

УДК 550.388+533.951+523.868

АПЕРИОДИЧЕСКИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ ИОНОЗОНДОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Л. Ф. Черногор^{1*}, *В. Л. Фролов*², *В. В. Барабаш*³

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

² Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

³ Институт ионосферы, г. Харьков, Украина

Приведены наблюдаемые возмущения параметров ионосферы при воздействии на неё мощного радиоизлучения стенда «Сура». Для наблюдений использовались ионозонды в г. Нижний Новгород и г. Москва (Россия), г. Харьков (Украина) и г. Прухониц (Чехия). Удалённость средств диагностики от стенда «Сура» составляла от 560 до 2200 км. На ионограммах станций «Нижний Новгород» и «Москва» эпизодически наблюдались дополнительные слои ионизации с критической частотой $2,6 \div 3,4$ МГц. Действующая высота этих слоёв составляла $120 \div 160$ км, истинная — около $110 \div 130$ км. Возникновение дополнительных слоёв ионизации ниже $100 \div 130$ км контролировалось по увеличению минимальной наблюдаемой частоты. Для станции «Москва» в дневное время эта частота увеличивалась примерно на 1 МГц, в ночное время она практически не изменялась. Менее значительными ($0,3 \div 0,4$ МГц) были вариации минимальной наблюдаемой частоты во все времена суток на ионограммах станций «Харьков» и «Прухониц». Наблюдаемые эффекты, скорее всего, связаны со среднеширотным высыпанием электронов из внутреннего радиационного пояса, что увеличивало концентрацию электронов в ионосфере, поглощение зондирующих радиоволн и минимальную наблюдаемую частоту. По оценкам плотность потока частиц составляла $10^8 \div 10^9 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Концентрация электронов в дневное время увеличивалась в $2 \div 3$ раза.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования физико-химических процессов в околоземной космической среде вышли на качественно новый уровень после того, как были сформулированы основные положения системной парадигмы [1–7]. Было обосновано, что описание ни одной из земных оболочек не является самодостаточным, поскольку оболочки взаимодействуют между собой. Были обнаружены прямые и обратные положительные и отрицательные связи. Поэтому необходимо целостное рассмотрение системы Солнце—межпланетная среда—магнитосфера—ионосфера—атмосфера—Земля (её внутренние оболочки). При изучении роли потоков «снизу» часто достаточно рассмотрения системы Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера (см., например, [1, 5]). Важно, что обе системы представляют собой открытую динамическую нелинейную физическую систему. Такие системы обладают рядом нетривиальных свойств. Например, в этих системах могут срабатывать триггерные механизмы высвобождения энергии [1, 5, 7].

Для исследования взаимодействия подсистем в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера эффективными оказываются активные эксперименты. В этом случае энергия источника, место и время энерговыделения априори известны.

Среди активных экспериментов особое место занимает модификация околоземной плазмы мощным радиоизлучением (см., например, [8–10]). При этом, как правило, исследуются процессы, возникающие в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда. Такие процессы были названы локализованными [11]. Их горизонтальная протяжённость обычно не превышает $10 \div 100$ км.

* Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua

В то же время существует иное научное направление, которое изучает возникновение возмущений в ионосфере далеко за пределами диаграммы направленности антенны нагревного стенда. Такие возмущения впервые были обнаружены около 30 лет назад (см., например, [11–20]). Они были названы крупномасштабными [11]. Их горизонтальная протяжённость составляет порядка нескольких тысяч километров.

Одной из причин возникновения крупномасштабных возмущений является генерация и распространение акустико-гравитационных волн на высотах F -области ионосферы. Результаты современных исследований этих волн представлены в работах [21–26].

На высотах D - и E -областей ионосферы причина возникновения крупномасштабных возмущений иная [18, 19]. Скорее всего, она связана с взаимодействием подсистем ионосфера—магнитосфера—энергичные электроны—атмосфера, точнее — с высыпанием высокоэнергичных электронов из магнитосферы в атмосферу. При этом крупномасштабные возмущения являются аperiodическими. Результаты последних исследований таких возмущений описаны в работах [27, 28].

Целью данной работы является изложение результатов наблюдения аperiodических крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере, вызванных воздействием на плазму мощного радиоизлучения стенда «Сура» 28–30 августа 2012 года.

1. КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

Космическая погода отслеживалась по параметрам солнечного ветра (концентрации частиц n_{sw} , скорости V_{sw} , температуры T_{sw} и давления p_{sw}), компонентам B_y и B_z межпланетного магнитного поля, энергетической функции Акософу ϵ_A и индексам геомагнитной активности a_p , A_p , AE_{max} , K_p и D_{st} (см. табл. 1).

26 августа 2012 года геокосмическая среда была слабо возмущена: наблюдалось незначительное возмущение межпланетного поля (до $-(5 \div 6)$ нТл) и геомагнитного поля ($K_{pmax} < 4$).

С 27 по 30 августа 2012 года космическая погода характеризовалась как спокойная: параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и геомагнитного поля слабо флуктуировали вокруг своих невозмущённых значений (см. табл. 1). Спокойная космическая погода способствовала выявлению эффектов, вызванных воздействием мощного радиоизлучения на ионосферу.

Таблица 1. Параметры космической погоды

Дата	AE_{max} , нТл	K_{pmax}	ΣK_p	a_{pmax} , нТл	A_p , нТл	D_{st} , нТл
26.08.2012	527	3,7	18,7	22	11	$-6 \div +4$
27.08.2012	297	3,0	10,7	15	6	$-8 \div +1$
28.08.2012	100	1,3	5,3	5	3	$-8 \div 0$
29.08.2012	110	1,3	6,0	5	3	$-4 \div +3$
30.08.2012	88	1,0	5,0	4	3	$-1 \div +10$

2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Нагревный стенд «Сура»

Эксперименты по возмущению ионосферы проводились на стенде «Сура» с 27 по 30 августа 2012 года. Стенд расположен вблизи г. Нижний Новгород (Россия); географические координаты $56,15^\circ$ с. ш., $46,1^\circ$ в. д. Режимы работы стенда и его параметры описаны ниже. Несущая частота стенда в разных экспериментах изменялась от 4 785 до 6 720 кГц, поляризация радиоволн всегда была обыкновенной, эффективная мощность излучения стенда составляла примерно 150 МВт. Длительность импульсов воздействия варьировалась от 5 до 30 мин, в ряде случаев использовались и более длительные интервалы излучения мощной радиоволны. Для выполнения условий «эффекта магнитного зенита» диаграмма направленности антенны во всех экспериментах была наклонена от вертикали к югу на 12° .

2.2. Средства наблюдения

Для регистрации возмущений в ионосфере, вызванных мощным радиоизлучением, использовались четыре цифровых ионозонда (см. табл. 2).

Ионограммы регистрировались раз в 15 мин (в Харькове — раз в 5 мин).

Анализировались все основные параметры ионограмм. Оказалось, что при воздействии мощного радиоизлучения на ионосферную плазму заметно возмущается минимальная наблюдаемая частота. Остальные параметры ионограмм изменялись незначительно, в пределах естественных флуктуаций. Поэтому далее приводятся результаты анализа временных вариаций минимальной наблюдаемой частоты. Её всплески свидетельствовали о том, что поглощение радиосигналов в нижней ионосфере увеличивается. Это, скорее всего, обусловлено появлением дополнительного слоя ионизации.

Расстояние от стенда «Сура» до ионозондов изменялось от 0 до примерно 2 200 км. Ионозонд НИРФИ (р/п Васильсурск) типа «САДИ» расположен непосредственно возле нагревного стенда. Ионозонд ИЗМИРАН (станция «Москва», Россия), размещённый в г. Троицк, находится примерно на одной широте с ионозондом НИРФИ на удалении около 560 км от нагревного стенда. Ионозонд ХНУ (станция «Харьков», Украина) расположен в Радиофизической обсерватории ХНУ (с. Гайдары). Он удалён от стенда «Сура» примерно на 960 км. Этот ионозонд находится примерно на той же долготе, что и ионозонд ИЗМИРАН. Ионосферная станция «Прухониц»

Таблица 2. Сведения об ионозондах

Месторасположение ионозонда (название станции)	Тип	Широта	Долгота	Расстояние до нагревного стенда, км
Васильсурск («Нижний Новгород»)	Автоматизированный цифровой ионозонд «Базис»	$56^\circ 09'$ с. ш.	$46^\circ 06'$ в. д.	0
Троицк («Москва»)	Цифровой ионозонд «Парус»	$55^\circ 28'$ с. ш.	$37^\circ 18'$ в. д.	560
Гайдары («Харьков»)	Несерийный цифровой ионозонд	$49^\circ 38'$ с. ш.	$36^\circ 20'$ в. д.	960
Прухониц («Прухониц»)	Цифровой ионозонд DPS-4	$50^\circ 00'$ с. ш.	$14^\circ 36'$ в. д.	2 200

(г. Прухониц, Чехия) расположена на широте ионозонда ХНУ.

Такая дислокация ионозондов позволила изучить зависимость крупномасштабных возмущений ионосферы от широты, долготы и расстояния от нагревного стенда до средства наблюдения.

Ионограммы станций «Москва» и «Прухониц» представлены на сайте [29]. Погрешность оцифровки частоты и действующей высоты на ионограммах составляла около 50 кГц и 5 км соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Эксперименты проводились с 27 по 30 августа 2012 года, в качестве контрольного дня использовалось 27 августа. В этот день стенд «Сура» включался только в вечернее время с 17:00 по 18:30 UT в следующем режиме: излучение — 5 мин, пауза — 5 мин ([+5 мин; -5 мин]). Как оказалось, при таком режиме работы ионосфера на расстояниях $560 \div 2200$ км от стенда заметно не возмущалась. Для остальных дней осуществлялся поиск эффектов, связанных с работой нагревного стенда.

3.1. Примеры ионограмм

Пример ионограммы, зарегистрированной в Васильсурске 29 августа 2012 года в 09:45 UT, приведён на рис. 1. Видно, что в нижней ионосфере появился ионизированный слой (слой E_s типа С) с критическими частотами $f_{oE_s} = 2,6$ и $f_{xE_s} = 3,5$ МГц для волн с обыкновенной и необыкновенной поляризацией соответственно. Действующие высоты изменялись в пределах $120 \div 160$ км, истинные — примерно от 110 до 130 км. Эта ионограмма получена вскоре после окончания нагрева ионосферы в режиме [+30 мин; -30 мин]. На предыдущей и последующей ионограммах (15 мин ранее и 15 мин позднее) подобный слой не наблюдался.

В этот же день на ионограммах, снятых в Троицке в интервале времени 14:31–15:31 UT, кроме слоя E также наблюдался слой E_s типа С с критическими частотами $3,1 \div 3,2$ МГц в диапазоне действующих высот $120 \div 160$ км (см. рис. 2). В этом интервале времени нагревный стенд работал в режиме [+30 мин; -30 мин].

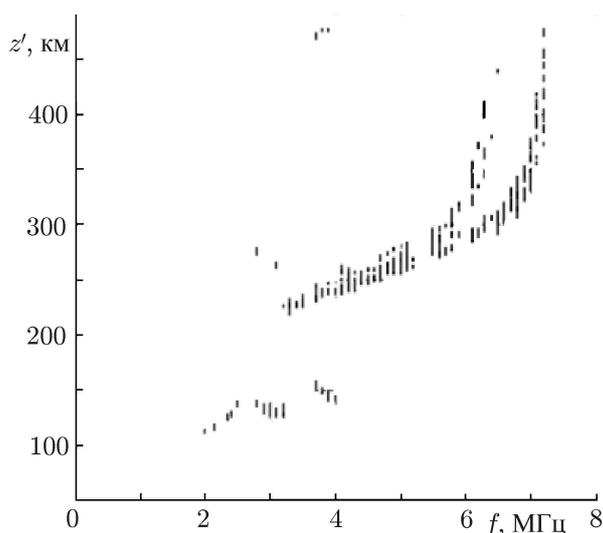


Рис. 1. Пример ионограммы со спорадическим слоем типа С, полученной 29 августа 2012 года в 09:45:30 UT в Васильсурске

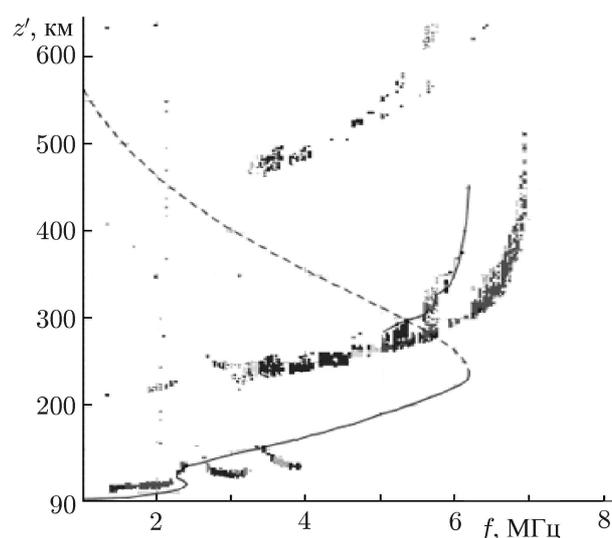


Рис. 2. Пример ионограммы со спорадическим слоем типа С, полученной 29 августа 2012 года в 14:31 UT в Троицке

Слой E_s типа С на ионограммах, полученных в Троицке, отмечался также 30 августа 2012 года в 14:16 UT (см. рис. 3) и в 15:16–15:31 UT с критическими частотами около 3,4 и 3,5 МГц соответственно. Слои наблюдались примерно на тех же высотах (около 110–130 км). Известно, что слой E_s типа С образуется, как правило, за счёт дополнительной ионизации высыпаящимися электронами.

Слои дополнительной ионизации на высотах $z \leq 110$ км можно искать по значениям минимальной наблюдаемой частоты на ионограммах (f_{\min}). Этому посвящены следующие подразделы работы.

3.2. Вариации минимальной наблюдаемой частоты 27 августа 2012 года

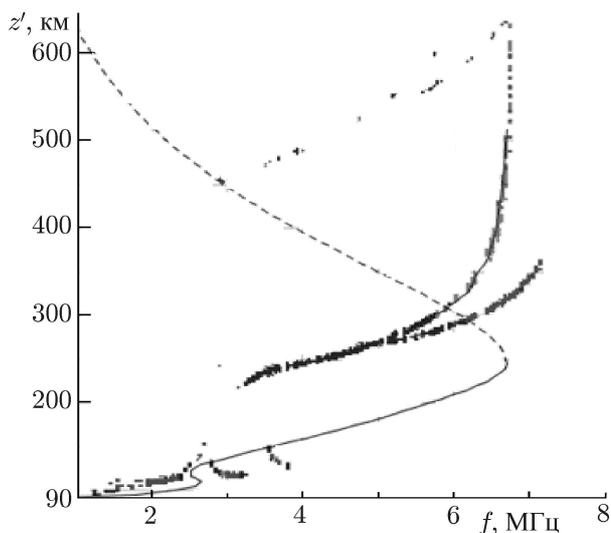


Рис. 3. Пример ионограммы со спорадическим слоем типа С, полученной 30 августа 2012 года в 14:16 UT в Троицке

2,1 МГц. Примерно с 08:00 до 10:00 UT частота f_{\min} составляла примерно 2,2 МГц. После 10:00 UT частота f_{\min} уменьшалась до ночных значений, примерно равных 1,4–1,6 МГц.

Для ионозонда в Прухонице частота f_{\min} возрастала от 1,4 до 2 МГц в интервале времени 06:00–10:00 UT. Затем в течение 3–4 часов она оставалась примерно постоянной. С 14:00 до 15:00 UT она убывала от 1,8 до 1,3 МГц. Далее частота f_{\min} увеличивалась от 1,3 до 1,6 МГц и затем оставалась постоянной в интервале времени 18:30–24:00 UT.

3.3. Вариации минимальной наблюдаемой частоты 28 августа 2012 года

Временные вариации частоты f_{\min} 28 августа 2012 года показаны на рис. 5.

На ионограммах, полученных в Васильурске, частота $f_{\min} \approx 2$ МГц в интервале времени 06:00–09:45 UT. Примерно с 10:00 до 12:00 UT частота $f_{\min} \approx 2,4$ МГц. С 12:00 до 15:00 UT частота f_{\min} изменялась в пределах 1,6–2,0 МГц. В интервале времени 15:15–18:00 UT частота f_{\min} составляла около 1,6 МГц, далее флуктуировала в пределах 1,7–1,9 МГц.

На ионограммах в Троицке в интервале времени 06:00–07:45 UT частота f_{\min} составляла около 1,8 МГц. Примерно с 08:00 до 10:00 UT наблюдались всплески частоты f_{\min} ; значения f_{\min} при этом достигали 2,7 МГц. Далее в течение 2 часов частота $f_{\min} \approx 1,8$ МГц. С 12:00 до 13:00 UT

Временные вариации минимальной наблюдаемой частоты f_{\min} для всех задействованных ионозондов показаны на рис. 4. Для ионозонда в Васильурске в дневное время (06:00–10:00 UT) частота $f_{\min} \approx 1,8 \div 2$ МГц. С 10:00 до 14:00 UT частота f_{\min} увеличивалась до 2,3 МГц. В интервале времени 14:00–22:00 UT частота f_{\min} была близка к 1,6 МГц. После 22:00 UT частота f_{\min} постепенно увеличивалась примерно до 2 МГц.

Для ионозонда в Троицке в дневное время частота f_{\min} изменялась в пределах 1,4–1,8 МГц, перед заходом Солнца частота f_{\min} в течение примерно полутора часов уменьшалась до 1,3 МГц. После этого в течение длительного времени (с 15:00 до 24:00 UT) частота f_{\min} составляла примерно 1,6 МГц.

Анализ ионограмм с ионозонда в Гайдарах показал, что с 06:00 до 08:00 UT частота f_{\min} , флуктуируя, постепенно увеличивалась от 1,9 до 2,1 МГц.

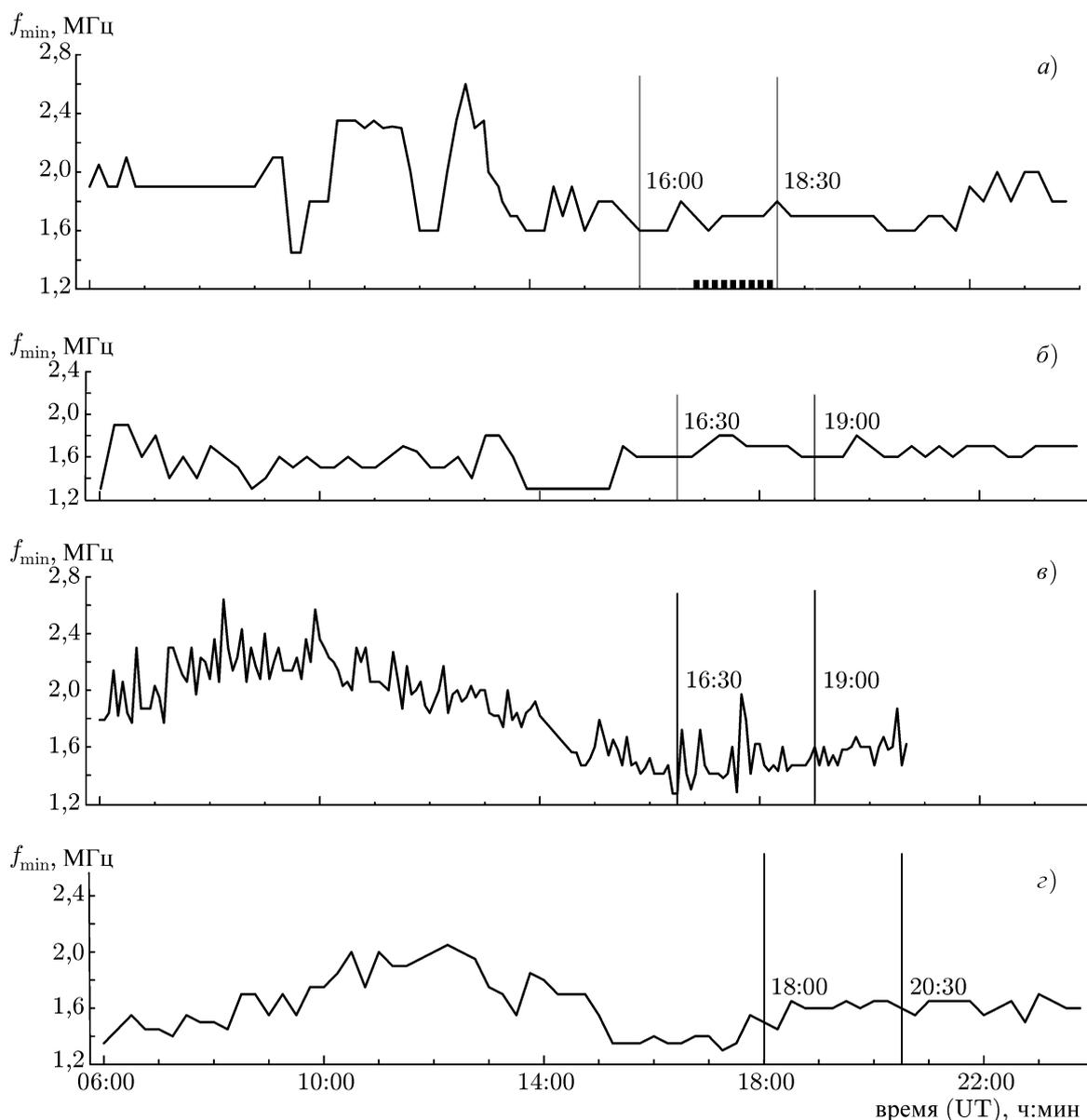


Рис. 4. Временные вариации частоты f_{\min} 27 августа 2012 года для ионозонда в Васильсурске (а), Троицке (б), Гайдарах (в) и Прухонице (г). Вертикальные линии показывают моменты захода Солнца на уровне земли и на высоте 400 км

частота f_{\min} уменьшалась от 1,8 до 1,6 МГц, а затем в течение часа увеличивалась до 2,0 МГц. С 14:00 до 14:30 UT частота f_{\min} уменьшалась от 2,0 до 1,6 МГц, далее в течение 9 часов оставалась на уровне 1,6 МГц.

На ионограммах в Гайдарах частота f_{\min} увеличивалась от ночных значений (1,6 МГц) до дневных значений (около 2,2 МГц). Примерно с 06:30 до 10:30 UT частота f_{\min} , флуктулируя, изменялась от 2,0 до 2,4 МГц. В интервале времени 10:30–14:30 UT частота f_{\min} уменьшалась от 2,2 до 1,6 МГц, после этого флуктуировала в пределах 1,5–1,7 МГц.

В Прухонице частота f_{\min} с 06:00 до 09:00 UT увеличивалась от 1,4 до 1,8 МГц, в интервале 09:00–14:00 UT флуктуировала в пределах 1,7–2,0 МГц. Примерно с 14:00 до 15:30 UT частота f_{\min} уменьшилась от 1,8 до 1,3–1,4 МГц, далее флуктуировала в пределах 1,5–1,6 МГц.

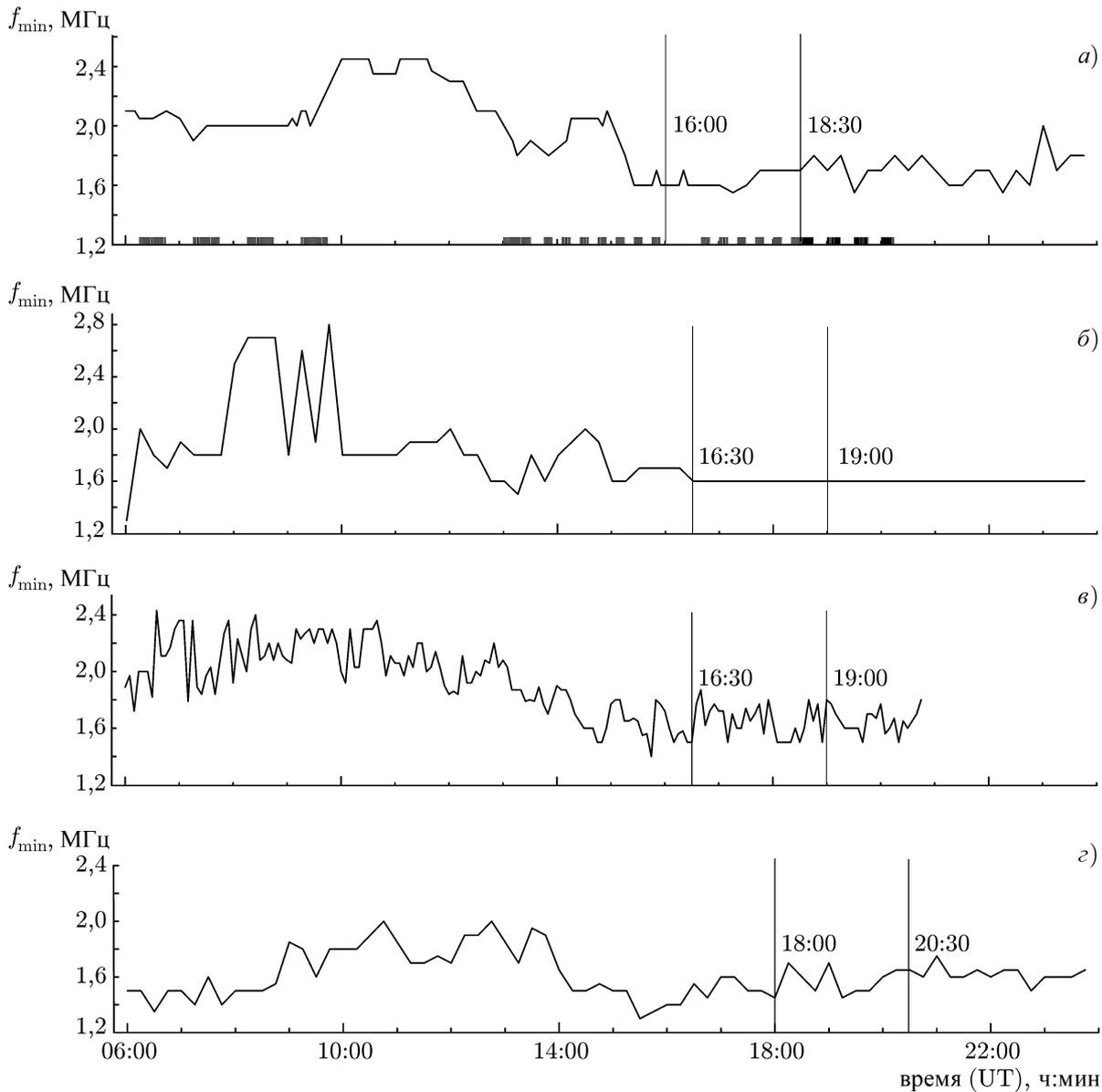


Рис. 5. Временные вариации частоты f_{\min} 28 августа 2012 года для ионозонда в Васильсурске (а), Троицке (б), Гайдарях (в) и Прухонице (г). Вертикальные линии показывают моменты захода Солнца на уровне земли и на высоте 400 км

3.4. Вариации минимальной наблюдаемой частоты 29 августа 2012 года

Временные вариации частоты f_{\min} 29 августа 2012 года показаны на рис. 6.

На ионозонде в Васильсурске с 06:00 до 13:00 UT наблюдались квазипериодические вариации частоты f_{\min} с периодом $T \approx 1$ ч. Частота f_{\min} при этом изменялась от 2,0 до 2,4 МГц. После 13:00 UT частота f_{\min} уменьшалась до $1,6 \div 2,0$ МГц, с 15:00 до 22:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,6$ МГц.

На ионограммах в Троицке в интервале времени 07:00–11:00 UT частота f_{\min} изменялась по квазипериодическому закону с периодом $T \approx 1$ ч от 1,8 до $2,8 \div 3,2$ МГц. С 11:00 до 15:00 UT частота f_{\min} , флуктуируя, уменьшалась от 1,8 до 1,4 МГц. Примерно с 16:00 до 24:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,6$ МГц.

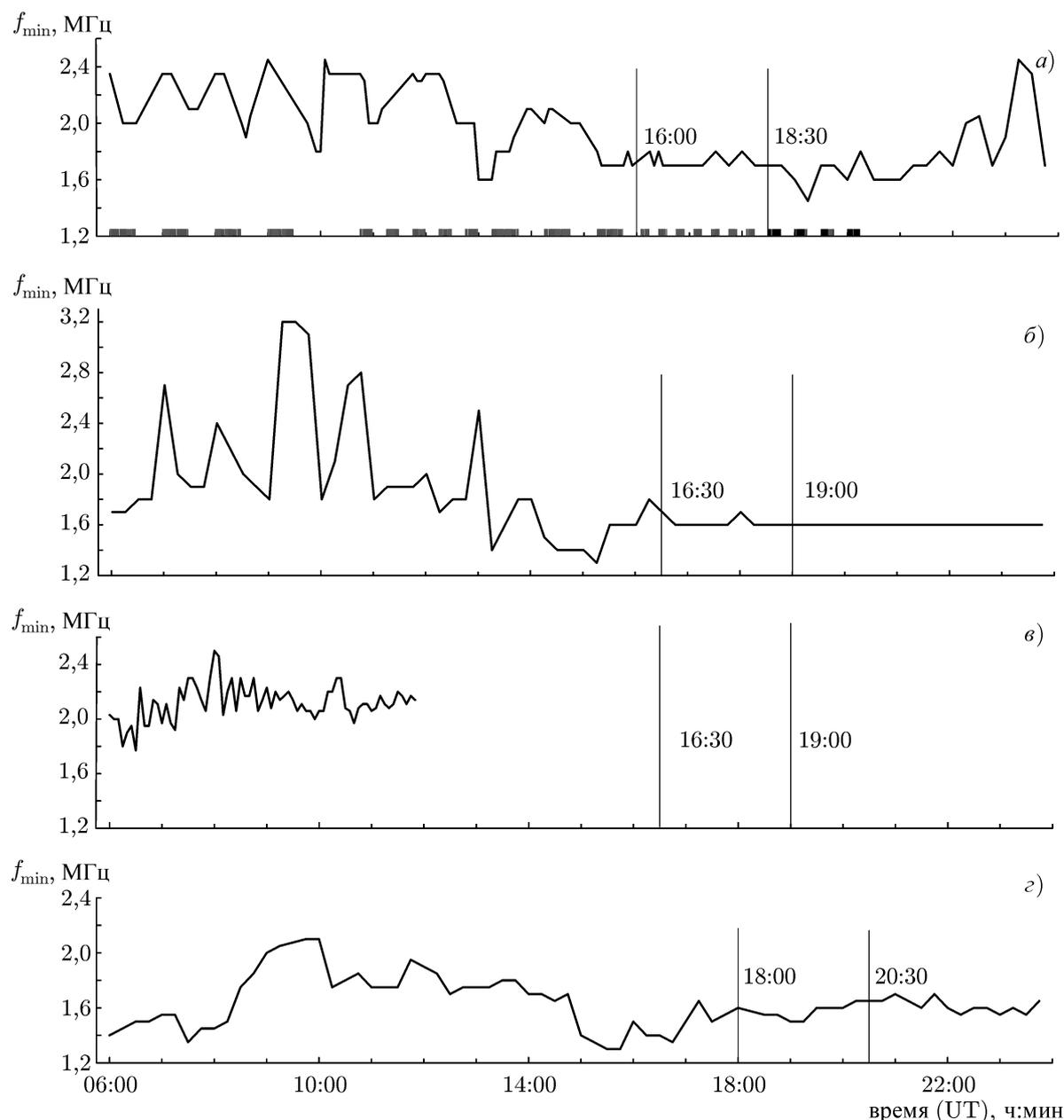


Рис. 6. Временные вариации частоты f_{\min} 29 августа 2012 года для ионозонда в Васильсурске (а), Троицке (б), Гайдарах (в) и Прухонице (г). Вертикальные линии показывают моменты захода Солнца на уровне земли и на высоте 400 км

На ионограммах, полученных в Гайдарах, с 06:00 до 08:00 UT среднее значение частоты f_{\min} увеличивалось от 1,9 до 2,2 МГц. В интервале времени с 06:30 до 10:30 UT наблюдались флуктуации f_{\min} в диапазоне от 2,0 до 2,2÷2,4 МГц. В среднем частота $f_{\min} \approx 2,0 \div 2,1$ МГц.

В Прухонице с 06:00 до 09:00 UT частота f_{\min} увеличивалась от 1,4 до 1,8÷2,0 МГц. С 09:00 до 15:00 UT частота f_{\min} постепенно убывала от 2,0 до 1,6 МГц. В интервале 13:00–14:00 UT частота f_{\min} составляла примерно 1,3÷1,4 МГц, с 15:00 до 22:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,6$ МГц.

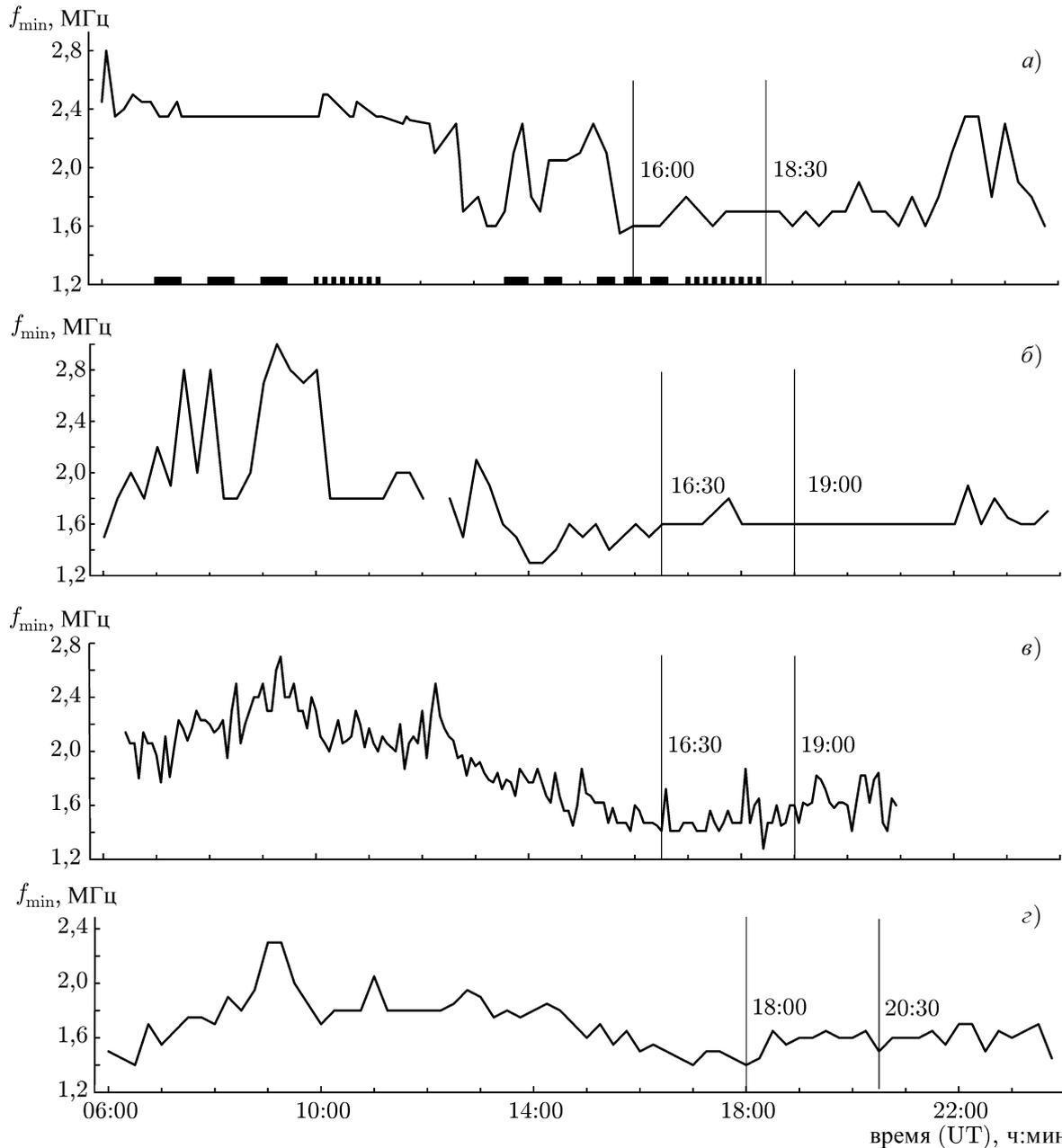


Рис. 7. Временные вариации частоты f_{\min} 30 августа 2012 года для ионозонда в Васильурске (а), Троицке (б), Гайдарах (в) и Прухонице (г). Вертикальные линии показывают моменты захода Солнца на уровне земли и на высоте 400 км

3.5. Вариации минимальной наблюдаемой частоты 30 августа 2012 года

Временные вариации частоты f_{\min} 30 августа 2012 года показаны на рис. 7.

На ионограммах в Васильурске с 06:00 до 10:00 UT частота $f_{\min} \approx 2,4$ МГц. В интервале 10:00–16:00 UT возникал спорадический слой E_s . Его существование сопровождалось флуктуациями частоты f_{\min} в интервале от 1,6 до 2,4 МГц. С 16:00 до 22:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,6$ МГц. В интервале времени 22:00–24:00 UT имели место всплески частоты f_{\min} , в которых достигалось значение 2,4 МГц.

На ионограммах в Троицке в интервале 06:00–07:00 UT частота f_{\min} в среднем увеличивалась от 1,6 до 2,0 МГц. С 07:30 до 10:00 UT наблюдались флуктуации частоты f_{\min} в диапазоне от 1,8 до 2,8÷3,0 МГц. С 10:00 до 13:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,6 \div 2,2$ МГц. Около 14:00 UT отмечались минимальные значения частоты f_{\min} около 1,3 МГц. С 15:00 до 24:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,6$ МГц.

Для ионозонда в Гайдарах частота f_{\min} , флуктуируя, сначала увеличивалась от 1,9 до 2,5 МГц. После 09:00 UT частота f_{\min} в среднем уменьшалась от 2,5 до 1,4 МГц. Отдельные всплески f_{\min} имели амплитуду 0,2÷0,3 МГц.

На ионограммах, зарегистрированных в Прухонице, с 06:00 до 09:00 UT частота f_{\min} увеличивалась от 1,4 до 2,4 МГц. В интервале времени 09:00–10:00 UT частота f_{\min} увеличивалась от 1,8 до 2,4 МГц. С 10:00 до 15:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,8$ МГц. С 17:00 до 18:00 UT отмечалось минимальное значение частоты $f_{\min} \approx 1,4$ МГц. В интервале времени 18:30–24:00 UT частота $f_{\min} \approx 1,6$ МГц.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Вариации минимальной наблюдаемой частоты в Васильевске

Наибольшие вариации частоты f_{\min} 28 августа 2012 года наблюдались в интервале времени 10:00–12:00 UT (см. рис. 5а). Увеличение частоты f_{\min} достигало 0,4 МГц. В контрольный день примерно в это же время увеличение частоты f_{\min} также было около 0,4 МГц. Росту частоты f_{\min} 28 августа 2012 года предшествовал нагрев ионосферной плазмы мощным радиоизлучением стенда «Сура» в режиме [+30 мин; –30 мин]. Сравнение вариаций частоты f_{\min} 27 и 28 августа показывает, что нагрев ионосферы существенно не повлиял на их величину.

29 августа 2012 года с 07:00 до 11:00 UT отмечались квазипериодические вариации частоты f_{\min} с периодом $T \approx 1$ ч (см. рис. 6а). Увеличение частоты f_{\min} достигало 0,4 МГц, при этом значение f_{\min} поднималось до 2,4 МГц. Такое поведение частоты f_{\min} началось примерно через 1 ч после включения периодического нагрева ионосферы в режиме [+30 мин; –30 мин]. В контрольный день в том же интервале времени частота f_{\min} оставалась на уровне около 2,0 МГц. Периодичность всплесков частоты и их время запаздывания по отношению к моменту включения стенда говорят о том, что всплески вызваны работой стенда.

30 августа в дневное время (с 13:30 до 15:30 UT) периоды увеличения частоты f_{\min} до 0,6÷0,8 МГц сопровождалось появлением слоя E_s . С 06:00 до 10:00 наблюдался общий рост частоты f_{\min} до 2,4 МГц (см. рис. 7а). В контрольный день 27 августа (а также 31 августа) в этом интервале времени частота $f_{\min} \approx 2,0$ МГц. Увеличение частоты f_{\min} от 2,0 до 2,4 МГц имело место в течение работы нагревного стенда в режиме [+30 мин; –30 мин].

Вариации частоты f_{\min} при работе стенда «Сура» в других режимах и на более высоких частотах не превышали естественных флуктуаций.

4.2. Вариации минимальной наблюдаемой частоты в Троицке

Рассмотрим вариации частоты f_{\min} 28 августа 2012 года. В интервале времени 08:00–10:00 UT наблюдались флуктуации f_{\min} в диапазоне от 1,8 до 2,6 МГц (см. рис. 5б) после включения нагревного стенда в режиме [+30 мин; –30 мин]. Всплески повторялись с периодом около 30 мин (первые два из них слились).

Частота f_{\min} заметно возрастала от 1,6 до 2,0 МГц также в интервале времени 14:00–15:00 UT. В это время стенд работал в режиме [+10 мин; –10 мин]. Увеличение частоты f_{\min} закончилось примерно за один час до прекращения работы стенда.

29 августа 2012 года четыре включения нагревного стенда в режиме [+30 мин; -30 мин] сопровождалось четырьмя заметными изменениями f_{\min} от 1,8 до 2,4÷3,2 МГц (см. рис. 6б). Время запаздывания этих всплесков по отношению к моментам включения нагревного стенда было близко к 1 ч. Последующие включения стенда в других режимах привели к незначительным (0,2÷0,4 МГц) всплесками частоты f_{\min} . Последовательность этих всплесков также носила квазипериодический характер с периодом $T \approx 1$ ч.

30 августа 2012 года вслед за включением нагревного стенда в режиме [+30 мин; -30 мин] возникали флуктуации частоты f_{\min} в диапазоне от 1,8 до 2,8 МГц с периодом $T \approx 30$ мин (см. рис. 7б). В интервале времени 08:30–10:00 UT наблюдалось общее повышение частоты f_{\min} примерно на 1 МГц. Последующие включения мощного радиоизлучения в других режимах приводили к незначительным вариациям частоты f_{\min} .

4.3. Вариации минимальной наблюдаемой частоты в Гайдарах

После включения нагревного стенда 28 августа 2012 года в режиме [+30 мин; -30 мин] наблюдались квазипериодические ($T \approx 1$ ч) изменения частоты f_{\min} от 1,8÷2,0 МГц до 2,4 МГц (см. рис. 5в). Другие включения стенда в иных режимах приводили лишь к незначительным вариациям f_{\min} , которые были соизмеримы с естественными флуктуациями. Частота f_{\min} заметно увеличивалась от 1,8 до 2,2 МГц с 14:00 до 17:00 UT. При этом период T составлял примерно 1 ч. Время запаздывания возмущений было близко к 1 ч (стенд работал с 13:00 до 16:00 UT). После 17:00 UT начали сказываться эффекты, вызываемые движением вечернего терминатора.

Включение нагревного стенда 29 августа 2012 года в режиме [+30 мин; -30 мин] сопровождалось флуктуациями частоты f_{\min} в интервале от 2,0 до 2,3÷2,4 МГц (см. рис. 6в). Время запаздывания возмущений, которые наблюдались в интервале времени 07:00–10:30 UT, по отношению к моментам включения нагревного стенда (с 06:00 до 09:30 UT) было близко к 1 ч. Периоды всплесков составляли 0,5 и 1 ч.

30 августа нагревный стенд включался в 07:00, 08:00 и 09:00 на 30 мин. Заметные всплески частоты f_{\min} с продолжительностью около 15 мин возникали примерно в 08:00, 09:00 и 10:00 UT (см. рис. 7в). Их величина составляла 0,2÷0,4 МГц. С 10:00 до 11:15 UT стенд работал в режиме [+5 мин; -5 мин]. Примерно через 10 мин после включения стенда возникли слабые всплески частоты f_{\min} с величиной около 0,2 МГц и периодом $T \approx 15$ мин. В интервале времени 12:00–13:00 UT частота f_{\min} увеличивалась от 1,9 до 2,4 МГц.

Другие включения нагревного стенда с иными режимами излучения сопровождалось незначительными вариациями f_{\min} , которые могли быть вызваны естественными источниками.

4.4. Вариации минимальной наблюдаемой частоты в Прухонице

Вариации частоты f_{\min} 28 августа 2012 года в целом мало чем отличались от вариаций в контрольный день 27 августа 2012 года (см. рис. 4з и 5з). Отметим, что 28 августа 2012 года в вариациях частоты f_{\min} в интервале времени 08:45–14:00 UT наблюдались квазипериодические всплески с величиной 0,3÷0,4 МГц и периодом около 1 ч. Время запаздывания возмущений составляло около 2,5 ч, а их продолжительность — около 5 ч.

29 августа 2012 года наблюдались всплески частоты f_{\min} примерно в те же моменты времени, что и на ионозонде в Троицке (см. рис. 6з). Величина всплесков составляла 0,2÷0,4 МГц. Значения частоты f_{\min} в интервале времени 09:00–10:00 и 11:30–10:30 UT на 0,3÷0,4 МГц превышали значения f_{\min} в том же интервале времени в контрольный день.

Поведение частоты f_{\min} 30 августа 2012 года в целом было подобно поведению в контрольный день (см. рис. 4з и 7з), но были и отличия. Так, с 08:30 до 09:30 UT частота f_{\min} увеличилась от 1,8 до 2,4 МГц (см. рис. 7з). Примерно в это же время отмечались всплески частоты f_{\min} на ионозондах в Троицке и Гайдарах. Два других всплеска частоты f_{\min} с величиной около 0,3 и 0,2 МГц регистрировались около 11:00 и 13:00 UT. Если первый и второй всплески вызваны воздействием мощного радиоизлучения, то они запаздывали по отношению к моментам его включения (в 08:00 и 10:00 UT) примерно на 1 ч. Третий всплеск, скорее всего, имел естественное происхождение.

Таким образом, включения мощного сигнала «Сура» практически не повлияли на характер вариации частоты f_{\min} в Васильсурске. Для ионозонда в Троицке эти вариации были наибольшими: частота f_{\min} изменялась примерно на 1 МГц. В то же время для ионозондов в Гайдарах и Прухонице изменения частоты f_{\min} не превышали $0,4 \div 0,5$ и $0,3 \div 0,4$ МГц соответственно. В Васильсурске 29 августа 2012 года величина квазипериодических всплесков также составляла около 0,4 МГц.

Обнаруженные значительные вариации частоты f_{\min} , по всей видимости, вызваны увеличением поглощения зондирующей радиоволны в результате роста концентрации электронов N . Оценим далее величину возмущения концентрации N в нижней ионосфере.

4.5. Результаты расчётов

При постоянных параметрах ионозонда вариации частоты f_{\min} могут быть вызваны вариациями концентрации электронов N и частоты соударений ν в нижней ионосфере. Возмущения частоты столкновений ν существенны в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда, где значителен нагрев электронов. Высыпание электронов из магнитосферы также сопровождается некоторым увеличением частоты столкновений ν , однако при оценке увеличения концентрации N мы будем им пренебрегать.

Широкополосное аномальное ослабление радиоволн существенно лишь вблизи резонансных частот, но не вблизи частоты f_{\min} . Поэтому такое ослабление в работе также не учитывалось.

Отдельно необходимо указать, что чувствительности разных ионозондов отличаются. При расчётах это компенсировалось тем, что в качестве информационного параметра использовалось отношение $f_{\min}/f_{\min 0}$, которое практически не зависит от чувствительности приёмной аппаратуры (здесь $f_{\min 0}$ — минимальное значение $f_{\min}(t)$).

При ряде упрощающих предположений (см. Приложение) получена связь среднего по высотам нижней ионосферы относительного увеличения концентрации электронов $n = \langle N/N_0 \rangle$ с частотой f_{\min} :

$$n = n_{\infty} \left(1 + \frac{\ln B}{2K_0} \right), \quad (1)$$

где

$$n_{\infty} = \left(\frac{f_{\min} + f_B}{f_{\min 0} + f_B} \right)^2, \quad (2)$$

$$B = \frac{z_{r0}}{z_r} \left(\frac{f_{\min}}{f_{\min 0}} \right)^{1+\beta/2}. \quad (3)$$

Здесь $f_B \approx 1,4$ МГц — гирочастота электронов, z_{r0} и z_r — высоты отражения зондирующих радиоволн с частотами $f_{\min 0}$ и f_{\min} соответственно, $\beta \approx 2,5$ — показатель степени в зависимости мощности радиосигнала P_n от частоты ($P_n \propto f^\beta$), $K_0 = K(f_{\min 0})$ — интегральный коэффициент поглощения по трассе зондирующей радиоволны.

Таблица 3. Сведения о среднем увеличении концентрации электронов в нижней ионосфере

Месторасположение ионозонда	$f_{\min 0}$, МГц	f_{\min} , МГц	$n = \langle N/N_0 \rangle$	Примечания
Васильсурск	2,0	2,4	1,4	на уровне естественных флуктуаций
Троицк	1,8	3,2	3,0	наибольшие вариации
Гайдары	2,0	2,4	1,4	умеренные вариации
Прухониц	1,6	1,9	1,3	умеренные вариации

Увеличение минимальной наблюдаемой частоты от $f_{\min 0}$ до f_{\min} вызывается увеличением носительной концентрации n . Результаты расчёта параметра n с использованием соотношений (1)–(3) для четырёх ионозондов приведены в табл. 3. Считалось, что высота отражения $z_r \approx z_{r0}$. Для утреннего и дневного времени принималось, что $K_0 = 0,5$ и $K_0 = 0,75$ соответственно. Из табл. 3 видно, что наибольшие изменения концентрации N в нижней ионосфере имели место для ионозонда в Троицке. Над этим ионозондом концентрация N увеличивалась в среднем по высоте максимально в 3 раза. Над ионозондами в Гайдарях и Прухонице концентрация увеличивалась в 1,4 и 1,3 раза соответственно. Над ионозондом в Васильсурске 28 и 30 августа 2012 года электронная концентрация увеличивалась незначительно, в то же время 29 августа 2012 года концентрация N в этой области возрастала в 1,3–1,4 раза.

Возникает вопрос, вызвано ли увеличение концентрации N естественными причинами или модификацией ионосферы мощным радиоизлучением. Дело в том, что воздействие мощного радиоизлучения на ионосферу в режиме [+30 мин; –30 мин] происходило в интервале времени с 06:00 до 09:30 UT, т. е. при переходе от утреннего к дневному (местному) времени. Оба эти фактора могли способствовать увеличению концентрации N . Об этом свидетельствуют следующие аргументы.

1) При воздействии на ионосферу мощного радиоизлучения на достаточно низкой частоте ($f = 4785$ кГц) в режиме [+30 мин; –30 мин] с эффективной мощностью $PG \approx 75 \div 80$ МВт температура T_e и концентрация N электронов на высотах динамо-области ионосферы (100–150 км) увеличиваются практически скачком (за $10^{-3} \div 10^{-2}$ с в 2–3 раза и за $10 \div 10^2$ с в 1,4–1,7 раза соответственно). Это резко изменяет проводимость ионосферной плазмы, а значит, нарушает сложившееся взаимодействие между подсистемами в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера. В результате ударного воздействия на одну из подсистем высокоэнергичные электроны (с энергией $\epsilon_e \approx 10 \div 100$ кэВ) перераспределяются по питч-углам. Некоторая часть электронов высыпается из магнитосферы (точнее, из внутреннего радиационного пояса) в D - и E -области ионосферы. Это увеличивает поглощение зондирующих радиоволн и увеличивает минимальную наблюдаемую частоту f_{\min} на ионограммах.

Более подробно возможный механизм взаимодействия подсистем в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера описан в работе [28]. Детальную теорию механизма ещё предстоит построить.

2) При работе нагревного стенда в других режимах (на более высоких частотах) эффективность возмущения ионосферной плазмы в динамо-области уменьшалась, а значит и снижалась степень взаимодействия ионосферы и магнитосферы, что, в конечном итоге, уменьшало электронную концентрацию N .

По этим же причинам затруднено значительное увеличение концентрации N в ночное время.

3) Всплески частоты f_{\min} чаще возникали с периодом 1 ч, реже с периодом 30 мин, когда нагревный стенд работал в режиме [+30 мин; –30 мин]).

4) Величина возмущений концентрации N убывала при увеличении расстояния от нагревного стенда.

Остаётся непонятным, почему 28 и 30 августа 2012 года в Васильсурске возмущение концентрации N было малым или вообще было вызвано только естественными причинами. Возможно, это связано с развитием возмущений концентрации N вдали от диаграммы направленности ионозонда в Васильсурске, с дрейфом магнитосферных электронов по геомагнитной оболочке и отсутствием (малым потоком) высыпания электронов непосредственно над нагревным стендом. Второй причиной может быть увеличение параметров N и ν , а значит и частоты f_{\min} в пределах облучаемой области. На этом фоне эффект высыпания электронов маскируется. Наконец, нельзя исключать особенности аппаратуры (чувствительность ионозонда). В любом случае этот вопрос требует дальнейших исследований.

В заключение добавим, что полученные в настоящей работе результаты в целом подтверждают результаты более ранних работ [11–20] и результаты исследований [27], выполненных на радаре некогерентного рассеяния в Харькове. В работе [27] описаны возмущения концентрации N на высотах E -области ионосферы, которые предположительно также вызывались высыпанием электронов из внутреннего радиационного пояса.

4.6. Оценка потоков электронов

Основываясь на методике, описанной в работах [21, 27, 30], оценим плотность потока Π_e высокоэнергичных ионизирующих атмосферу электронов, высыпающихся из магнитосферы (внутреннего радиационного пояса). Изменение скорости ионизации можно записать как

$$\Delta q = \alpha N^2 - \alpha_0 N_0^2 \approx \alpha_0 N_0^2 (n^2 - 1), \quad (4)$$

где $\alpha \approx \alpha_0 \approx 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ — коэффициент рекомбинации электронов с молекулярными ионами, $n = \langle N/N_0 \rangle$, N и N_0 — концентрации электронов в возмущённой и невозмущённой областях нижней ионосферы соответственно. Тогда с учётом выражения (4) плотность потока

$$\Pi_e = 2 \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e} \Delta z \Delta q = 2 \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e} \Delta z \alpha_0 N_0^2 (n^2 - 1), \quad (5)$$

где $\varepsilon_i = 35 \text{ эВ}$ — энергия ионизации, Δz — толщина слоя с дополнительной ионизацией, ε_e — энергия электронов.

Положим высоту $z \approx 90 \text{ км}$, концентрацию $N_0 \approx 10^{10} \text{ м}^{-3}$, параметр $n = 2$, толщину $\Delta z \approx 10 \text{ км}$, энергию электронов $\varepsilon_e = 100 \text{ кэВ}$; тогда из соотношения (5) следует, что плотность потока $\Pi_e \approx 6,3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Для сравнения укажем, что в средних широтах фоновое значение потока $\Pi_e \approx 10^5 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [31]. Во время геокосмических бурь, сопровождаемых высыпанием электронов из внутреннего радиационного пояса, поток Π_e увеличивается на несколько порядков, до $10^8 \div 10^9 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [31–33]. В этом смысле воздействие мощного радиоизлучения может стимулировать геофизические эффекты подобные тем, что возникают во время геокосмических бурь. При бурях плотность потока энергии, поступающей в ионосферу на высоких и средних широтах, составляет примерно $10^{-4} \div 10^{-3}$ и $10^{-5} \div 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно. Плотность потока мощного радиоизлучения стенда «Сура» близка к $10^{-5} \div 10^{-4} \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Поскольку эти потоки могут быть соизмеримы, сопоставимыми могут быть и вызванные ими эффекты.

Потоки высокоэнергичных частиц из радиационного пояса, вообще говоря, должны приводить к искусственной авроре. Однако, как показали наши оценки, оптическое свечение ионосферы изменяется слабо, на пределе чувствительности имеющихся фотометров.

О возможности стимулированных процессов в системе Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера также свидетельствуют результаты работы [34].

ВЫВОДЫ

1) Излучение нагревного стенда в режиме [+30 мин; -30 мин] сопровождалось увеличением минимальной наблюдаемой на ионограммах частоты f_{\min} с периодами 0,5 и 1 ч.

2) Наибольшие всплески частоты f_{\min} имели место для ионозонда в Троицке. При этом частота f_{\min} увеличивалась от 1,8 до 3,0÷3,2 МГц. Увеличение частоты f_{\min} в Гайдарах, Прухонице и в Васильсурске 29 августа 2012 года не превышало 0,4 и 0,3 МГц соответственно.

3) Увеличение частоты f_{\min} свидетельствовало о росте концентрации электронов N и увеличении поглощения зондирующих радиоволн и по своим временным масштабам не могло быть связано с увеличением температуры электронов. Оценки показали, что концентрация N увеличивалась в нижней ионосфере в среднем по высоте в 3; 1,4; 1,3 и 1,3÷1,4 раза над ионозондами в Троицке, Гайдарах, Прухонице и Васильсурске соответственно.

4) Остаётся до конца неясной причина незначительных изменений частоты f_{\min} для ионозонда в Васильсурске 28 и 30 августа 2012 года.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Получим соотношение, связывающее частоту f_{\min} с электронной концентрацией N . Считаем, что отсутствуют сильные местные помехи, а также что амплитудно-частотная характеристика приёмного тракта ионозонда в диапазоне частот 1÷3 МГц является линейной.

Будем исходить из основного уравнения дистанционного радиозондирования [35]:

$$q = \frac{P_s}{P_n} = \frac{PGS\sigma}{(4\pi z^2)^2 P_n} \exp(-4K), \quad (\text{П1})$$

где P_s и P_n — мощности сигнала и помехи соответственно, P — мощность радиопередающего устройства, G — коэффициент усиления передающей антенны, S — эффективная площадь приёмной антенны, σ — эффективная площадь рассеяния цели, z — высота цели (высота отражения радиоволны), K — интегральный коэффициент поглощения по трассе зондирующей радиоволны. В соотношении (П1) пренебрегается малыми потерями в антенно-фидерном тракте.

В случае вертикального зондирования ионосферы согласно [26] имеем

$$\sigma = 4\pi z^2 \rho^2, \quad (\text{П2})$$

где ρ — коэффициент отражения радиоволны (по напряжённости поля).

Кроме того, коэффициент усиления передающей антенны связан с её эффективной площадью S_1 следующим образом:

$$G = \eta \frac{4\pi S_1}{\lambda^2} = \eta \frac{4\pi S_1}{c^2} f^2. \quad (\text{П3})$$

Здесь η — КПД антенны, λ — длина радиоволны, f — её частота, c — скорость света в вакууме. Метод вертикального зондирования основан на зеркальном отражении от плазменного слоя, при этом коэффициент отражения $\rho \approx 1$ [26].

Подставляя выражения (П2) и (П3) в (П1), получим

$$q = \eta \frac{PSS_1}{P_n z^2 c^2} f^2 \exp(-4K). \quad (\text{П4})$$

В уравнении (П4) величины η , P , S и S_1 от f практически не зависят. От неё зависят величины P_n , z и K . Мощность P_n в месте расположения ионозонда зависит от частоты f следующим образом согласно [26]:

$$P_n(f_{\min}) = P_{n0} \left(\frac{f_{\min 0}}{f_{\min}} \right)^\beta, \quad (\text{П5})$$

где f_{\min} и $f_{\min 0}$ — значения частоты f_{\min} в возмущённых и невозмущённых условиях соответственно, $P_{n0} = P_n(f_{\min 0})$, показатель степени $\beta \approx 2,5$. В дневное и вечернее время в ходе измерительной кампании частота $f_{\min 0} \approx 1,6$ МГц, а значения частоты f_{\min} достигали примерно 3 МГц. При этом радиоволны с частотами 1,6 и 3,0 МГц в дневное время отражались на высотах около 90 и 100 км соответственно. В ночное время радиоволна с частотой f_{\min} , которая близка к $f_{\min 0}$, отражалась на высотах 240÷270 км.

Основной вклад в поглощение радиоволны с частотой $f_{\min 0}$ дают высоты от 70 км до высоты z_r . Для этого интервала высот интегральный коэффициент поглощения

$$K(f_{\min}) \approx \frac{1}{2c(f_{\min} + f_B)^2} \int_{z_0}^{z_r} f_p^2 \nu \, dz = \frac{e^2}{8c\pi^2 \varepsilon_0 m (f_{\min} + f_B)^2} \int_{z_0}^{z_r} N \nu \, dz, \quad (\text{П6})$$

где $f_B \approx 1,4$ МГц — гирочастота электронов, f_p — плазменная частота электронов, e и m — заряд и масса электрона соответственно, ε_0 — электрическая постоянная, ν — частота соударений электронов, z_0 — высота нижней границы ионосферы. Из формулы (П6) следует, что коэффициент

$$K(f_{\min}) \approx K(f_{\min 0}) \left\langle \frac{N}{N_0} \right\rangle \left(\frac{f_{\min 0} + f_B}{f_{\min} + f_B} \right)^2, \quad (\text{П7})$$

где $\langle N/N_0 \rangle$ — среднее по высотам (от 70 до 90 км) отношение N/N_0 , N_0 — невозмущённая концентрация электронов.

Из формулы (П4) при $f = f_{\min 0}$ получаем фактор

$$q(f_{\min 0}) = \eta \frac{PSS_1 f_{\min 0}^2}{P_{n0} z_{r0}^2 c^2} \exp[-4K(f_{\min 0})], \quad (\text{П8})$$

где $z_{r0} = z_r(f_{\min 0})$.

С учётом выражений (П5) и (П7) из равенства (П4) получаем, что при $f = f_{\min}$ фактор

$$q(f_{\min}) = \eta \frac{PSS_1 f_{\min}^2}{P_{n0} z_r^2(f_{\min}) c^2} \left(\frac{f_{\min}}{f_{\min 0}} \right)^\beta \exp \left[-4K(f_{\min 0}) \left\langle \frac{N}{N_0} \right\rangle \left(\frac{f_{\min 0} + f_B}{f_{\min} + f_B} \right)^2 \right]. \quad (\text{П9})$$

Полагая, что коэффициент $q(f_{\min 0}) = q(f_{\min})$, из формул (П8) и (П9) находим величину

$$\frac{z_{r0}}{z_r} \left(\frac{f_{\min}}{f_{\min 0}} \right)^{\beta/2+1} = \exp \left[2K_0 \left(\frac{n}{n_\infty} - 1 \right) \right] \equiv B, \quad (\text{П10})$$

где

$$n = \langle N/N_0 \rangle, \quad n_\infty = \left(\frac{f_{\min} + f_B}{f_{\min 0} + f_B} \right)^2, \quad K_0 = K(f_{\min 0}).$$

Из (П10) следует оценка для относительного возмущения концентрации электронов:

$$n = n_\infty \left(1 + \frac{\ln B}{2K_0} \right). \quad (\text{П11})$$

При коэффициенте поглощения $2K_0 \gg \ln B$ из формулы (П11) следует более простое выражение для n :

$$n \approx n_\infty,$$

справедливое при очень сильном поглощении зондирующей волны. Отличие величины n_∞ от n не превышает ошибки $\Delta \approx 50\%$.

При малом относительном отличии частот $\delta_f = f_{\min}/f_{\min 0} - 1 \ll 1$ из формулы (П11) находим относительное возмущение концентрации

$$n \approx 1 + \left(\frac{1}{1 + \gamma_f} + \frac{2 + \beta}{4K_0} \right) \delta_f, \quad (\text{П12})$$

где $\gamma_f = f_B/f_{\min 0}$.

Расчёты показали, что в ночное время (при $K_0 \approx 0,05 \div 0,10$) возмущения концентрации N по измерениям частоты f_{\min} могут быть обнаружены лишь при $n_{\min} \approx 2 \div 3$. В переходное время суток (K_0 составляет десятые доли единицы) можно обнаружить увеличение концентрации N , если оно превышает десятки процентов. В дневное время при $K_0 \gg 1$ из выражения (П12) получаем

$$n \approx \frac{\delta_f}{1 + \gamma_f}.$$

При $f_{\min 0} = 1,6$ МГц и $\delta_f = 0,1$ МГц имеем $n_{\min} \approx 1,05$.

Исследования на стенде «Сура» выполнены при финансовой поддержке РФФИ (в рамках научных проектов 13-02-12074 офи_м, 13-02-12241 офи_м) и ФЦП «Геофизика».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
2. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2006. Т. 4, № 12. С. 655.
3. Черногор Л. Ф. // Нелинейный мир. 2007. Т. 5, № 4. С. 198.
4. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. // Radio Physics and Radio Astronomy. 2008. V. 13, No. 2. P. 120.
5. Chernogor L. F. // Int. J. Remote Sensing. 2011. V. 32, No. 11. P. 3199.
6. Черногор Л. Ф. О нелинейности в природе и науке. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2008. 528 с.
7. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
8. Гуревич А. В., Шварцбург А. Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
9. Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. New York, Heidelberg, Berlin: Springer Verlag, 1978. 465 p.
10. Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами // Итоги науки и техники. Сер. «Геомагнетизм и высокие слои атмосферы». М.: ВИНТИ, 1989. 140 с.
11. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
12. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Вестник Харьковского университета. Сер. «Радиофизика и электроника». 1988. № 318. С. 29.
13. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. // Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62.

14. Мисюра В. А., Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1989. Вып. 4. С. 72.
15. Гармаш К. П., Гритчин А. И., Губарев А. А. и др. // Труды НИИР. М.: Радио и связь, 1989. № 9. С. 57.
16. Пахомова О. В., Черногор Л. Ф. // Космическая наука и техника. 1990. Вып. 5. С. 71.
17. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
18. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 6. С. 17.
19. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
20. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36, № 2. С. 75.
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., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 327.
26. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17, № 3. С. 240.
27. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. С. 173.
28. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18, № 1. С. 49.
29. <http://ulcar.uml.edu/DIDBase>.
30. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2000. Т. 5, № 4. С. 371.
31. Wratt D. S. // J. Atmos. Terr. Phys. 1976. V. 38, No. 5. P. 511.
32. Tadokoro H., Tsuchiya F., Miyoshi Y., et al. // Ann. Geophys. 2007. V. 25, No. 6. P. 1359.
33. Соколов С. Н. // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51, № 6. С. 757.
34. Ружин Ю. Я., Кузнецов В. Д., Ковалев В. И. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 2. С. 94.
35. Черногор Л. Ф. Дистанционное радиозондирование атмосферы и космоса. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. 500 с.

Поступила в редакцию 11 июля 2013 г.; принята в печать 31 января 2014 г.

APERIODIC LARGE-SCALE DISTURBANCES IN THE LOWER IONOSPHERE. IONOSONDE OBSERVATION RESULTS

L. F. Chernogor, V. L. Frolov, and V. V. Barabash

We present the observed disturbances of the parameters of the ionosphere affected by high-power radio waves from the SURA heating facility. Ionosondes located in Nizhny Novgorod and Moscow (Russia), Kharkov (Ukraine), and Pruhonice (Czechia) were used for the observations. The diagnostic tools were from 560 to 2200 km away from SURA. Additional ionization layers with a cutoff frequency of 2.6–3.4 MHz were occasionally observed on the ionograms of the Nizhny Novgorod and Moscow stations. The effective height of these layers was 120–160 km and the true height was about 110–130 km. The occurrence of additional ionization layers below 100–130 km was controlled by an increase in the minimum observable frequency (MOF). For the Moscow station, the cutoff frequency increased by about 1 MHz in the daytime and almost did not change in the night time. MOF variations on the

Л. Ф. Черногор, В. Л. Фролов, В. В. Барабаш

ionograms of the Kharkov and Pruhonice stations were less significant (0.3–0.4 MHz) in all time of the day. The observed effects are most probably due to the midlatitude precipitation of electrons from the inner radiation belt, which increased the electron number density in the ionosphere, absorption of the sounding radio waves, and the MOF. Estimated particle flux density was 10^8 – 10^9 $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. The electron number density in the daytime increased by a factor of 2–3.