УДК 550.388+538.566+621.391.21

# КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЕ, СОПРОВОЖДАВШИЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НЕЁ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА «СУРА»

Л. Ф. Черногор<sup>1</sup>, К. П. Гармаш<sup>1</sup>, В. Л. Фролов<sup>2,3</sup>\*

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина <sup>2</sup> Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

<sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

В работе кратко описаны результаты первых (нецеленаправленных) экспериментов по исследованию крупномасштабных (порядка 1000 км) апериодических и квазипериодических возмущений в нижней и средней ионосфере. Перечислены основные результаты современных экспериментов. При помощи методов частичного отражения, вертикального и наклонного многотрассового многочастотного зондирования в 2017–2018 годах проведены комплексные радиофизические наблюдения за крупномасштабными (порядка 1000 км) апериодическими возмущениями в нижней ионосфере и квазипериодическими возмущениями в средней ионосфере, сопровождавшими воздействие на неё мощным (эффективная мощность 40÷95 МВт) нестационарным радиоизлучением стенда «Сура». Наблюдения выполнены в обсерваториях ХНУ им. В. Н. Каразина в течение четырёх измерительных кампаний в 2017-2018 годах. Время запаздывания апериодических возмущений в нижней ионосфере составляло 15÷18 мин, а их длительность 5÷10 мин. Возмущения следовали за включением/выключением мощного радиоизлучения. Обсуждается природа этих возмущений. Основные эффекты в средней ионосфере следующие. При эффективной мощности стенда не менее 40÷60 МВт примерно через 40÷60 мин после начала его излучения на радиотрассах, удалённых на расстояния около 1000 км от места воздействия, доплеровские спектры заметно уширяются, проявляется многолучевость. Периодический нагрев ионосферы приводил к периодическим вариациям доплеровского смещения частоты (с максимальным отклонением 0,1÷0,2 Гц) и амплитуды сигнала. Продолжительность реакции составляет 70÷180 мин. Этим вариациям соответствует относительное возмущение концентрации электронов от 3 до 12%. Квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты и амплитуды вызваны генерацией и распространением волн со скоростями от 0,2 до 1,6 км/с и периодами 15÷30 мин. Скорость 0,2÷0,4 км/с, в отличие от скорости 1,6 км/с, наблюдается регулярно. В работе также обсуждаются основные направления будущих исследований проявлений крупномасштабных апериодических и квазипериодических возмущений в ионосфере и их влияния на характеристики распространения радиоволн на удалённых радиотрассах.

### ВВЕДЕНИЕ

Воздействие мощным радиоизлучением на ионосферную плазму приводит к целому комплексу физических эффектов [1–11]. При этом в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда и вблизи неё генерируются возмущения с различными пространственными и временными масштабами [1–4, 10, 11]. Перечислим основные эффекты, обнаруженные при исследовании локализованных (с масштабами 10÷100 км) возмущений в ионосфере, вызванных воздействием мощного радиоизлучения [2, 8, 10, 11]:

1) структуризация ионосферной плазмы, вызванная образованием вытянутых вдоль геомагнитного поля неоднородностей концентрации электронов;

2) аномальное поглощение радиоволн с обыкновенной поляризацией, связанное с резонансным эффектом на частоте верхнего гибридного резонанса;

<sup>\*</sup> frolov@nirfi.unn.ru

3) широкополосное (порядка 100 кГц) поглощение других радиоволн в окрестности частоты мощной радиоволны;

4) искусственное радиоизлучение из возмущённой области на частотах, сдвинутых на 100÷ ÷300 кГц относительно частоты мощной радиоволны;

5) возбуждение очень сильных собственных колебаний в ионосферной плазме;

6) эффективное ускорение электронов;

7) сильное искусственное оптическое свечение ионосферы;

8) высыпание электронов из радиационного пояса на площади с размерами 400 × 1000 км с энергиями порядка 100 кэВ;

9) возмущение нейтральной составляющей атмосферы.

Особый интерес представляет изучение возмущений в околоземной плазме, распространяющихся на расстояния 100÷1000 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, проведённых в 1970–1980-х годах, выполнен в работах [12–14].

Исследования возмущений в нижней ионосфере (в областях D и E) проводились при помощи методов частичных отражений, ионозондов и сигналов очень низкочастотного (OHЧ) диапазона (см., например, [12–16]). Оказалось, что процессы в нижней ионосфере и в области Fсущественно различались. Возмущения в нижней ионосфере были апериодическими, их возникновение 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. Возмущения могли релаксировать до выключения нагревного стенда, т. е. наблюдался эффект исчерпания. В ряде случаев новые всплески возмущений возникали при переключении мощности или выключении нагревного стенда, т. е. имел место эффект переключении мощности или выключении

В области F ионосферы крупномасштабные возмущения обычно представляют собой перемещающиеся ионосферные возмущения, связанные с генерацией и распространением акустикогравитационных волн в верхней атмосфере [17–22]. Возможность генерации таких волн предсказана в теоретических работах [23, 24].

Волновые возмущения в ионосфере изучаются многими дистанционными методами (см., например, [25–29]). Естественно, что эти методы также применимы для исследования волновых возмущений искусственной природы.

Первые результаты наблюдений перемещающихся ионосферных возмущений при помощи ряда радиофизических методов описаны в работах [17–22]. Чаще всего перемещающиеся ионосферные возмущения имели периоды 15÷40 мин и скорость распространения около  $0,3\div0,6$  км/с для высот  $z \approx 150\div300$  км. Амплитуда относительных возмущений концентрации электронов в них составляет  $\delta_N = \Delta N/N \approx 0,01$ .

Заметим, что здесь и далее под скоростью понимается кажущаяся скорость, представляющая собой проекцию на направление «нагревный стенд—место диагностики».

Для подтверждения ранее обнаруженных особенностей крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере и установления новых закономерностей целесообразно привлечение дополнительных методов диагностики этих возмущений.

Целью настоящей работы является краткое изложение результатов предшествующих экспериментов, направленных на изучение апериодических и квазипериодических возмущений в нижней и средней ионосфере, а также результатов наблюдения крупномасштабных (порядка 1000 км) апериодических возмущений в нижней ионосфере и квазипериодических возмущений в средней

442

ионосфере, вызванных воздействием мощного радиоизлучения стенда «Сура» на ионосферу, выполненных в 2017–2018 годах. При этом, наряду с традиционными, привлекались и другие методы диагностики и методики анализа сигналов.

### 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

#### 1.1. Результаты ранних экспериментов

В начале 1970-х годов с использованием нагревного стенда НИИ Радио (г. Москва), была проведена серия экспериментов с целью диагностики нижней ионосферы при помощи эффектов самовоздействия и кроссмодуляции радиоимпульсов (см., например, [12–14]). Основные параметры стенда следующие: импульсная мощность  $P \approx 10$  MBT, средняя мощность 0,1 MBT, коэффициент усиления антенны  $G \approx 100$ ; частота  $f = 1,3 \div 1,4$  МГц, длительность импульса  $\tau \approx 500$  мкс. Наряду с хорошо известными нагревными эффектами, зафиксированы кратковременные (около 1 мин) всплески значений коэффициентов кросс-модуляции, которые примерно пропорциональны концентрации электронов на высотах 70÷80 км. Они появлялись преимущественно при первом в данном эксперименте включении мощного радиоизлучения с запаздыванием  $\Delta t \approx 5 \div 15$  мин и длились  $\Delta T \approx 1 \div 10$  мин. Проявление эффекта и его величина определялись геофизической обстановкой. В этих экспериментах также замечено, что минимальная наблюдаемая на ионограммах частота могла увеличиваться на  $0.3 \pm 0.1$  МГц. Наблюдаемую величину возмущения и отсутствие корреляции с выключением мощной установки невозможно объяснить изменением температуры электронов и скоростей химических реакций. Скорее всего, проявлялся дополнительный источник ионизации. Для подтверждения этого в 1978 году были проведены эксперименты в высокоширотной ионосфере на стенде ПГИ КФ АН (г. Апатиты) [15]. При этом ожидалось, что проявление предполагаемого источника ионизации окажется более сильным. Основные параметры нагревного стенда были следующие: поляризация волны линейная,  $PG \approx$  $\approx 5 \div 10 \text{ MBt}, f = 3.3 \text{ M}$ Гц, продолжительность нагрева, как и паузы, составляла 30 мин. В первые минуты нормированная амплитуда отражённого сигнала уменьшалась примерно вдвое. В трёх сеансах она снизилась до 0,1. Такие эффекты наблюдались лишь при повышенной геомагнитной активности. Во всех сеансах уменьшение амплитуды чётко коррелировало с включением мощного радиоизлучения, в то время как связь с выключением не обнаружена. Продолжительность аномального ослабления составляла около 30 мин. Поскольку частота зондирующих сигналов равнялась 2 МГц, ослабление имело место в нижней ионосфере и было связано с увеличением концентрации электронов N, которое может достигать 100%.

Оказалось, что воздействие мощного радиоизлучения на ионосферу приводило к возникновению в околоземной среде целого комплекса геофизических и электромагнитных эффектов. К обнаруженным проявлениям геофизических эффектов можно отнести следующие [13, 14]: 1) образование слоёв ионизации на высотах  $70\div100$  км с характерным горизонтальным масштабом  $L \approx 1000$  км; 2) генерация или усиление спорадического слоя (высо́ты 100 км); 3) усиление неоднородной структуры в нижней, средней и верхней ионосфере ( $L \approx 1000$  км); 4) генерация и распространение волновых возмущений концентрации плазмы в средней ионосфере ( $150\div300$  км), имеющих скорость  $v \approx 0,3\div0,6$  км/с и период  $T \approx 5\div20$  мин ( $L \approx 1000$  км); 5) увеличение температуры электронов на 200÷500 K во внешней ионосфере с  $L \sim 1000\div2000$  км; 6) увеличение температуры и концентрации электронов примерно на 200 K и 10% соответственно в магнитосопряжённой нагревному стенду области.

Примерами стимулированных электромагнитных эффектов являются следующие: 1) вариации уровня регистрируемых на Земле электромагнитных шумов в диапазоне частот 1÷20 МГц и

пире; 2) усиление уровня крайне низкочастотных (КНЧ)–ОНЧ излучений во внешней ионосфере (высота  $z \approx 500 \div 700$  км); 3) генерация квазипостоянных электрических полей с напряжённостью  $E \approx 30$  мВ/м во внешней ионосфере ( $L \approx 1000$  км); 4) усиление на  $1 \div 4$  нТл вариаций геомагнитного поля, регистрируемого на Земле ( $L \gtrsim 500$  км); 5) увеличение примерно в 3 раза частоты появления свистов.

Из перечисленного комплекса эффектов следует выделить явления в магнитной силовой трубке и в магнитосопряжённой области, а также волновые возмущения с  $v \approx 0.3 \div 0.6$  км/с. Первые связаны с переносом тепла и энергии низкочастотных излучений (свисты и др.) вдоль силовой трубки. Вторые — с распространением волн плотности (вдоль ионосферы) от места расположения источника возмущения. Оставшиеся эффекты собственно и относятся к группе стимулированных мощным радиоизлучением. Механизм их генерации и переноса не столь очевиден и ещё требует детального изучения. В пользу того, что эти эффекты являются процессами стимулированного типа, свидетельствуют следующие аргументы. Возмущения развивались через  $5\div15$  мин после включения мощного радиоизлучения, но могли заканчиваться до или же продолжаться (даже усиливаться) после прекращения воздействия источника возмущения. Эффекты наблюдались на удалениях до 1000 км от нагревного стенда. Величина возмущений и их проявление существенно зависели от космической погоды. Выключение источника также могло приводить к эффектам, подобным тем, что возникали при его включении. Эти факты свидетельствовали о том, что мощное нестационарное радиоизлучение выступало в роли стимулятора естественных процессов.

Добавим, что стимулированные мощным радиоизлучением эффекты проявлялись в ряде нецеленаправленных экспериментов. Их перечень представлен в работах [13, 14].

#### 1.2. Крупномасштабные апериодические возмущения

Новый этап в исследовании крупномасштабных возмущений начался в 1983 году после ввода в строй нагревного стенда «Сура». Результаты первых наблюдений опубликованы в работах [12– 14]. Была подтверждена возможность возникновения крупномасштабных апериодических, т. е. стимулированных мощным радиоизлучением, возмущений в ионосфере.

Результаты современных исследований крупномасштабных апериодических возмущений представлены в работах [22–24, 30, 31]. В работе [16] описаны фазовые вариации распространяющихся в нижней ионосфере километровых радиоволн, вызванные включением и выключением стенда «Сура». Амплитуда этих вариаций составляет 5°÷6°. Авторы [22] при помощи Харьковского радара некогерентного рассеяния обнаружили крупномасштабные апериодические всплески концентрации электронов в области E ионосферы, коррелировавшие с началами циклов нагрева радиоизлучением стенда «Сура». Наибольшие всплески относительных возмущений концентрации электронов  $\delta N$  наблюдались на высоте  $z \approx 100$  км и достигали  $0,6\div0,7$ . Эти возмущения уменьшались до  $0,2\div0,3$  на высоте 120 км и практически отсутствовали на высотах  $z \ge 140$  км. Время запаздывания  $\Delta t$  этих возмущений составляло около 10 мин, а продолжительность  $\Delta T \approx \approx 10\div20$  мин.

В работах [23, 24] наблюдения за крупномасштабными апериодическими возмущениями осуществлялось при помощи сети ионозондов, удалённых от нагревного стенда «Сура» на расстояния R около 560; 960 и 2 200 км. Увеличение минимальной наблюдаемой на ионограммах частоты  $f_{\min}$  при  $R \approx 450$  км достигало 1,0÷1,6 и 0,2 МГц в дневное и вечернее время соответственно. При  $R \approx 960$  км и  $R \approx 2200$  км это увеличение было около 0,4 и 0,3 МГц соответственно. Время запаздывания  $\Delta t \approx 16$  мин, но иногда  $\Delta t \approx 1$  мин или  $\Delta t \approx 31$  мин (ионозонды работали в режиме одна ионограмма за 15 мин).

В работе [30] описано появление апериодических всплесков уровня горизонтальных компонент

геомагнитного поля в диапазоне периодов 300÷1000 с. При этом  $R\approx 960$ км,  $\Delta t\approx 10\div 20$ мин, а  $\Delta T\approx 10\div 45$ мин.

В работе [31] изложены результаты ионозондовых наблюдений за апериодическими всплесками критической частоты  $f_{0F_2}$ , которые сопровождали воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура» с длительностью 15 мин и паузой 15 мин (далее в режиме [+15 мин; – -15 мин]). При этом  $\Delta t \approx 5 \div 15$  мин, а  $\Delta T \approx 10 \div 15$  мин. Горизонтальный размер возмущённой области ионосферы был не менее 2 200 км. При увеличении R величина возмущений несколько уменьшалась. При режиме стенда [+5 мин; -5 мин] в ряде случаев наблюдался эффект накопления возмущений. Апериодические всплески  $f_{0F_2}$  авторы [31] объясняют увеличением N в области F на 1 $\div$ 10%.

Подтверждено, что сам факт появления и величина крупномасштабных апериодических возмущений в ионосфере зависят от космической погоды, времени суток и режима работы нагревного стенда.

## 1.3. Крупномасштабные квазипериодические вариации

Возможность генерации перемещающихся ионосферных возмущений при помощи мощного периодического радиоизлучения теоретически была обоснована в середине 1970-х годов в работе [19]. В работе [20] описан иной механизм генерации волновых возмущений в диапазоне акустико-гравитационных волн. Он связан с модуляцией токовой струи на высотах динамообласти ионосферы под действием периодического нагрева ионосферной плазмы мощным радиоизлучением. В работе [32] оценён относительный вклад различных механизмов.

Первые экспериментальные исследования перемещающихся ионосферных возмущений были проведены в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (тогда ещё ХГУ) вскоре после введения в эксплуатацию в НИРФИ (г. Нижний Новгород) нагревного стенда «Сура» [17, 18]. В этих работах показана принципиальная возможность генерации и распространения на расстояния  $R \approx 1\,000$  км перемещающихся ионосферных возмущений.

Результаты современных экспериментальных исследований представлены в [33–40]. В этих работах для обнаружения волновых возмущений в ионосфере использовался доплеровский радар [34, 35, 37–39], харьковский радар некогерентного рассеяния [33, 36, 40] и магнитометрфлюксметр [30]. В работах [32–40] установлены основные особенности волновых возмущений в ионосфере в диапазоне акустико-гравитационных волн (периоды  $T \approx 1 \div 180$  мин), сопровождавших воздействие на околоземную плазму мощным периодическим радиоизлучением стенда «Сура». Показано, что эффективность генерации перемещающихся ионосферных возмущений существенно зависит от космической погоды, времени суток и режима излучения нагревного стенда.

Основные результаты исследований [33–40] можно сформулировать следующим образом.

Периодический нагрев верхней ионосферы мощным радиоизлучением в большинстве случаев приводит к генерации или усилению перемещающихся ионосферных возмущений с периодом повторения циклов нагрев/пауза, регистрируемых на расстоянии  $R \approx 1\,000$  км. Эффективным режимом излучения стенда был режим, в котором для модификации ионосферы использовалась радиоволна с обыкновенной (О) поляризацией с наклоном диаграммы направленности антенны  $12^{\circ}$  к югу при длительных (15÷30 мин) интервалах нагрева и паузы и эффективной мощности  $PG \geq 40\div50$  МВт. Эффективность генерации волновых возмущений в дневное время на частотах стенда f < 5 МГц снижалась из-за сильного поглощения радиоизлучения в нижней ионосфере и дефокусировки радиоволны на высотах  $120\div180$  км.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. Л. Фролов

Экспериментально установлена возможность генерации мощным периодическим радиоизлучением и акустико-гравитационных волн с периодами вблизи собственных периодов атмосферы (период акустической отсечки и период Брента—Вяйсяля).

Установлено, что длительность цугов колебаний определялась не продолжительностью серии циклов нагрев/пауза, а общим изменением состояния системы атмосфера—ионосфера—магнитосфера, когда ударное воздействие на неё при включении/выключении серии циклов приводило к генерации цугов колебаний. Период цугов определялся периодом цикла или полуцикла воздействия. Это означает, что механизм генерации акустико-гравитационных волн в этих случаях отличался от рассмотренного ранее классического механизма [19, 20].

Фазовые и групповые скорости акустико-гравитационных волн были на несколько десятков процентов ниже скорости звука, что согласуется с имеющимися теоретическими представлениями. Скорости этих волн в зависимости от высоты изменялись в пределах  $300\div500$  м/с. Относительное возмущение концентрации электронов  $\delta N$  в поле внутренней гравитационной волны составляло  $0.5\div2.0\%$ .

Групповая скорость цугов внутренних гравитационных волн, период которых лишь незначительно (на 5÷10%) превышал период Брента—Вяйсяля, была существенно меньше скорости звука (около  $80\div160 \text{ м/c}$ ). При этом  $\delta_N \approx 1,1\div1,5\%$ .

Установлена зависимость эффективности генерации внутренних гравитационных волн от эффективной мощности излучения стенда: при  $PG \approx 50$  МВт волны не генерировались, точнее их амплитуда была на уровне естественных флуктуаций, а при  $PG \approx 130$  МВт эти волны уверенно наблюдались, при этом  $\delta_N \approx 1 \div 10 \%$ .

В день повышенной геомагнитной активности амплитуда колебаний с периодами 4÷6 и 8÷ ÷12 мин была несколько выше, чем в магнитоспокойные дни. С другой стороны, генерируемые магнитной бурей колебания в этих диапазонах затрудняли идентификацию колебаний, вызванных воздействием мощного радиоизлучения. Умеренная магнитная буря не повлияла заметно на амплитуду колебаний с периодом 13÷17 мин.

Установлена возможность генерации инфразвука под действием мощного радиоизлучения. Инфразвуковая волна приводила к модуляции доплеровского смещения частоты с периодами 5 и 10 мин и амплитудой 50÷60 и 130 мГц соответственно. Относительное возмущение концентрации электронов при этом было около 0,3÷0,4 и 1,6% соответственно. Скорость распространения инфразвука в зависимости от высоты изменялась от 320 до 530 м/с (бо́льшим высотам соответствовало большее значение скорости).

Относительная амплитуда возмущений концентрации электронов N в поле акустической (инфразвуковой) и гравитационной волн составляла около  $0,1\div1,0$  и  $1\div10\%$  соответственно.

Параметры перемещающихся ионосферных возмущений существенно зависели от близости периода волн к периодам колебаний атмосферы на собственных частотах (периодам акустической отсечки и Брента—Вяйсяля).

Для наблюдения возмущений в ионосфере, вызванных мощным радиоизлучением, кроме наземных методов, использовалось просвечивание ионосферы сигналами низкоорбитных и высокоорбитных GPS-спутников с привлечением методов радиотомографии [29, 41–43]. Просвечивание ионосферы осуществлялось как вблизи диаграммы направленности, так и на удалении 700÷800 км от неё. Обнаружены квазипериодические возмущения полного электронного содержания, составляющие 0,25÷0,30 TECU (1 TECU =  $10^{16}$  м<sup>-2</sup>), с периодами 12÷22 мин и пространственным масштабом, равным 200÷250 км [29].

В работе [42] перечислены результаты исследований генерации перемещающихся ионосферных возмущений при периодическом нагреве околоземной плазмы мощным радиоизлучением.

Добавим, что результаты первых кратких сообщений авторов из США [44, 45], в целом, под-

тверждают результаты наших исследований.

Для оптимизации параметров нагревного стенда, способного создавать своим радиоизлучением крупномасштабные возмущения, для изучения зависимости параметров этих возмущений от космической погоды и времени суток требуются новые исследования. Они были проведены авторами в ряде измерительных кампаний в 2017–2018 годах.

### 2. СРЕДСТВА И МЕТОДЫ

Для диагностики возмущений, сопровождавших воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура», использовались средства, размещённые в Радиофизической и Магнитометрической обсерваториях ХНУ им. В. Н. Каразина [46]. К ним относятся радар частичных отражений, радар вертикального доплеровского зондирования, цифровой ионозонд и комплекс наклонного зондирования ионосферы.

Радар частичных отражений предназначен для исследования процессов и получения высотных профилей параметров нижней (60÷100 км) ионосферы. Конструктивно он реализован на базе компьютера с подключённым к нему комплектом аппаратуры «КАМАК», радиоприёмного устройства синтезаторного типа P-399A «Катран», радиопередающего устройства импульсного излучения (обычно длительность импульса 25 мкс, частота повторения 1 Гц) с мощностью 100 кВт, синтезатора частоты Ч6-31 и соответствующих блоков управления ими, а также антенной системы с коэффициентом усиления  $G \approx 30$ .

Радар вертикального доплеровского зондирования используется для регистрации динамических процессов в средней ионосфере (высоты 100÷400 км), вызванных различными источниками возмущений. Основные параметры радара: диапазон частот  $f = 1\div24$  МГц, импульсная мощность радиопередающего устройства 1 кВт, длительность зондирующего импульса  $\tau \approx 500$  мкс, частота повторения импульсов 100 Гц, полоса пропускания фильтра радиоприёмного устройства 10 Гц. Антенная система представляет собой вертикальный ромб с  $G \approx 1\div10$  в зависимости от частоты зондирующей волны. При таком потенциале радара отношение сигнал/помеха q в ночное время может достигать  $10^5\div10^6$ . В дневное время q обычно на  $1\div2$  порядка меньше. Радар сопряжён с персональным компьютером, образуя программно-аппаратную систему, осуществляющую измерения и предварительную обработку отражённого от ионосферы сигнала в реальном масштабе времени. Высотная протяжённость отражённого сигнала существенно превышает величину  $c\tau/2 \approx 75$  км (c — скорость света в вакууме). Поэтому используется стробирование по высоте с дискретностью  $\Delta z = 75$  км в диапазоне действующих высот  $z' = 75\div450$  км. В основном канале амплитуда сигнала принимает максимальные значения, в других каналах она обычно меньше.

Цифровой ионозонд включает в себя доработанное радиопередающее устройство «Бриг-2», радиоприёмное устройство IC-R75, синтезатор прямого цифрового синтеза для формирования излучаемых радиоимпульсов нужной частоты и продолжительности, а также микроконтроллерный блок, который осуществляет общую синхронизацию работы ионозонда, оцифровку принято-го радиосигнала и поддерживает связь с внешним компьютером. Диапазоны излучаемых частот 1÷16 МГц либо 1,5÷8,0 МГц, число частот в полосе излучения 400. Длительность зондирующих импульсов 100 мкс, период их повторения 125 Гц. Время приёма одной ионограммы около 40 с.

Программно-аппаратный комплекс наклонного многотрассового многочастотного зондирования ионосферы, размещённый в Магнитометрической обсерватории ХНУ им. В. Н. Каразина (с. Граково), использует как собственные радиопередающие устройства, расположенные в Радиофизической обсерватории ХНУ им. В. Н. Каразина (с. Гайдары), так и радиопередающие устройства вещательных и других служебных станций различных диапазонов (от 66,(6) кГц до

30 МГц) [43]. Из-за низких значений критической частоты в 2017–2018 годах непрерывные измерения выполнялись на частотах 3,2 и 4,2 МГц (трасса Гайдары—Граково) и 4,996 МГц (трасса Талдом—Граково). Длина радиотрасс *R* вдоль поверхности Земли при этом составляла 44 и 790 км соответственно.

Для системного спектрального анализа, описанного в работе [47], использовались взаимно дополняющие друг друга оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование. Как известно, первое имеет лучшее разрешение по времени. Преимущество адаптивного преобразования Фурье заключается в лучшем разрешении по периоду, поскольку адаптация проводится к периодам искомых спектральных составляющих. Вейвлетпреобразование, как известно, представляет собой «математический микроскоп», т. е. «уравнивает шансы» гармоник с различными периодами [48]. В качестве базисной функции использовался вейвлет Морле, который представляет собой цуг колебаний. Именно такой вейвлет эффективен для обнаружения ограниченных по времени колебаний [49].

Системный спектральный анализ временны́х вариаций доплеровского смещения частоты и амплитуды сигнала в полосе приёма выполнен для диапазона периодов 5÷40 мин.

В ионосфере апериодические и волновые возмущения различной природы существуют практически всегда. Потребовалась разработка методики выделения возмущений, связанных с воздействием мощным радиоизлучением. В частности, при идентификации волновых возмущений искусственного происхождения, основываясь на результатах ранее выполненных исследований [30, 31, 33–40], мы использовали ряд признаков: время запаздывания возмущений (их скорость распространения), увеличение скорости распространения при росте высоты (увеличении частоты зондирующей радиоволны), соответствие длительности волнового цуга длительности циклов нагрева, соответствие периодов возмущений периоду циклов нагрева, а также зависимость амплитуды возмущений от эффективной мощности стенда.

Далее описаны результаты измерительных кампаний 2017–2018 годов. В 2017 году нагревный стенд работал 6–9 июня, 18–27 сентября, а в 2018 году — 27– 30 августа, 17–19 сентября. С контрольными днями общая продолжительность наблюдений составила 33 дня. За это время было несколько сотен включений/выключений мощного стенда. В большинстве случаев генерировались искомые возмущения. Это свидетельствует о репрезентативности выборки возмущений.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЭФФЕКТОВ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

#### 3.1. Метод частичных отражений

Пример временны́х вариаций амплитуд частично отражённого сигнала и помехи, последовавших за включением/выключением мощного радиоизлучения, приведён на рис. 1. Видно, что в диапазоне высот 88,5÷94,5 км с временем запаздывания  $\Delta t \approx 15\div18$  мин наблюдались всплески амплитуд  $A_{-}$  частично отражённого сигнала с необыкновенной поляризацией, с длительностью всплесков  $\Delta T \approx 5\div10$  мин. Добавим, что погрешность оценки времени запаздывания и временны́х интервалов здесь и далее составляет около 1 мин. Сначала отмечался постепенный рост  $A_{-}$ , затем её уменьшение. Новый всплеск  $A_{-}$  регистрировался через 18 мин после выключения нагрева, длившегося 30 мин. Следующее включение мощного радиоизлучения привело к новому увеличению  $A_{-}$  примерно в 4÷6 раз.



Рис. 1. Временны́е вариации амплитуд частично отражённого сигнала и помехи с необыкновенной поляризацией 21.09.2017. Частота радара частичных отражений 3 МГц. Режим нагрева здесь и далее показан на оси времени. Эффективная мощность излучения стенда 50 МВт, до 11:30 UT f = 4544 кГц, после f = 4300 кГц

#### 3.2. Метод доплеровского зондирования

Пример временны́х вариаций доплеровских спектров и амплитуд сигнала биений отражённого сигнала и сигнала гетеродина на наклонных трассах показан на рис. 2. Расстояние между пунктами Гайдары—Граково составляло 44 км, а между пунктами Талдом—Граково 790 км. В этом эксперименте эффективная мощность излучения нагревного стенда равнялась PG = 60 MBT. Режим работы нагревного стенда «Сура» был следующим: 10 мин — излучение, 10 мин — пауза. Для сигнала на частоте f = 4,2 МГц через  $\Delta t \approx 45 \div 50$  мин после начала нагрева наблюдались квази-

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. Л. Фролов



Рис. 2. Временны́е вариации доплеровских спектров (верхние части панелей) и амплитуд (нижние части панелей) сигнала биений на трассах Гайдары—Граково (3,2 МГц, *a* и 4,2 МГц, *б*) и Талдом—Граково (4,996 МГц, *в*) 27.08.2018. Эффективная мощность излучения стенда 60 МВт, *f* = 4544 кГц. Штриховой линией показан момент захода Солнца на высоте 0 км

периодические вариации доплеровских спектров с периодом  $T \approx 10$  мин и длительностью  $\Delta T \approx 20$ ; 130 мин. Особенно чётко волновой процесс отмечался с 13:05 до 14:30 UT. Для сигнала на



Рис. 3. Временны́е вариации частоты  $f_{0F_2}$ , действующей высоты следа от области F и частоты  $f_{\min}$  на ионограммах (тонкой линией показана сглаженная форма — тренд), а также их флуктуаций (нижняя кривая) 19.09.2018. Штриховыми вертикальными линиями показаны моменты восхода и захода Солнца на высоте 0 и 100 км. Эффективная мощность излучения стенда 45 MBt,  $f = 4\,300$  к $\Gamma$ ц

частоте 3,2 МГц (рис. 2*a*)  $\Delta t \approx 60$  мин,  $\Delta T \approx 110 \div 120$  мин. Радиоволна с частотой  $f \approx 4,996$  МГц отражалась на высотах 100÷110 км, поэтому вариации доплеровских спектров были апериодическими, как и в методе частичных отражений,  $\Delta t \approx 15 \div 20$  мин,  $\Delta T \approx 20$  мин. На всех трассах с  $\Delta t \approx 30 \div 60$  мин наблюдалось уширение доплеровских спектров, вызванное многолучевостью.

#### 3.3. Метод вертикального зондирования

Пример временны́х вариаций частоты  $f_{0F_2}$ , действующей высоты h следа от области  $F_2$  и частоты  $f_{\min}$  на ионограммах показан на рис. 3. Видно, что реакция величин  $f_{0F_2}$  и h возникала при включении, а иногда и при выключении нагревного стенда. В вечернее время реакция практически отсутствовала. Отмечались всплески  $f_{\min}$  с амплитудой  $0,1\div0,2$  МГц и  $\Delta t \approx 10\div20$  мин,

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. Л. Фролов



Рис. 4. Временны́е вариации доплеровских спектров и амплитуды сигнала (внизу) на трассе Талдом—Граково 08.06.2017. Штриховыми вертикальными линиями показаны моменты захода Солнца на высоте 0 и 100 км. Эффективная мощность излучения стенда 95 МВт, f = 4.785 кГц

 $\Delta T \approx 5 \div 10$  мин.

Заметим, что вариации действующей высоты на рис. 3 вызваны не только нагревом ионосферы, но и естественными флуктуациями. Уровень флуктуаций до включения нагрева, однако, был в несколько раз меньше, чем после включения нагревного стенда. Вариации, связанные с включением мощного радиоизлучения, действительно проявляются спустя 3,5 ч и имеют квазипериодический характер. Скорее всего, они связаны с генерацией квазипериодических возмущений, обсуждаемых в данной работе. В вечернее время такие возмущения отсутствуют. Подобная картина наблюдалась и в другие сутки. По-видимому, это связано с состоянием атмосферы и ионосферы в вечернее время, а также с механизмами возбуждения возмущений, генерируемых в дневное время. Эти механизмы требуют дальнейшего изучения.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЭФФЕКТОВ В СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Пример временны́х вариаций доплеровских спектров на наклонной трассе Талдом— Граково длиной 790 км приведён на рис. 4. Видно, что воздействие мощным радиоизлучением на ионосферу приводило к заметному уширению доплеровских спектров.

Пример системного спектрального анализа временны́х вариаций доплеровского смещения частоты на этой же трассе приведён на рис. 5*a*. Из него видно, что до включения стенда характер доплеровского смещения частоты был хаотическим. С временем запаздывания  $\Delta t \approx 60$  мин появились спектральные составляющие с периодом  $T \approx 30$  мин. При этом длительность воздействия составляла 15 мин, пауза также длилась 15 мин (режим [+15 мин; -15 мин]). Продолжительность квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты  $\Delta T \approx 3$  ч, амплитуда доплеровского смещения частоты  $f_{\rm d} \approx 0,10\div0,15$  Гц.

Приведём пример системного спектрального анализа вариаций доплеровского смещения частоты на более короткой трассе Гайдары—Граково ( $R \approx 44$  км). До включения стенда в режиме [+30 мин; -30 мин] в спектре доплеровского смещения частоты регистрировались составляющие



Рис. 5. Результаты спектрального анализа доплеровского смещения частоты при помощи оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования (сверху вниз). Справа показаны энергограммы (распределения энергий по периодам), панель *a* соответствует трассе Талдом—Граково для 08.06.2017 (эффективная мощность излучения стенда 95 МВт,  $f = 4.785 \text{ к}\Gamma$ ц); панель  $\delta$  — трассе Гайдары—Граково для 17.09.2018 (эффективная мощность излучения стенда 65 МВт,  $f = 4.544 \text{ к}\Gamma$ ц). Штриховыми линиями показаны моменты захода Солнца на высоте 0 и 100 км

с периодами около 20 и 40 мин, а после его включения — с периодами 30 и 60 мин (рис. 56).

При воздействии радиоизлучения в режиме [+15 мин; -15 мин] в вечернее время наблюдалось два типа возмущений со следующими параметрами: 1)  $\Delta t_1 \approx 10$  мин,  $T_1 \approx 15$  мин,  $\Delta T_1 \approx 70$  мин, кажущаяся скорость распространения возмущений  $v_1 \approx 1.6$  км/с,  $f_{d1} \approx 0.15$  Гц; 2)  $\Delta t_2 \approx 85$  мин,  $T_2 \approx 30$  мин,  $\Delta T_2 \approx 90$  мин,  $v_2 \approx 190$  м/с,  $f_{d2} \approx 0.2$  Гц (рис. 6*a*). При этом во временны́х вариациях флуктуаций амплитуды сигнала отмечался период  $T \approx 30$  мин (рис. 6*b*).

При работе стенда в том же режиме вечером 7 июня 2017 года с запаздыванием  $\Delta t \approx 40$  мин  $(v \approx 400 \text{ м/c})$  наблюдались квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты и амплитуды с периодами около 15 и 30 мин (рис. 7*a*, *б* соответственно). При этом  $f_{d2} \approx 0.15 \div 0.30$  Гц,  $\Delta T \approx 180$  мин.

При амплитудах доплеровского смещения частоты  $f_{\rm d} \approx 0.15$  Гц и 0.20 Гц при  $T \approx 15$  мин и 30 мин относительные амплитуды вариаций концентрации электронов принимают значения  $\delta_N \approx 3 \div 4$  и  $9 \div 12\%$  соответственно.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Качественно новый уровень исследования физико-химических процессов в геокосмической среде начался после того, как были сформулированы основные положения системной парадигмы [9, 50, 51]. Было доказано, что ни одну из земных оболочек нельзя описать с помощью само-

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. Л. Фролов



Рис. 6. Результаты спектрального анализа доплеровского смещения частоты (a) и амплитуды (б) на трассе Гайдары—Граково 06.06.2017 (первое включение: эффективная мощность 80 MBr,  $f = 4544 \text{ к}\Gamma \text{q}$ ; остальные: PG = 90 MBr,  $f = 4785 \text{ к}\Gamma \text{q}$ ) при помощи оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования (сверху вниз). Штриховыми линиями показаны моменты захода Солнца на высоте 0 и 100 км

достаточной модели, т. к. между оболочками имеет место взаимодействие. 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 энергии, излучений, частиц и т. д. «снизу» часто достаточно рассмотрения системы Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера (см., например, [9, 50, 51]). Важно, что упомянутые системы являются открытыми динамическими нелинейными системами. Такие системы обладают рядом нетривиальных свойств. Например, в этих системах возможно срабатывание триггерных механизмов высвобождения энергии [9, 50, 51].

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

Среди активных экспериментов важнейшее место занимает модификация геокосмической плазмы мощным радиоизлучением. Такие эксперименты относятся к экологически чистым, они могут многократно повторяться. Именно по этой причине взаимодействию мощного радиоизлучения с геокосмической плазмой последние 50 лет уделяется значительное внимание (см., например, [1–11]). При этом, как правило, исследуются процессы, протекающие в пределах диаграммы направленности антенны нагревного стенда. Такие процессы были названы локализованными (см., например, [9, 12–14]). Горизонтальный размер областей их локализации обычно не превышал 10÷100 км [9].

В то же время существует иное научное направление, целью которого является изучение возможности возникновения возмущений в ионосфере далеко за пределами диаграммы направ-



Рис. 7. Результаты спектрального анализа доплеровского смещения частоты (a) и амплитуды (б) на трассе Гайдары—Граково для 07.06.2017 (эффективная мощность 75 МВт, f = 4544 кГц) при помощи оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования (сверху вниз). Справа от панелей показаны энергограммы (распределения энергий по периодам). Штриховыми линиями показаны моменты захода Солнца на высоте 0 и 100 км

ленности антенны нагревного стенда. Такие возмущения впервые были обнаружены 37 лет назад (см., например, [9, 12–14]). Они были названы крупномасштабными (см., например, [9, 12–14]). Их горизонтальный размер  $L \sim 1000$  км.

Существует две причины возникновения крупномасштабных возмущений. Первая из них — генерация и распространение акустико-гравитационных волн на высотах области *F* ионосферы, что предсказывалось теоретически [19, 20]. Результаты современных исследований этих волн представлены в работах [33–39, 44, 45].

На высотах областей D и E причина возникновения крупномасштабных возмущений, скорее всего, связана с взаимодействием подсистем ионосфера—магнитосфера (энергичные электроны)— атмосфера, точнее с высыпанием высокоэнергичных электронов из магнитосферы в атмосферу, приводящим к всплескам электронной концентрации в ионосфере [9, 12–14]. При этом крупно-масштабные возмущения являются апериодическими. Результаты последних исследований таких возмущений описаны в работах [22–24, 30, 31]. Есть определённые основания считать, что апериодические возмущения (всплески концентрации электронов) проявляются и в области F, которую также пронизывают потоки высыпающихся из магнитосферы электронов [31].

Величина этих возмущений в области F, скорее всего, небольшая и сравнима с величиной естественных флуктуаций. Кроме того, их появление и величина существенно зависят от космической погоды. Можно надеяться, что в течение геокосмических бурь, одной из составляющих которых являются магнитные бури, система Земля—атмосфера—ионосфера—магнитосфера переводится в метастабильное состояние и величина, а следовательно, и частота появления ионосферных возмущений возрастает.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. Л. Фролов

Сначала обсудим эффекты в нижней ионосфере, наблюдавшиеся в 2017–2018 годах. Подтверждено существование изученного ранее явления возникновения крупномасштабных возмущений в нижней ионосфере, стимулированных воздействием мощного нестационарного радиоизлучения на ионосферу [12–14]. Апериодические возмущения возникали при включении/выключении стенда, длились 5÷10 мин. Величина возмущений зависела от времени суток и космической погоды. Возмущения сопровождались увеличением концентрации электронов в нижней ионосфере ре в результате стимулированного мощным радиоизлучением высыпания электронов с энергией  $10\div100$  кэВ из магнитосферы [12–14]. Возможность высыпания электронов из магнитосферы с энергией около 100 кэВ и плотностью потока порядка  $10^8$  м<sup>-2</sup> · c<sup>-1</sup> на площади  $400 \times 1000$  км подтверждается прямыми измерениями на спутнике DEMETER [52–54]. Важную роль при этом играют нижнегибридные волны, дакты над нагревным стендом и свистовые волны, захватываемые в дакты [54, 55].

Перейдём к обсуждению эффектов в средней ионосфере, зарегистрированных в 2017–2018 годах. Описанные выше эффекты проявлялись (их удавалось зарегистрировать) при эффективной мощности излучения стенда «Сура» не менее 40 МВт. Значения периодов (15÷60 мин) и скоростей (сотни метров в секунду) свидетельствуют о том, что работа стенда в режиме периодического излучения приводила к генерации атмосферных гравитационных волн. Как известно, в диапазоне высот от 100 до 200÷250 км их амплитуда возрастает. Этот эффект подтверждён нами экспериментально. При одновременном использовании частот 3,2 и 4,2 МГц на трассе Гайдары—Граково доплеровское смещение частоты на меньшей частоте было примерно в 1,5÷1,6 раза ниже, чем на частоте 4,2 МГц. Следует учесть, что радиоволна с частотой 3,2 МГц отражалась примерно на 30÷50 км ниже, чем радиоволна с частотой 4,2 МГц. Если бы амплитуда атмосферных гравитационных волн не зависела от высоты, то доплеровское смещение частоты при f = 3,2 МГц было бы меньше в 1,3 раза, чем при f = 4,2 МГц. Наблюдаемое различие обусловлено увеличением амплитуды атмосферных гравитационных волн с высотой.

Таким образом, периодическое излучение стенда «Сура» могло заметно влиять на доплеровские спектры, доплеровские смещения частоты и флуктуации амплитуды принимаемого сигнала. Заметим, что величина эффекта и его проявление зависели от времени суток, сезона и космической погоды. В частности, на появляемость квазипериодических возмущений в ионосфере, повидимому, влияли сезонные вариации направления нейтрального ветра. Последний, как известно, оказывает фильтрующее действие. Влияние ветра, однако, требует специального исследования, подобного проведённому в работах [27, 56].

Добавим, что в контрольные дни также часто наблюдались квазипериодические возмущения. Их период изменялся примерно от 5 до 40 мин, а в ночное время — даже до 120 мин. Однако моменты появления, амплитуды и фазы таких возмущений были случайными, что отличало их от квазипериодических возмущений, генерируемых мощным радиоизлучением.

Полученные в работе результаты для состояния ионосферы, близкого к отвечающему минимуму солнечной активности, в целом, соответствуют результатам наблюдений для других периодов солнечной активности [22–24, 30–40].

## выводы

1. По данным измерительных кампаний 2017–2018 годов с привлечением ряда методов диагностики возмущений подтверждено, что включение/выключение нагревного стенда при определённых состояниях космической погоды могло приводить к стимулированным апериодическим возмущениям в нижней ионосфере. Время развития возмущений находилось в пределах 10÷18 мин, их длительность — в пределах 5÷10 мин.

Впервые по данным доплеровского смещения частоты на наклонных трассах обнаружены апериодические вариации, имеющие время запаздывания 15÷20 мин и длительность около 20 мин.

2. Подтверждено, что возмущения в средней ионосфере относятся к квазипериодическим; их время запаздывания составляло 45÷60 мин (скорость распространения 270÷360 м/с), длительность 2÷2,5 ч, период 10÷30 мин.

3. Впервые показано, что при эффективной мощности стенда «Сура» не менее 40÷60 МВт примерно через 40÷60 мин после начала его излучения на радиотрассах, удалённых на расстояния порядка 1000 км от места воздействия, доплеровские спектры заметно уширялись, проявлялась многолучевость.

4. Продемонстрировано, что периодический нагрев ионосферы приводил к периодическим изменениям амплитуды сигнала и вариациям доплеровского смещения частоты с максимальным отклонением 0,1÷0,2 Гц. Продолжительность реакции составляла 70÷180 мин. При этом относительная амплитуда возмущений концентрации электронов изменялась от 3 до 12 %.

5. Установлено, что квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты и амплитуды вызваны генерацией и распространением волн со скоростями от 0,2 до 1,6 км/с и периодами 15 и 30 мин. Скорость 0,2÷0,4 км/с, в отличие от скорости около 1,6 км/с, наблюдалась систематически и соответствовала скорости распространения внутренних гравитационных волн на ионосферных высотах.

В будущем требуется более детально изучить следующее:

1) зависимость характеристик крупномасштабных апериодических и квазипериодических возмущений от космической погоды, положения в цикле солнечной активности, времени суток;

2) зависимость перечисленных возмущений от близости частоты мощной радиоволны к критической частоте слоя ионосферы F<sub>2</sub>;

3) зависимость отмеченных возмущений от поляризации мощной радиоволны;

4) зависимость характеристик возмущений от ориентации диаграммы направленности антенны нагревного стенда по отношению к магнитному зениту;

5) взаимное влияние возмущений от солнечного терминатора и нагревного стенда;

6) особенности эффектов на наклонных трассах при значительном их удалении от нагревного стенда.

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант 3.1844.2017/4.6) и Министерства образования и науки Украины (номер госрегистрации 0118Г002039).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
- Gurevich A. V. Nonlinear Phenomena in the Ionosphere. New York, Heildelberg, Berlin: Springer– Verlag, 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.
- Митяков Н. А., Грач С. М., Митяков С. Н. Возмущение ионосферы мощными радиоволнами. Итоги науки и техники. Серия: Геомагнетизм и высокие слои атмосферы. М.: ВИНИТИ, 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.

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. Л. Фролов

- Беликович В. В., Грач С. М., Караштин А. Н. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545.
- 8. Гуревич А.В. // Успехи физ. наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.
- Черногор Л. Ф. Физика мощного радиоизлучения в геокосмосе: Монография. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2014. 544 с.
- Фролов В. Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. Н. Новгород: Издво ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2017. 468 с.
- Streltsov A. V., Berthelier J.-J., Chernyshov A. A., et al. // Space Sci. Rev. 2018. V. 214, No. 8. 122 p.
- 12. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шварцбург А. Б. // Компьютерная оптика. 1989. Вып. 6. С. 62.
- 13. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998, № 6. С. 17.
- 14. Гармаш К. П., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные явления. 1998. Т. 1, № 1. С. 90.
- Мартыненко С. И., Мисюра В. А., Пивень Л. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26, № 1. С. 3.
- 16. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2009. Т. 14, № 4. С. 377.
- 17. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29, № 3. С. 513.
- 18. Костров Л. С., Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 1. С. 159.
- 19. Григорьев Г. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 18, № 12. С. 1801.
- 20. Григорьев Г.И., Трахтенгерц В.Ю. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. Т. 39, № 6. С. 90.
- 21. Гуревич А.В., Шлюгер И.С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1975. Т. 43, № 9. С. 1 237.
- Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 3. С. 173.
- 23. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18, № 1. С. 49.
- 24. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 2. С. 110.
- Medvedev A. V., Ratovsky K. G., Tolstikov M. V., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122, No. 7. P. 7567.
- Ratovsky K. G., Medvedev A. V., Tolstikov M. V., Kushnarev D. S. // Adv. Space Res. 2008. V. 41. P. 1453.
- 27. Медведев А. В., Ратовский К. Г., Толстиков М. В., Кушнарёв Д. С. // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 6. С. 812.
- Medvedev A. V., Ratovsky K. G., Tolstikov M. V., et al. // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2013. V. 105– 106. P. 350.
- 29. Kunitsyn V. E., Andreeva E. S., Frolov V. L., et al. // Radio Sci. 2012. V. 47, No. 4. Art. no. RS0L15.
- 30. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57, № 5. С. 378.
- 31. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Барабаш В. В. // Вестник ПГТУ. 2016. № 2(30). С. 6.
- 32. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2012. Т. 17, № 3. С. 240.
- Бурмака В. П., Домнин И. Ф., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 11. С. 859.
- Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Комраков Г. П., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 2. С. 81.
- 35. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 14.
- Домнин И. Ф., Панасенко С. В., Урядов В. П., Черногор Л. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 4. С. 280.
- 37. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л., Пушин В. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 5. С. 327.
- 38. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 4. С. 219.

- 39. Черногор Л. Ф., Фролов В. Л. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 307.
- 40. Черногор Л. Ф., Панасенко С. В., Фролов В. Л., Домнин И. Ф. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 2. С. 85.
- 41. Kunitsyn V. E., Padokhin A. M., Vasiliev A. E., et al. // Adv. Space Res. 2011. V. 47. P. 1743.
- 42. Фролов В. Л., Шорохова Е. А., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 10. С. 797.
- Фролов В. Л., Болотин И. А., Комраков Г. П. и др. // Гелиогеофизические исследования. 2015. Вып. 13. С. 49.
- 44. Mishin E., Sutton E., Milikh G., et al. // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39, No. 11. Art. no. L11101.
- 45. Pradipta R., Lee M. C., Cohen J. A., Watkins B. J. // Earth, Moon, Planets. 2015. V. 116. P. 67.
- 46. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. // Космический проект «Ионосат-Микро». К.: Академпериодика, 2013. С. 160.
- 47. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 5. С. 681.
- 48. Астафьева Н. М. // Успехи физ. наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1 145.
- 49. Лазоренко О.В., Черногор Л.Φ. Сверхширокополосные сигналы и процессы: Монография. Харьков: ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. 576 с.
- 50. Черногор Л. Ф. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59.
- 51. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь. Харьков: XHУ им. В. Н. Каразина, 2014. 408 с.
- Марков Г. А., Белов А. С., Фролов В. Л. и др. // Журн. экспер. теор. физ. 2010. Т. 138, Вып. 6 (12). С. 1037.
- Фролов В. Л., Рапопорт В. О., Шорохова Е. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198.
- 54. Фролов В. Л., Болотин И. А., Рябов А. О., Ачкурин А. Д. // Тез. докл. XXVI Всеросс. открытой научная конф. «Распространение радиоволн» (РРВ'2019), 1–6 июля 2019, Казань, Россия. 2019. Т. 1. (в печати).
- 55. Vartanyan A., Milikh G. M., Eliasson B., et al. // Radio Sci. 2016. V. 51. P. 1188.
- 56. Медведев А.В., Ратовский К.Г., Толстиков М.В. и др. // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 20. С. 85.

Поступила в редакцию 17 мая 2019 г.; принята в печать 28 июня 2019 г.

## LARGE-SCALE DISTURBANCES IN THE LOWER AND MIDDLE IONOSPHERE ACCOMPANYING THE SURA HEATER ACTION ON IT

L. F. Chernogor, K. P. Garmash, and V. L. Frolov

We briefly describe the results of the first (not purposeful) experiments on studying large-scale (about 1000 km) aperiodic and quasi-periodic disturbances in the lower and middle ionosphere. The main results of modern experiments are listed. Multi-instrument radiophysical observations of large-scale (about 1000 km) aperiodic disturbances in the lower ionosphere and quasi-periodic disturbances in the middle ionosphere, which accompanied the Sura heater action with high-power (effective power 40–95 MW) nonstationary radio emission, were performed in 2017–2018 using partial-reflection and vertical/oblique multipath multifrequency sounding techniques. The observations were taken in the observatories of the V. N. Karazin National University of Kharkov during four heating campaigns in 2017–2018. The aperiodic disturbances in the lower ionosphere had a delay time of 15–18 min and a durations of 5–10 min. The disturbances followed the heater turn-on and turn-off. The nature of these

Л. Ф. Черногор, К. П. Гармаш, В. Л. Фролов

disturbances is discussed. The main effects in the middle ionosphere include the following. When the effective radiated power is no less than 40–60 MW, the Doppler spectra become considerably broader and multipathing appears on radio paths that are 1000 km distant from the heater in 40–60 min after the Sura turn-on. Periodic heating of the ionosphere resulted in periodic variations in the Doppler frequency shift (with a maximum deviation of 0.1–0.2 Hz) and in the signal amplitude. The time delay of the ionospheric response lies in the range 40–60 min, while the relative disturbance in the electron density varies from 3 to 12%. Quasi-periodic variations in the Doppler frequency shift and in amplitude are caused by the generation and propagation of waves with 0.2–1.6 km/s speeds and 15–30 min periods. The 0.2–0.4 km/s speeds, as opposed to the 1.6 km/s speed, are regularly observed. The main directions of the future studies of how large-scale aperiodic and quasi-periodic disturbances manifest themselves in the ionosphere and the studies of how these disturbances affect the parameters of radio waves on remote radio paths are also discussed.