

УДК 533.951+537.868

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В *E*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, СТИМУЛИРОВАННЫЕ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Л. Ф. Черногор^{1,2}, И. Ф. Домнин¹, С. В. Панасенко¹, В. П. Урядов³

¹ Институт ионосферы, г. Харьков;

² Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

³ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Описаны результаты наблюдений возмущений в ионосфере на высотах 100÷140 км, возникающих на расстоянии около 1 000 км от места расположения нагревного стенда «Сура». Наблюдения выполнены при помощи харьковского радара некогерентного рассеяния. Воздействию мощного радиоизлучения сопутствовало увеличение концентрации электронов на 10÷70 % в течение 10÷20 мин. Время развития возмущений составляло около 10 мин. Наблюдаемый эффект объясняется активизацией взаимодействия подсистем в системе ионосфера—магнитосфера—верхняя атмосфера—ионосфера, приводящей к высыпанию энергичных электронов из магнитосферы. Оценены параметры высыпающихся частиц и производимой ими ионизации.

ВВЕДЕНИЕ

Воздействию мощного радиоизлучения на околоземную плазму уделялось и уделяется большое внимание [1–8]. При этом, как правило, исследуются возмущения в среде, возникающие в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда. Такие возмущения являются локализованными, их размер составляет порядка 10÷100 км.

Особый интерес представляет изучение возмущений в околоземной плазме, распространяющихся на расстояния 100÷1 000 км от места воздействия мощного радиоизлучения. Эти возмущения были обнаружены в 1970-е годы и были названы крупномасштабными. Обзор результатов исследования крупномасштабных возмущений в ионосферной плазме, проведенных в 1970–1990-е годы, выполнен в работах [9–11].

В *F*-области ионосферы крупномасштабные возмущения обычно представляют собой перемещающиеся ионосферные возмущения, связанные с генерацией и распространением акустико-гравитационных волн в верхней атмосфере. Возможность генерации таких волн предсказана в теоретических работах [12–14]. Первые результаты наблюдений перемещающихся ионосферных возмущений при помощи ряда радиофизических методов описаны в работах [15–20]. Чаще всего перемещающиеся ионосферные возмущения имели периоды 15÷40 мин и скорость распространения около 0,3÷0,6 км/с для высот $z \approx 150\div 300$ км. Амплитуда относительных возмущений концентрации электронов $\delta N = \Delta N/N \approx 0,01$.

Результаты последних исследований перемещающихся ионосферных возмущений, генерируемых под действием радиоизлучения нагревного стенда «Сура», представлены в работах [21–24].

Исследование возмущений в нижней ионосфере (в *D*- и *E*-областях) проводилось с помощью методов частичных отражений, ионозондов и сигналов ОНЧ диапазона (см., например, [9–11]). Оказалось, что процессы в нижней ионосфере и *F*-области ионосферы существенно различались. Возмущения в нижней ионосфере были аперриодическими, их появление существенно зависело от состояния космической погоды и режима работы нагревного стенда. Время развития возмущений изменялось в пределах 5÷15 мин в зависимости от состояния геокосмической среды и режима

излучения. Возмущения могли возникать не при первом цикле периодического нагрева плазмы, т. е. имел место эффект накопления; также возмущения могли заканчиваться до выключения нагревного стенда, т. е. наблюдался эффект истощения. В ряде случаев новые всплески возмущений возникали при переключении мощности или выключении нагревного стенда, т. е. имел место эффект переключения.

Для подтверждения ранее обнаруженных особенностей крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере и установления новых закономерностей целесообразно привлечение дополнительных методов диагностики этих возмущений. Одним из наиболее эффективных методов исследования ионосферы в спокойных и возмущенных условиях является метод некогерентного рассеяния.

Целью настоящей работы является исследование крупномасштабных (порядка 1000 км) возмущений в нижней ионосфере при помощи харьковского радара некогерентного рассеяния.

1. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЙ

1.1. Состояние космической погоды

20–23 сентября 2010 года состояние космической погоды было благоприятным для наблюдения эффектов воздействия на ионосферную плазму мощного радиоизлучения. Индекс K_p изменялся от 0 до 2. Вариации индекса D_{st} находились в пределах от -4 до 23 нТл. Особенно спокойной космическая погода была вечером 20, 21 и 22 сентября. Лишь вечером 23 сентября индекс D_{st} достигал 23 нТл. Его росту предшествовало увеличение концентрации частиц в солнечном ветре от $(1 \div 2) \cdot 10^6$ до $(10 \div 15) \cdot 10^6$ м $^{-3}$. Вечером этого же дня скорость частиц солнечного ветра увеличилась с 350 до 400 м/с, а температура этих частиц возросла от $0,5 \cdot 10^5$ до $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^5$ К. При этом значение функции Акасофу выросло на порядок (от 1 до 10 ГДж/с).

1.2. Нагревный стенд «Сура»

Эксперимент проводился в вечернее время 20–23 сентября 2010 года. 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, а затем больше критической частоты f_{oF_2} , которая в интервале времени 12:00–18:00 UT изменялась примерно от 6 до 4,5 МГц). Воздействие на ионосферу начиналось в 12:50, а заканчивалось в 17:40 UT (23 сентября стенд «Сура» работал до 19:10 UT). Три радиопередатчика работали синфазно, суммарная мощность P составляла 0,5 МВт, коэффициент усиления антенны $G \approx 160$. Эффективная мощность системы $P_1 G_1 \approx 80$ МВт. Диаграмма направленности антенны была наклонена к югу на 12° .

Географические координаты стенда «Сура» следующие: $56,1^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д.

1.3. Средства наблюдения

1. Радар некогерентного рассеяния. Радар расположен в Ионосферной обсерватории Института ионосферы НАН и МОН Украины вблизи г. Харькова, Украина ($49^\circ 36'$ с. ш., $36^\circ 18'$ в. д.). Основные параметры радара следующие: частота 158 МГц, диаметр зенитной параболической антенны 100 м, эффективная площадь антенны около 3700 м 2 , коэффициент усиления антенны около 10^4 , ширина основного лепестка диаграммы направленности антенны около 1° , импульсная мощность радиопередающего устройства составляла 1,8 МВт, длительность импульсов

$\tau_p = 135$ мкс, частота следования импульсов $F = 24,4$ Гц. Полоса пропускания фильтра радиоприёмного устройства составляет 6 кГц.

2. Ионозонд Института ионосферы. Модернизированный ионозонд «Базис» предназначен для общего контроля состояния ионосферы вблизи г. Харькова и калибровки мощности сигналов некогерентного рассеяния. Ионозонд расположен в Ионосферной обсерватории рядом с радаром некогерентного рассеяния.

1.4. Методы обработки

Сначала на интервале времени $\Delta T_0 = 1$ мин были найдены базовые оценки мощности шума P_{n0} и мощности сигнала $P_{s0} = P_{sn0} - P_{n0}$ для каждой высоты, здесь P_{sn0} — мощность смеси сигнал+шум. Как известно, такое значение ΔT_0 намного превосходит интервал корреляции как мощности P_{sn} , так и P_n (оба интервала порядка 10^{-4} с).

Затем были вычислены скользящие средние значения мощностей P_{s1} и P_{n1} по $n_1 = 120$ отсчётам (тренды во временных зависимостях $P_{s1}(t)$, $P_{n1}(t)$), т. е. $P_{s1} = \langle P_{s0} \rangle$ и $P_{n1} = \langle P_{n0} \rangle$ (угловыми скобками обозначен результат усреднения), и разность между P_{s0} и P_{s1} :

$$\langle P_{s0} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_1} P_{s0}(i), \quad \delta P_{s1} = P_{s0} - \langle P_{s0} \rangle.$$

При этом отношение сигнал/шум $q = P_{s1}/P_{n1}$.

Далее вычислялось скользящее среднее δP_{s1} по $n_2 = 5$ отсчётам:

$$\delta P_{s2} = \langle \delta P_{s1} \rangle = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \delta P_{s1}(i).$$

Представляет интерес оценка относительных вариаций электронной концентрации $\delta N = \Delta N/N_0$, где ΔN — её абсолютные вариации:

$$\delta N \approx \delta P_{s2}/P_{s1}.$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Временные вариации $\delta N(t)$ на различных высотах представлены на рис. 1–4.

Из рис. 1 видно, что 20 сентября 2010 года в течение первых двух циклов включения нагревного стенда вариации δN не превышали $\pm 0,05$, что находилось в пределах естественных флуктуаций и погрешности оценки δN . Примерно через 10 мин после начала третьего цикла нагрева значение δN сначала увеличилось, а затем уменьшилось. Продолжительность всплеска δN была около $10 \div 20$ мин для высот $120 \div 130$ км соответственно. Максимальные значения $\delta N_{\max}$ для высот $100 \div 110$ км достигали 0,60. В течение 4-го, 5-го и 6-го циклов нагрева подобный эффект не наблюдался. Значительный эпизодический рост δN также имел место в интервале времени $15:30 \div 16:30$, но он не коррелировал с включением мощного стенда. В это время в ионосфере наблюдался заход Солнца. Скорее всего, с этим и были связаны упомянутые всплески δN . После прохождения вечернего солнечного терминатора в течение девятого цикла нагрева на высотах 100; 110 и 120 км также отмечались всплески δN , имеющие время запаздывания порядка 10 мин. Их амплитуда составляла 0,55; 0,60 и 0,20 для указанных высот соответственно. В течение десятого цикла нагрева подобные возмущения отсутствовали.

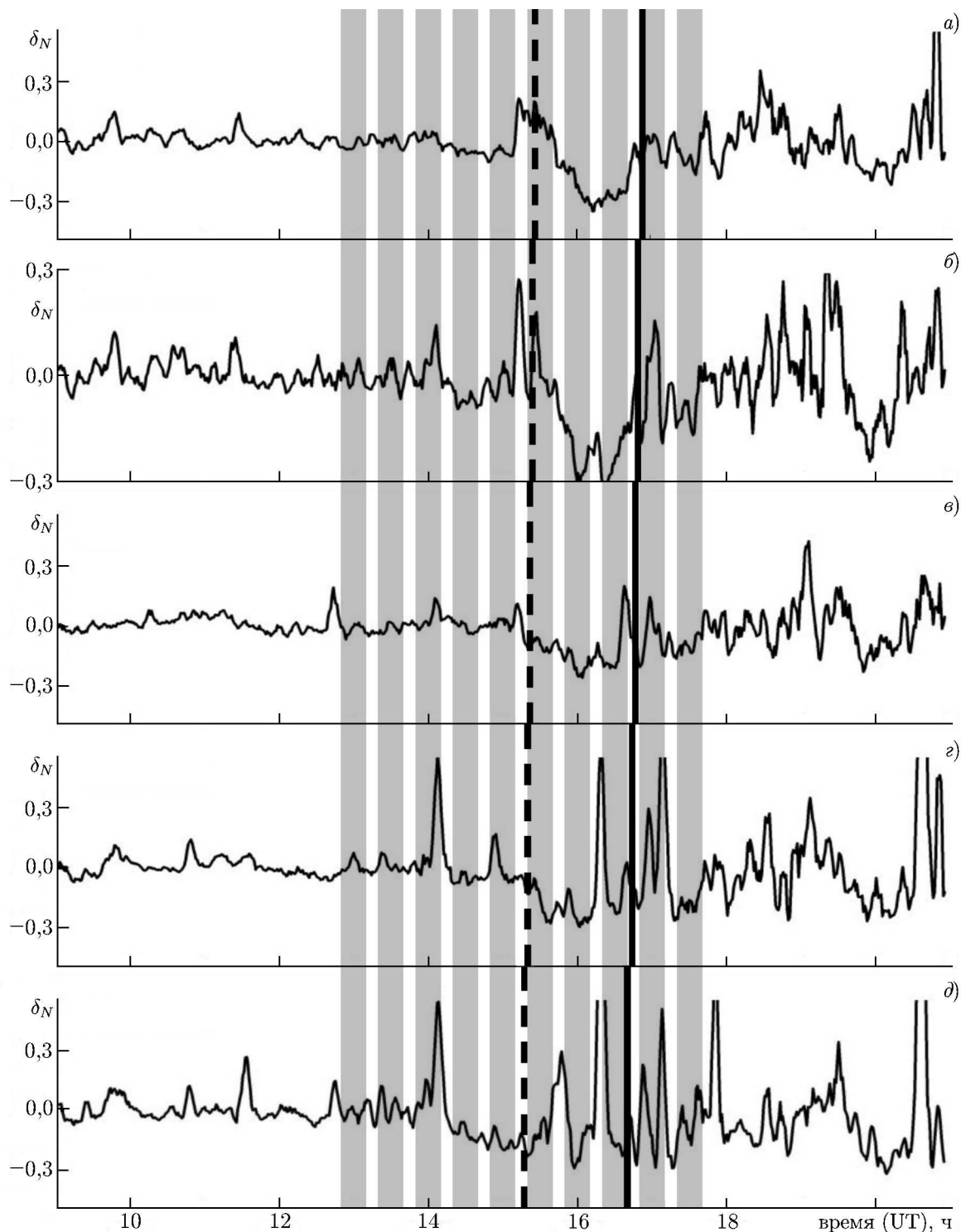


Рис. 1. Временные зависимости относительных вариаций электронной концентрации для 20 сентября 2010 года в диапазоне периодов 5÷120 мин на высотах 140 км (а), 130 км (б), 120 км (в), 110 км (г), 100 км (д). Затенёнными полосами обозначены интервалы времени работы стенда «Сура». Сплошными и штриховыми вертикальными линиями показаны моменты прохождения солнечного терминатора над пунктом наблюдения и над магнитосопрежённой областью соответственно

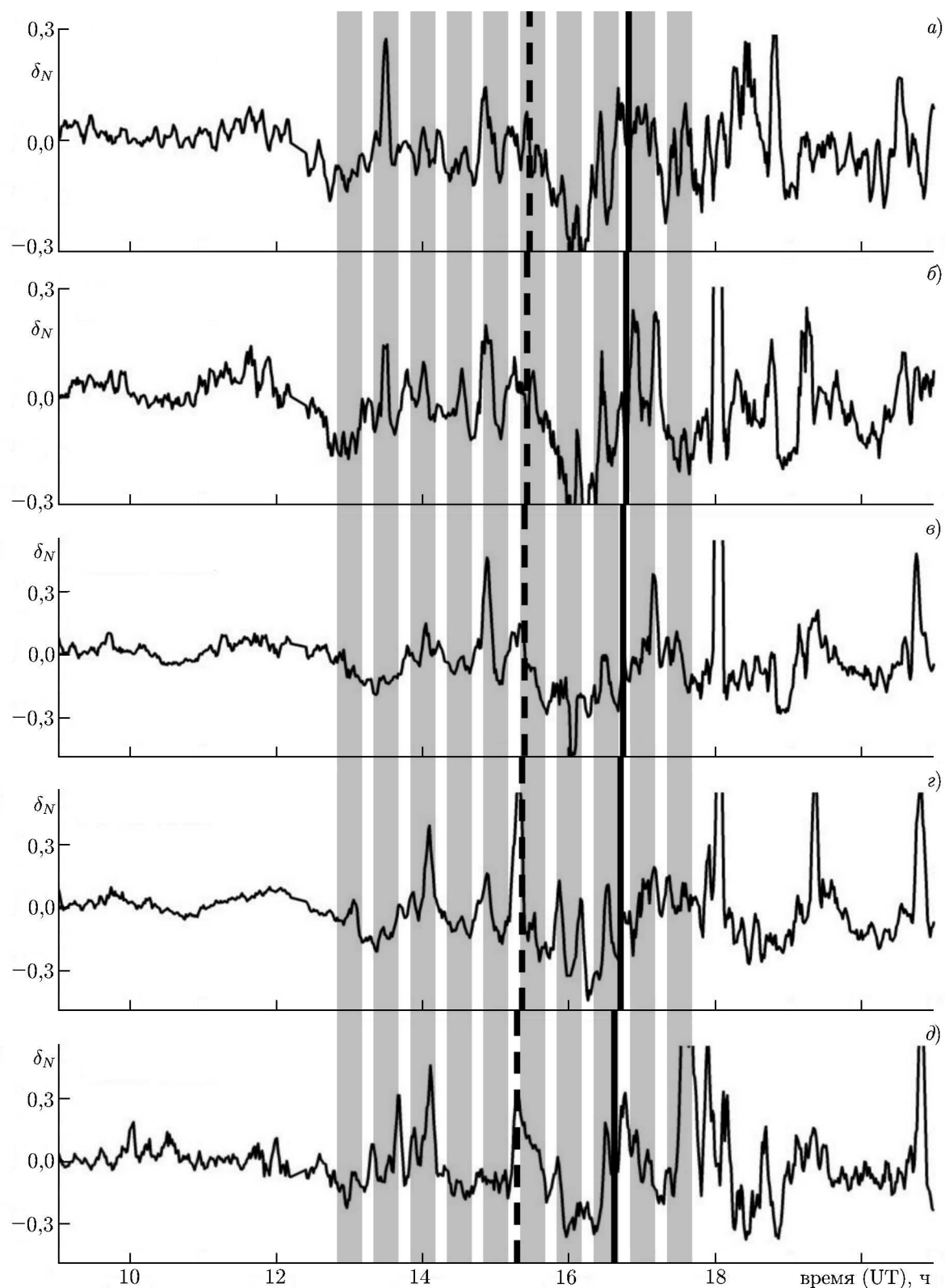


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для 21 сентября 2010 года

21 сентября 2010 года аналогичные возмущения δ_N на высоте 100 км наблюдались во втором, третьем и десятом циклах включения нагревного стенда, на высоте 110 км — в течение третьего цикла, а на высоте 120 км — в течение третьего, пятого и девятого циклов. На высотах 130 и 140 км заметный рост δ_N имел место в течение второго цикла нагрева (см. рис. 2). Времена запаздывания и максимальное значение $\delta_{N\max}$ были примерно такими же, как и 20 сентября.

23 сентября 2010 года всплески δ_N на высотах 100 и 110 км возникали в течение первого, второго, четвёртого и десятого циклов включения нагревного стенда, на высотах 120 и 130 км — в течение второго, девятого и десятого циклов. На высоте 140 км вариации δ_N были незначительными (см. рис. 3). Наиболее сильными эти всплески были на высоте 100 км, значения $\delta_{N\max}$ достигали 0,70. Времена запаздывания для всех циклов были порядка 10 мин, а их продолжительность — около 15÷20 мин.

В контрольные дни в сентябре 2007–2010 годов подобные всплески отсутствовали. Для примера на рис. 4 приведены временные вариации δ_N для 26 сентября 2007 года. Значительные всплески наблюдались лишь на высоте 100 км во время движения через ионосферу вечернего солнечного терминатора, а также вскоре после его прохождения.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Основные параметры крупномасштабных возмущений

До включения нагревного стенда наблюдались знакопеременные вариации δ_N , однако их амплитуда, время проявления и продолжительность были случайными. Такие вариации следует признать флуктуациями уровня δ_N . Среднее квадратичное отклонение этих флуктуаций было близко к 0,05.

В течение отдельных циклов включения нагревного стенда амплитуда δ_N достигала 0,6÷0,7. Важно, что $\delta_N > 0$, т. е. концентрация электронов N увеличивалась. Наибольшие значения δ_N имели место на высоте 100 км. Синхронные всплески δ_N на высотах 120 и 140 км были в 3÷4 и 6÷7 раз меньше, чем на высоте 100 км (см. рис. 3).

Всплески δ_N чаще возникали при втором и третьем включениях стенда. Лишь 23 сентября 2010 года величина δ_N достигла 0,4 в течение первого цикла нагрева. В этом состоял эффект накопления. Для срабатывания механизма увеличения электронной концентрации N требовалось затратить определённую энергию, перевести систему в нестабильное состояние. Тогда в следующем цикле нагрева происходило выделение запасённой в ней энергии, наблюдаемое как увеличение электронной концентрации N в нижней ионосфере.

Время запаздывания всплесков δ_N во всех циклах было близко к 10 мин, а продолжительность составляла 10÷20 мин.

Всплески δ_N не наблюдались в циклах нагрева, которые попадали в интервал времени между прохождениями вечернего солнечного терминатора в ионосфере в магнитосопряжённой области и в месте наблюдения. Разумеется, в этом интервале времени вариации δ_N возникали, но они были знакопеременными и не коррелировали с включением нагревного стенда.

После прохождения солнечного терминатора в пяти случаях в основном на высотах 100 и 120 км наблюдались всплески δ_N , чётко коррелирующие с началом девятого и десятого циклов нагрева. В этих случаях время запаздывания возмущений было близким к 10 мин, а их продолжительность составляла 10÷20 мин. Амплитуда δ_N достигала 0,6÷0,7 и 0,4÷0,5 на высотах 100 и 120 км соответственно. На высоте 140 км подобные всплески δ_N не наблюдались.

Зависимость наблюдаемых эффектов от состояния вышележащей части геокосмической среды (вплоть до магнитосопряжённой области) свидетельствует о том, что эффекты вызываются

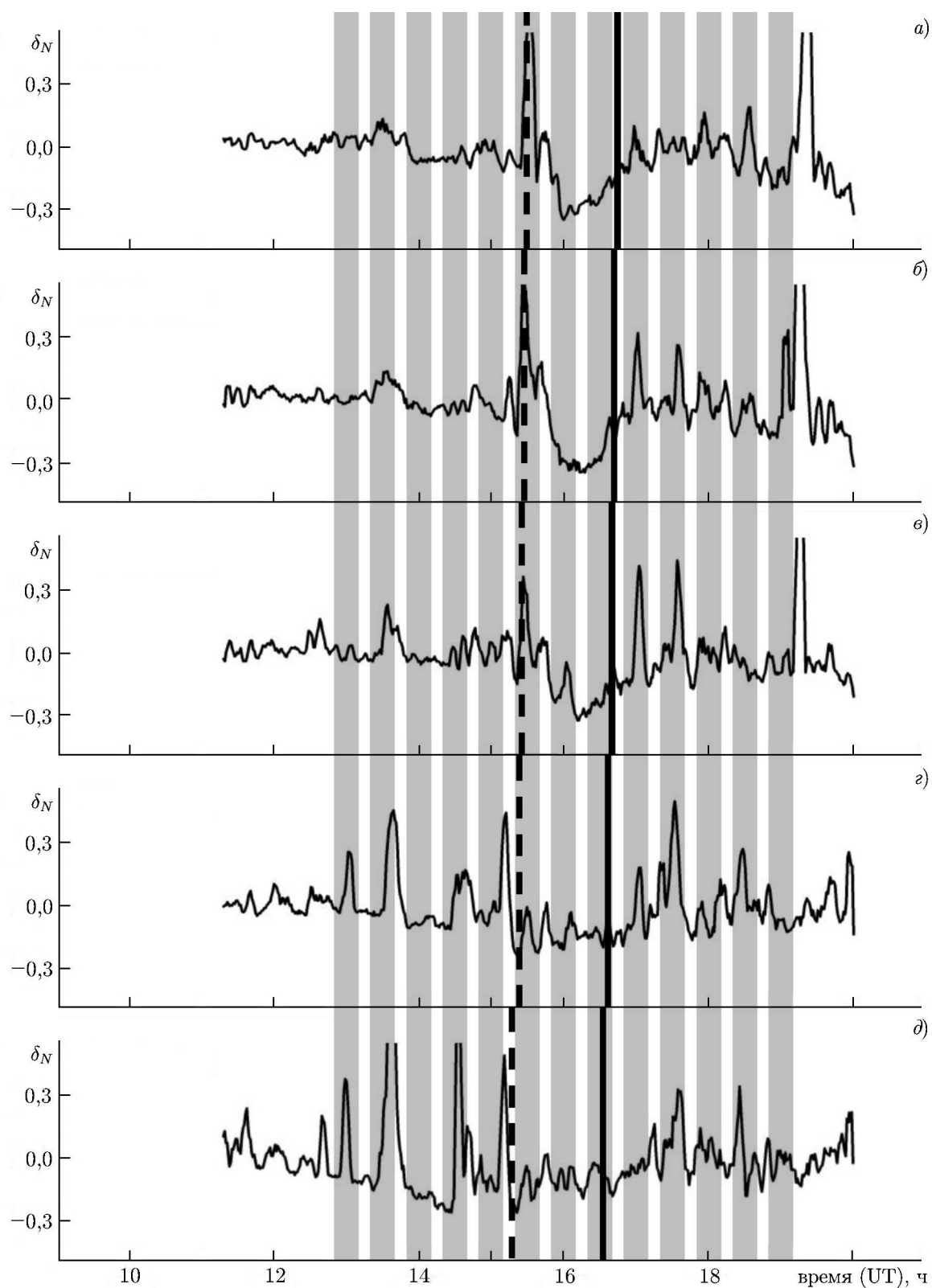


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для 23 сентября 2010 года

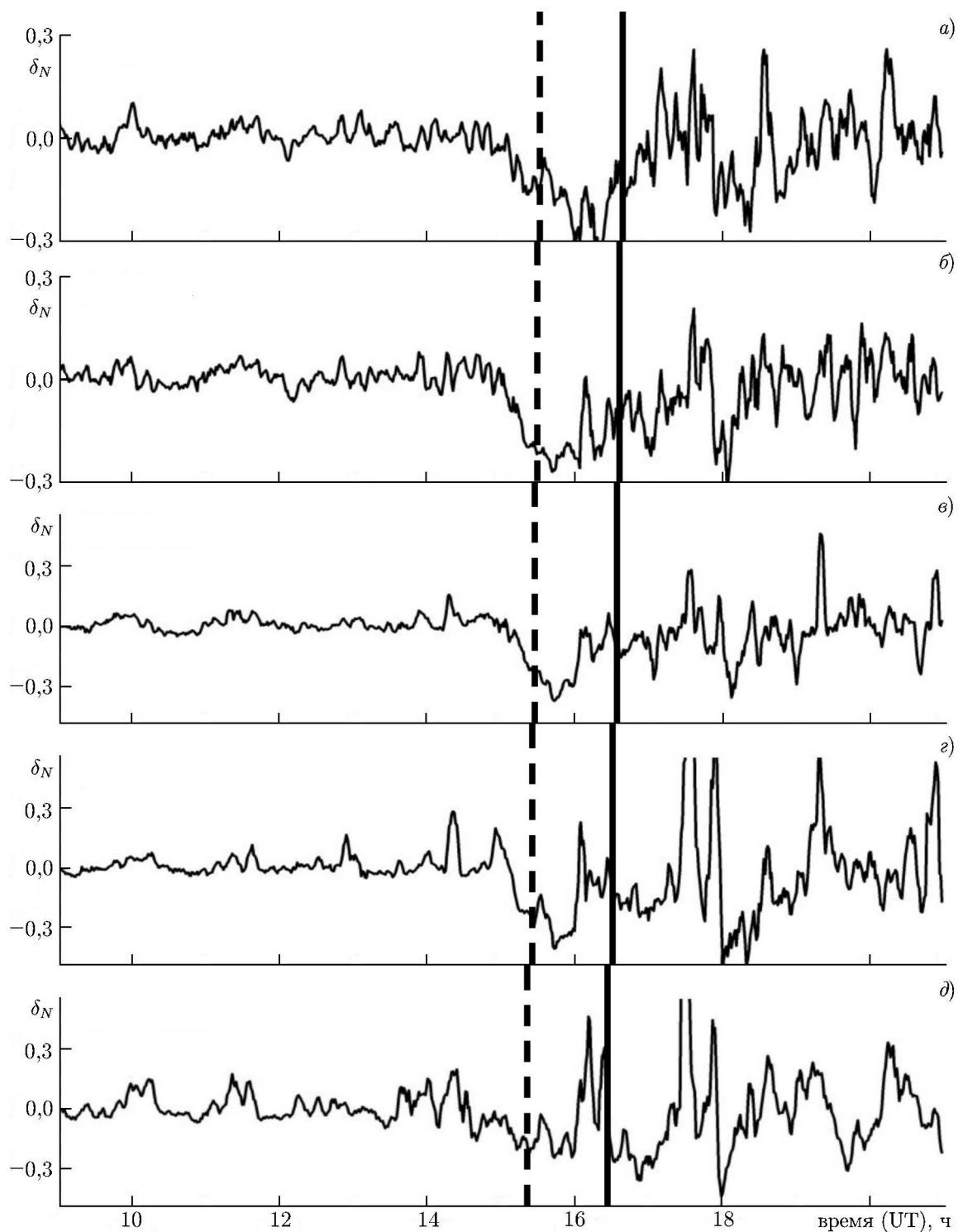


Рис. 4. Временные зависимости относительных вариаций электронной концентрации для контрольного дня 26 сентября 2007 года в диапазоне периодов $5 \div 120$ мин на высотах 140 км (а), 130 км (б), 120 км (в), 110 км (г), 100 км (д). Сплошными и штриховыми вертикальными линиями показаны моменты прохождения солнечного терминатора над пунктом наблюдения и над магнитосопряжённой областью соответственно

согласованными процессами в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера, точнее с нарушением сложившегося взаимодействия подсистем в этой системе.

Таким образом, в данной измерительной кампании также проявляется эффект истощения, поскольку всплески электронной концентрации N заканчивались до окончания как отдельного цикла, так и ряда циклов нагрева.

Описанные параметры всплесков δ_N в дни нагрева ионосферной плазмы и в контрольный день существенно отличаются. Это позволяет утверждать, что возникающие со временем запаздывания около 10 мин всплески δ_N , а значит и электронной концентрации N , связаны с циклами включения нагревного стенда.

3.2. Основные параметры локализованных возмущений

Мощное радиоизлучение в пределах диаграммы направленности антенны приводит к нагреву электронов и изменению их концентрации. Расчёты показали, что при эффективной мощности $PG = 80$ МВт, частоте излучения $f = 4,7$ МГц и обыкновенной поляризации волны температура электронов T_e увеличивалась примерно в $2 \div 2,5$ раза у основания ионосферы ($z \approx 60 \div 70$ км), в $1,4 \div 1,7$ раза на границе D - и E -областей, на $5 \div 10$ % в F -области ионосферы. Вблизи высоты верхнего гибридного резонанса, которая лежит на несколько километров ниже высоты отражения мощной радиоволны (толщина «резонансного» слоя около $2 \div 5$ км), электронная температура T_e увеличивалась примерно на $30 \div 35$ %. За счёт электронной теплопроводности нагретая область расширялась вдоль магнитных силовых линий примерно на 100 км. Высота верхнего гибридного резонанса примерно равнялась $250 \div 300$ км.

Расчёты множителя самовоздействия радиоволны показали, что в условиях роста солнечной активности в дневное и вечернее время ниже области верхнего гибридного резонанса поглощалось около 80 и 50 % энергии волны соответственно. Дошедшая до этой области энергия почти полностью поглощалась в окрестности высоты верхнего гибридного резонанса.

Увеличение электронной температуры T_e привело к возмущению концентрации N . Так, на высотах $z \approx 60 \div 70$ км в результате активизации процесса прилипания электронов концентрация N сначала уменьшилась в $1,8 \div 2,2$ раза, а затем вследствие уменьшения коэффициента рекомбинации концентрация N увеличилась в $1,4 \div 1,6$ раза. В верхней части D -области, в E -области и нижней части F -области нагрев электронов привёл к замедлению процесса рекомбинации и росту концентрации N . Здесь относительные изменения концентрации N по мере роста высоты уменьшались от 20 до 3 %. В окрестности высоты верхнего гибридного резонанса отрицательные возмущения концентрации N за счёт резонанса и эффекта магнитного зенита усиливались и составляли $5 \div 10$ %.

3.3. Механизмы крупномасштабных возмущений

Периодическая модуляция ионосферных токов приводит к генерации электромагнитных волн. Последние распространяются вдоль магнитных силовых линий, достигают магнитосферы и взаимодействуют с заряженными частицами радиационного пояса. При определённых условиях может наблюдаться стимулированное мощным радиоизлучением высыпание электронов в ионосферу [25–29]. При энергии электронов $50 \div 100$ кэВ на высотах $z \approx 100 \div 140$ км должно наблюдаться увеличение концентрации электронов. Включение мощного радиоизлучения должно приводить к «вспышкам» ионизации. Длительность такой «вспышки» определяется суммой времени действия источника и времени релаксации электронов. Последнее равно $t_N = (2\alpha N)^{-1}$, где α — коэффициент рекомбинации электронов.

На высотах $z \approx 100 \div 140$ км в дневное время скорость рекомбинации электронов определяется в основном скоростью их рекомбинации с ионами O_2^+ и NO^+ (см., например, [30]). При этом коэффициент $\alpha \approx (1,5 \div 2,5) \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. Тогда при концентрации $N \approx 10^{10} \div 10^{11} \text{ м}^{-3}$ имеем время релаксации $t_N \approx 25 \div 250 \text{ с}$.

Оценим параметры потока высыпającychся частиц, обеспечивающих относительное отклонение электронной концентрации $\delta_N \approx 0,6$.

Изменение скорости ионизации задаётся соотношением

$$\Delta q \approx \alpha (N^2 - N_0^2) = \alpha N_0^2 \delta_N (2 + \delta_N), \quad (1)$$

где N и N_0 — возмущённое и невозмущённое значения концентрации электронов соответственно.

Плотность потока энергии, затрачиваемой на ионизацию нейтральных частиц моноэнергичными электронами

$$\Pi = 2\varepsilon_i \Delta z_i \Delta q. \quad (2)$$

Здесь Δz_i — толщина слоя, где поглощается поток высыпającychся электронов, $\varepsilon_i \approx 35 \text{ эВ}$ — энергия ионизации одной молекулы высыпющимися частицами.

Подставляя выражение (1) в формулу (2), получим плотность потока энергии

$$\Pi = 2\varepsilon_i \Delta z_i \alpha N_0^2 \delta_N (2 + \delta_N). \quad (3)$$

Плотность потока высокоэнергичных частиц с энергией ε

$$\Pi_p = \Pi / \varepsilon. \quad (4)$$

Тогда из формул (3) и (4) следует, что плотность потока частиц

$$\Pi_p = 2 \Delta z_i \alpha N_0^2 \delta_N (2 + \delta_N) \varepsilon_i / \varepsilon.$$

При толщине $\Delta z_i = 10 \text{ км}$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, $N_0 = 10^{10} \div 10^{11} \text{ м}^{-3}$, $\delta_N = 0,6$, $\varepsilon_i = 35 \text{ эВ}$, $\varepsilon = 100 \text{ кэВ}$ получаем $\Pi_p \approx 3 \cdot 10^8 \div 3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Если энергия $\varepsilon = 10 \text{ кэВ}$, то плотность потока частиц $\Pi_p \approx 3 \cdot 10^9 \div 3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Такие значения потока частиц относятся к достаточно большим, но в средних широтах представляются вполне реальными. При других механизмах возмущения системы Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера значения Π_p достигали $10^8 \div 10^9 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [25–29].

Зная плотность потока частиц Π_p , можно оценить мощность P_p и энергию E высыпającychся частиц на площади S в течение времени Δt :

$$P_p = \eta \Pi S, \quad E = P_p \Delta t.$$

Здесь η — коэффициент, учитывающий пятнистость области высыпания в горизонтальной плоскости, точнее её фрактальную структуру. Результаты расчёта мощности P_p и энергии E для различных значений невозмущённой концентрации электронов N_0 в E -слое при $\eta = 0,1$, $S \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$ и $\Delta t = 10^3 \text{ с}$ приведены в табл. 1. Считалось, что радиус зоны высыпаний близок к 1 000 км.

Интересно сравнить мощность P_p с полной мощностью P трёх радиопередающих устройств, служащих для нагрева ионосферной плазмы мощным радиоизлучением. Для этого введём коэффициент $K = P_p / P$. Из табл. 1 видно, что $K > 1$, т. е. в системе ионосфера—магнитосфера—атмосфера—ионосфера имеет место триггерный эффект [25–29].

Таблица 1. Основные параметры высыпającychся энергичных электронов

$N_0, \text{м}^{-3}$	$\Pi_p, \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\Pi, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$	$P, \text{Вт}$	$E, \text{Дж}$	K
$1 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^8$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^9$	2,2
$2 \cdot 10^{10}$	$8,7 \cdot 10^9$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^9$	9
$4 \cdot 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^9$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^{10}$	34
$6 \cdot 10^{10}$	$7,9 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^7$	$3,9 \cdot 10^{10}$	78
$8 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^7$	$6,8 \cdot 10^{10}$	136
$1 \cdot 10^{11}$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^{11}$	220

Высыпание частиц может быть вызвано и другим механизмом, описанным в работе [31]. Электрическое поле поляризации E_p с горизонтальным масштабом $L_\perp$, возникшее в пределах диаграммы направленности антенны, передаётся в магнитосферу, вызывая уменьшение «поперечной» энергии электронов на величину

$$\Delta\varepsilon_\perp = eE_p L_\perp,$$

где $e > 0$ — заряд электрона.

Полагая в магнитосфере напряжённость поля $E_p = 3$ мВ/м, радиус $L_\perp = 1000$ км, получим уменьшение энергии $\Delta\varepsilon_\perp \approx 3$ кэВ. Таких значений $\Delta\varepsilon_\perp$ бывает достаточно для перераспределения электронов по энергиям в магнитной ловушке и их высыпания из радиационного пояса.

Таким образом, стимулированное мощным радиоизлучением взаимодействие между подсистемами ионосфера—магнитосфера—атмосфера—ионосфера может объяснить возникновение крупномасштабных возмущений концентрации электронов. Такое объяснение находится в соответствии с результатами, описанными в обзорах [10, 11].

ВЫВОДЫ

1) При помощи радара некогерентного рассеяния, расположенного вблизи г. Харьков, экспериментально обнаружены крупномасштабные (размером 1000 км) всплески концентрации электронов в нижней ионосфере, коррелирующие с началами циклов нагрева ионосферной плазмы радиоизлучением мощного станда «Сура». Особенностью этих экспериментов было то, что ионосферные возмущения возникали далеко за пределами диаграммы направленности антенны нагревного станда.

2) Всплески концентрации электронов чаще всего возникали при повторных циклах (один раз в первом цикле) периодического нагрева плазмы мощным радиоизлучением.

3) Наибольшие относительные возмущения концентрации электронов наблюдалась на высотах порядка 100 км, где они достигали $0,6 \div 0,7$. Эти возмущения уменьшались до $0,2 \div 0,3$ на высоте 120 км и практически отсутствовали на высоте 140 км.

4) Время запаздывания крупномасштабных возмущений в ионосфере примерно равнялось 10 мин, а их продолжительность около $10 \div 20$ мин.

5) В интервале времени между моментами прохождения магнитосопряжённого и местного солнечного терминаторов крупномасштабные возмущения, коррелирующие с циклами нагрева плазмы мощным радиоизлучением, не наблюдались. После прохождения местного солнечного терминатора в пяти случаях подобные возмущения обнаруживались снова.

6) Возникновение крупномасштабных возмущений, проявляющихся как всплески концентрации электронов на десятки процентов в нижней ионосфере, можно объяснить нарушением сложившегося взаимодействия подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера

с последующим высыпанием энергичных электронов из магнитосферы в верхнюю атмосферу (высоты $100 \div 120$ км) и её частичной ионизацией.

7) При энергии высыпающихся электронов порядка 100 кэВ для обеспечения наблюдаемого увеличения концентрации электронов на высотах около 100 км требуется плотность потока энергичных частиц порядка $10^8 \div 10^{10} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Авторы благодарны Л. Я. Емельянову, В. А. Мяло, И. Б. Складову за обеспечение измерений на радаре некогерентного рассеяния, а Г. П. Комракову за обеспечение работы стенда «Сура».

Работа В. П. Урядова выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-02-00177).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
2. Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. Berlin: Springer, 1978. 465 p.
3. Гершман Б. Н., Ерухимов Л. М., Яшин Ю. Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. М.: Наука, 1984. 392 с.
4. Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. // Итоги науки и техники. Сер. Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. 1989. Т. 9. 140 с.
5. Гуревич А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42, № 7. С. 599.
6. Гуревич А. В., Зыбин К. П., Карлсон Х. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 9. С. 772.
7. Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
8. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
9. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. // Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62.
10. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С. 17.
11. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
12. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801.
13. Караштин А. Н., Митяков Н. А., Рапопорт В. О., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20, № 5. С. 787.
14. Григорьев Г. И., Трахтенгерц В. Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 6. С. 90.
15. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Вестник Харьковского ун-та. Сер. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 29.
16. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
17. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72.
18. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А. и др. // Труды НИИР. М.: Радио и связь, 1989. № 9. С. 57.
19. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71.
20. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
21. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.
22. Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
23. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
24. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.

25. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
26. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2006. Т. 4, № 12. С. 655.
27. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2007. Т. 5, № 4. С. 198.
28. Черногор Л. Ф. Нелинейная радиофизика. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2004. 200 с.
29. Черногор Л. Ф. Нелинейность в природе и науке. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 258 с.
30. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
31. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5, № 4. С. 371.

Поступила в редакцию 7 февраля 2012 г.; принята в печать 27 марта 2012 г.

APERIODIC LARGE-SCALE DISTURBANCES IN THE IONOSPHERIC *E* REGION STIMULATED BY HIGH-POWER RF HEATING

L. F. Chernogor, I. F. Domnin, S. V. Panasenko, and V. P. Uryadov

We describe the observation results of ionospheric disturbances at altitudes of 100 to 140 km, which occurred at a distance of about 1000 km from the Sura facility. The observations have been made using an incoherent scatter radar. The electron density increase by 10–70% had a temporal duration of 10–20 min and accompanied the high-power RF heating. The time of disturbance evolution was about 10 min. The observation effect can be explained by the intensification of the subsystem coupling in the ionosphere–magnetosphere–upper atmosphere–ionosphere system, which leads to a precipitation of energetic electrons from the magnetosphere. Parameters of the precipitating particles and precipitation-produced ionization are estimated.