки δ_{Na} , например, для высоты $z = 150$ км. Определив из ионограмм $L_N \approx 60$ км и из модели MSIS (Mass Spectrometer Incoherent Scatter) масштаб $2H \approx 30$ км, полагаем $L = 2H$. Тогда для $f = 3.2$ МГц и $T \approx 20$ мин получаем $\delta_{Na} \approx 0.06$. Оценка δ_{Na} для частоты 4.2 МГц дает практически такой же результат.

7.2. Эффект вечернего терминатора

Заход Солнца на уровне Земли, на высотах 100, 200, 300 и 400 км имел место в 18:35, 19:38, 20:04, 20:25 и 20:42 соответственно.

Влияние вечернего терминатора на зависимость ДСЧ от времени проявлялось примерно с 17:00 до 20:40, т. е. в течение 220 мин. Значение ДСЧ при этом уменьшалось до -0.4 и -0.5 Гц для частот 3.2 и 4.2 МГц соответственно. Это означает, что области отражения радиоволн в течение 220 мин сместились вверх примерно на 100 км. Имел место процесс, обратный процессу, наблюдаемому при восходе Солнца.

Квазипериодические колебания ДСЧ были выражены хуже, чем в утреннее время: они были менее упорядоченными, имели меньшую амплитуду и больший период (около 30 мин). Есть основания считать, что на квазипериодические колебания, связанные с вечерним терминатором, накладывались квазипериодические процессы, генерируемые другим источником.

Скорее всего, таким источником было мощное периодическое излучение станда “Сура”.

7.3. Эффект периодического нагрева ионосферы мощным радиоизлучением

Воздействие мощного периодического радиоизлучения удаленного на 960 км станда “Сура” сопровождалось как аperiodическими, так и квазипериодическими процессами в ионосфере. Рассмотрим их отдельно.

Аperiodические вариации. Эффект высыпания частиц. Из рис. 2, 3 видно, что примерно через 10 мин после первого включения мощного периодического радиоизлучения среднее значение АОС уменьшилось в 2.7 и 3.6 раза для частот 3.2 и 4.2 МГц соответственно. Продолжительность этого эффекта была около 20 мин. Уменьшение АОС вызвано, скорее всего, увеличением концентрации электронов ниже высоты отражения радиоволн. Эффект увеличения N наблюдался нами и ранее при помощи ряда радиофизических методов (см., например, [1-5, 15-24]). Причиной увеличения N может быть среднеширотное высыпание высокоэнергичных электронов из магнитосферы, т. е. ионосферно-магнитосферно-атмосферно-ионосферное взаимодействие, обсуждавшееся в ряде работ (см., например, [25, 26]).

Выполним оценки эффекта. При уменьшении АОС в 2.7 раза на частоте 3.2 МГц имело место увеличение интегрального коэффициента поглощения радиоволны на величину $\Delta K \approx 0.5$. Для типичных моделей нижней ионосферы в дневное время расчеты интегрального коэффициента поглощения K_0 до воздействия мощного радиоизлучения дали значение $0.6 \div 0.8$. Тогда среднее по высоте относительное изменение концентрации электронов равно

$$\delta_{Np} \approx \Delta K / K_0 \approx 0.6 \div 0.8.$$

Полученное значение представляет собой оценку возмущений “снизу”, так как предполагает, что слой с дополнительной ионизацией занимает всю толщу ионосферы ниже области отражения (радиоволна при этом отража-

лась от слоя E_S , расположенного на высоте $100 \div 105$ км).

Результаты оценки потоков электронов по соотношениям из работ [25, 26] приведены в таблице. При расчетах принималось, что на всех высотах $\delta_{Np} = 0.6$, поток электронов с энергией ε близок к моноэнергетическому, толщина слоя с дополнительной ионизацией составляет 10 км, энергия ионизации равна 35 эВ, площадь высыпаний S имеет форму круга радиусом 1000 км. Учитывалась “пятнистость” структуры (точнее, фрактальность структуры) площади высыпаний путем умножения геометрической площади S на коэффициент, меньший единицы. Значение коэффициента точно не известно, поэтому для определенности считалось, что он равен 0.1.

Приведенные в таблице оценки хорошо согласуются с результатами, которые обсуждались в работах [14, 25-27].

Подобные расчеты для частоты 4.2 МГц нецелесообразны, так как радиоволна в дневное время (около 16:00) отражалась на высотах $250 \div 270$ км, т. е. значительно выше

средней высоты слоя с дополнительной ионизацией ($80 \div 100$ км). По этой же причине дополнительная ионизация в нижней ионосфере практически не сказывалась на вариациях ДСЧ.

Добавим, что примерно через 45 мин после последнего выключения стенда “Сура” также имело место уменьшение АОС на частоте 3.2 МГц в 3.2 раза, т. е. увеличение ΔK примерно на 0.6. При $K_0 \approx 0.5 \div 1$ (здесь учтено, что в ночное время волна отражалась на высоте около $200 \div 220$ км) получим, что в среднем $\delta_{Np} \approx 0.6 \div 1.2$.

Проведенные наблюдения подтверждают выводы, сформулированные в 1970 – 1980-х гг., о том, что мощное радиоизлучение приводит к увеличению концентрации электронов, скорее всего, в результате стимулированного среднеширотного высыпания высокоэнергичных электронов из магнитосферы [15, 22-24].

Квазипериодические вариации. Эффект генерации волновых возмущений. Первое включение стенда “Сура” имело место в 15:50. Первое заметное изменение характера вре-

Таблица. Параметры высыпавшихся из магнитосферы электронов

z , км	80	85	90	95	100	105	110
N_0 , M^{-3}	10^9	$3 \cdot 10^9$	10^{10}	$2 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^{10}$	10^{11}
α_r , $M^3 \cdot c^{-1}$	10^{-11}	$3 \cdot 10^{-12}$	10^{-12}	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-13}$
q_0 , $M^{-3} \cdot c^{-1}$	10^7	$2.7 \cdot 10^7$	10^8	$1.2 \cdot 10^8$	$4.8 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$
N , M^{-3}	$1.6 \cdot 10^9$	$4.8 \cdot 10^9$	$1.6 \cdot 10^{10}$	$3.2 \cdot 10^{10}$	$6.4 \cdot 10^{10}$	10^{11}	$1.6 \cdot 10^{11}$
q , $M^{-3} \cdot c^{-1}$	$2.6 \cdot 10^7$	$6.9 \cdot 10^7$	$2.6 \cdot 10^8$	$3.1 \cdot 10^8$	$1.2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^9$	$7.7 \cdot 10^9$
Δq , $M^{-3} \cdot c^{-1}$	$1.6 \cdot 10^7$	$4.2 \cdot 10^7$	$1.6 \cdot 10^8$	$1.9 \cdot 10^8$	$7.2 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^9$	$4.7 \cdot 10^9$
Π , Вт $\cdot M^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$4.7 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$8.1 \cdot 10^{-5}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$5.3 \cdot 10^{-4}$
ε , кэВ	80	60	40	30	20	15	10
p , $M^{-2} \cdot c^{-1}$	$1.4 \cdot 10^8$	$4.8 \cdot 10^8$	$2.9 \cdot 10^9$	$4.4 \cdot 10^9$	$2.5 \cdot 10^{10}$	$7.0 \cdot 10^{10}$	$3.3 \cdot 10^{11}$
P , МВт	0.6	1.5	5.6	6.5	25.1	52.7	164.3
E , ГДж	0.3	0.9	3.3	3.9	15.0	31.6	98.6

Примечание. В таблице N_0 и N – концентрация электронов в невозмущенной и возмущенной ионосфере, α_r – коэффициент рекомбинации, q_0 и q – скорости ионообразования в невозмущенной и возмущенной ионосфере, $\Delta q = q - q_0$, Π и p – плотности потока энергии и высыпавшихся частиц, P и E – суммарные мощность и энергия высыпавшихся частиц.

менных вариаций ДСЧ на частоте 4.2 МГц наблюдалось в 16:30 (см. рис. 3). Существовавшее в ионосфере квазипериодическое колебание было разрушено (см. рис. 2, 3). Около 17:00 возник квазипериодический процесс ($T \approx 30$ мин), просуществовавший до 18:00. В течение следующего часа выделялись колебания с периодами 10 и 30 мин. Амплитуда квазипериодического процесса постепенно увеличивалась и в интервале времени 20:30 – 21:00 достигла 0.2 Гц. С 21:30 до 23:30 она выросла в среднем до 0.3 Гц. Существенное увеличение амплитуды ДСЧ с $T \approx 30$ мин наблюдалось после 21:20, т. е. через 40 мин после последнего выключения стенда “Сура”.

Примерно такая же картина имело место и на частоте 3.2 МГц после исчезновения слоя E_S , т. е. в интервале времени 17:40 – 23:30. Амплитуда колебаний на этой частоте была примерно в 1.3 раза меньше, чем на частоте 4.2 МГц.

Оценим параметры волновых возмущений. Если квазипериодические вариации ДСЧ обусловлены воздействием мощного радиоизлучения стенда “Сура”, времена запаздывания этих возмущений по отношению к первому включению и последнему выключению стенда составляли около 40 мин. При расстоянии между стендом и серединой радиотрассы зондирующей волны $R \approx 960$ км имеем скорость распространения возмущений, примерно равную 400 м/с.

В спектре волновых возмущений преобладали составляющие с периодом $T \approx 30$ мин. Именно таким был период цикла периодического излучения стенда “Сура”.

Амплитуды ν_a и δ_{Na} можно оценить из соотношений (2) и (3). Например, для $z \approx 300$ км при $f_{da} \approx 0.3$ Гц, $T \approx 30$ мин, $H \approx 50$ км и $f = 4.2$ МГц получаем $\nu_a \approx 11$ м/с, $\delta_{Na} \approx 0.08$.

Значения оцененных параметров квазипериодических процессов, сопровождавших функционирование стенда “Сура”, позволяют утверждать, что эти процессы вызваны работой стенда (как его включением, так и выключением).

Квазипериодические процессы представляют собой перемещающиеся ионосферные

возмущения (ПИВ) в результате генерации (усиления) в нейтральной атмосфере внутренних гравитационных волн (ВГВ) [28, 29].

Заметим, что в интервале времени 18:00 – 20:00 квазипериодические процессы с $T \approx 30$ мин были значительно ослаблены взаимным влиянием эффектов солнечного терминатора и радиоизлучения стенда “Сура”.

Проведенные исследования подтвердили факт генерации (усиления) ВГВ под действием мощного периодического радиоизлучения, обнаруженный ранее при помощи сети ионозондов, вертикального доплеровского зондирования, метода некогерентного рассеяния и других радиофизических методов [16-23, 30].

Судя по амплитуде наблюдаемых квазипериодических процессов, механизм генерации или усиления ВГВ отличается от механизмов, описанных в [31, 32]. В будущем предстоит выяснить, в чем заключается этот механизм. Сейчас отметим, что в работах [31, 32] не учитывались аномальный нагрев плазмы в области верхнегибридного резонанса и эффект магнитного зенита.

8. Выводы

Изучены вариации характеристик радиоволн низкочастотной части декаметрового диапазона на квазивертикальных радиотрассах и реакция ионосферных E- и F-областей на движение солнечного терминатора, а также воздействие мощного периодического радиоизлучения стенда “Сура”.

1. Показано, что утренний терминатор приводит к движению вниз области отражения радиоволны с максимальной скоростью около 15 м/с. Область отражения радиоволны низкочастотной части декаметрового диапазона смещается вниз при этом примерно на 100 км.

2. Вечерний терминатор приводит к обратному эффекту – движению области отражения вверх примерно с той же скоростью и смещению области отражения вверх примерно на такую же величину.

3. Продолжительность реакции ионосферы на прохождение как утреннего, так и вечернего терминаторов составляла около 220 мин.

4. Движение терминаторов сопровождалось генерацией (усилением) квазипериодических

процессов с периодами $10 \div 30$ мин. Амплитуда колебаний скорости движения области отражения составляла около 7 м/с. Значение относительной амплитуды возмущений концентрации электронов вблизи области отражения радиоволны было близко к 0.06. Наблюдаемые квазипериодические процессы относятся к проявлению ПИВ (ВГВ).

5. Подтверждено, что мощное периодическое радиоизлучение способно генерировать (усиливать) квазипериодические процессы с периодами в десятки минут. Относительная амплитуда вариаций концентрации электронов может составлять от нескольких единиц до 8 %. Характерная скорость распространения возмущений равнялась приблизительно 400 м/с.

Важно, что квазипериодические процессы генерировались как при включении мощного станда, так и при его выключении.

6. Подтверждено, что при включении мощного радиоизлучения может возникать увеличение концентрации электронов (поглощения радиоволн) на расстояниях ~ 1000 км от нагревного станда. Скорее всего, мощное радиоизлучение стимулирует среднеширотное высыпание энергичных частиц из магнитосферы. Относительное увеличение концентрации электронов может достигать $0.6 \div 0.8$ и более. Продолжительность высыпаний может составлять десятки минут.

По-видимому, выключение мощного радиоизлучения также стимулирует эффекты, подобные тем, что имеют место при его включении.

Авторы благодарны В. П. Урядову (НИРФИ, г. Нижний Новгород, Россия) за возможность участия в экспериментах со стандом "Сура".

Литература

1. Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т.8, №1. – С. 59-106.
2. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія. – 2003. – Т. 9, №5/6. – С. 96-105.
3. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 1 // Нелинейный мир. – 2006. – Т. 4, №12. – С. 655-697.
4. Черногор Л. Ф. Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера как открытая динамическая нелинейная физическая система. 2 // Нелинейный мир. – 2007. – Т. 5, №4. – С. 198-231.
5. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2008. – 528 с.
6. Костров Л. С., Розуменко В. Т., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование естественно-возмущенной средней ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 1999. – Т. 4, №3. – С. 209-226.
7. Рабинер Л., Гоулд М. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
8. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
9. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Адаптивное преобразование Фурье // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 10, №10. – С. 39-49.
10. Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических процессов в геокосмосе // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – №11. – С. 3-24.
11. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, №5. – С. 681-702.
12. Намазов С. А., Новиков В. Д., Хмельницкий И. А. Доплеровское смещение частоты при ионосферном распространении декаметровых радиоволн // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т. 18, № 4. – С. 473-500.
13. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Статистические характеристики доплеровских спектров радиосигналов, отраженных от естественно-возмущенной ионосферы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, №1. – С. 24-38.
14. Черногор Л. Ф. Волновой отклик ионосферы на частное солнечное затмение 1 августа 2008 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т. 50, № 3. – С. 361-376.
15. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. Возникновение крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением // Компьютерная оптика. – 1989. – Вып. 6. – С. 62-71.

16. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Изучение методом вертикального зондирования реакции ионосферы на воздействие мощного радиоизлучения // Вестник Харьковского университета. Сер. Радиофизика и электроника. – 1988. – №318. – С. 29-30.
17. Черногор Л. Ф. Статистические характеристики крупномасштабных возмущений в ионосфере, инициируемых воздействием мощного нестационарного излучения // Геомагнетизм и аэрономия. – 1989. – Т. 29, №3. – С. 513-515.
18. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Исследование глобальных и крупномасштабных возмущений в ионосфере с помощью сети ионозондов // Космическая наука и техника. – 1989. – Вып. 4. – С. 72-75.
19. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А., Леус С. Г., Петров М. С., Похилько С. Н., Черногор Л. Ф., Юрин К. И. Влияние искусственных возмущений в нижней ионосфере, инициируемых мощным нестационарным радиоизлучением, на характеристики радиосигналов // Труды НИИР. – М.: Радио и связь. – 1989. – №9. – С. 57-60.
20. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. Кажущиеся скорости распространения возмущения в околоземном космосе // Космическая наука и техника. – 1990. – Вып. 5. – С. 71-74.
21. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. Доплеровское радиозондирование крупномасштабных волновых возмущений в ионосфере, генерируемых мощным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. – 1990. – Т. 30, №1. – С. 159-161.
22. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // ЗР. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – №6. – С. 17-40.
23. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Электромагнитные и геофизические эффекты в околоземной плазме, стимулированные воздействием мощного радиоизлучения // Электромагнитные явления. – 1998. – Т.1, №1. – С.90-110.
24. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 36, №2. – С. 75-81.
25. Chernogor L. F., Garmash K. P., Rozumenko V. T. Flux parameters of energetic particles affecting the middle latitude lower ionosphere // Radifizika i Radioastronomia. – 1998. – Vol. 3, No. 2. – P. 191-197.
26. Черногор Л. Ф. Фазовые вариации километровых радиоволн, сопутствовавшие воздействию на ионосферу мощного радиоизлучения // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, №4. – С. 377-389.
27. Davies K. Ionospheric radio. – London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. – 580 p.
28. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. – М.: Мир, 1978. – 532 с.
29. Григорьев Г. И. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Земли (Обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. – 1999. – Т. 42, №1. – С. 3-25.
30. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. Вариации параметров рассеянных сигналов и ионосферы, сопутствовавшие воздействию на плазму мощного радиоизлучения // Известия вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52, №11. – С. 859-880.
31. Григорьев Г. И. О перемещающихся ионосферных возмущениях, возникающих при работе мощных передатчиков // Изв. вузов. Радиофизика. – 1975. – Т.18, №12. – С. 1801-1805.
32. Григорьев Г. И., Трахтенгерц В. Ю. Излучение внутренних гравитационных волн при работе мощных нагревных стенов в режиме временной модуляции ионосферных токов // Геомагнетизм и аэрономия. – 1996. – Т. 39, №6. – С. 90-94.

**Варіації характеристик радіохвиль
низькочастотної частини
декаметрового діапазону
на квазівертикальних радіотрасах**

**К. П. Гармаш, С. Г. Леус,
С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор**

Наведено результати спостережень за часовими варіаціями доплерівських спектрів і амплітуд сигналів відбитих від іоносфери радіохвиль частотою 3.2 і 4.2 МГц. Проаналізовано добову залежність цих варіацій у період осіннього рівнодення. Виявлено квазіперіодичні й аперіодичні процеси, що супроводжували рух сонячного термінатора та періодичне нагрівання іоносферної плазми потужним ВЧ радіовипромінюванням стенов “Сура”. Періоди й амплітуди квазіперіодичних процесів відповідали параметрам внутрішніх гравітаційних хвиль. Увімкнення/вимкнення потужного радіовипромінювання супроводжувалося підсиленням квазіперіодичних процесів у іоносфері, а також збільшенням концентрації електронів. Останнє, найімовірніше, пов’язане з середньоширотним висипанням високоенергійних електронів із магнітосфери.

Variations of Radio Wave Characteristics in Low-Frequency Portion of Decameter Wavelengths at Quasi-Vertical Incidence

**K. P. Garmash, S. G. Leus,
S. V. Panasenko, and L. F. Chernogor**

Observations of temporal variations in the spectra of Doppler shift in 3.2-MHz and 4.2-MHz radio waves reflected from the ionosphere are presented. The diurnal variation of such observations made around an autumn equinox has been analyzed. Quasi-periodic and aperiodic processes associated with the solar terminator and with ionospheric heating by high-power HF periodic transmissions from the SURA facility have been detected. The periods and amplitudes of quasi-periodic processes agree with the parameters of internal gravity waves. The on/off switching of the high-power transmission is associated with an enhancement of quasi-periodic processes acting in the ionosphere, as well as with an electron density increase. The latter is most likely associated with energetic electron precipitation from the magnetosphere at midlatitudes.