

**Л.Ф. Черногор** 

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина, г. Харьков  
e-mail: [leonid.f.chernogor@gmail.com](mailto:leonid.f.chernogor@gmail.com)*

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГЕОКОСМИЧЕСКИХ БУРЬ. ЧАСТЬ 3**

**Аннотация.** Представлен обзор результатов наблюдения эффектов наиболее интересных ионосферных и магнитных бурь, которые имели место в 2018–2019 гг. Ионосферные и магнитные бури рассматриваются как составные части геокоσμических бурь. В соответствии с системной парадигмой Л. Ф. Черногора геокоσμическая буря представляет собой комплекс процессов, вызванных солнечной бурей, сводящихся к синергетически взаимодействующим бурям в магнитном поле (магнитная буря), ионосфере (ионосферная буря), атмосфере (атмосферная буря) и электрическом поле атмосферно-ионосферно-магнитосферного происхождения (электрическая буря). На примере анализа конкретных магнитных и ионосферных бурь показано, что кроме общих закономерностей каждая буря имеет свои индивидуальные особенности. Подтверждена целесообразность всестороннего исследования проявлений каждой новой геокоσμической бури. Подтверждено большое разнообразие ионосферных и магнитных бурь. Необязательно слабая магнитная буря сопровождается слабой ионосферной бурей, а сильная – сильной. Ионосферная буря может быть однофазной (положительной или отрицательной) либо многофазной, когда фазы чередуются. Бури могут длиться от нескольких часов до многих суток. Бури сопровождаются как аперiodическими вариациями, так и квазипериодическими. Последние вызываются атмосферными гравитационными волнами (периоды  $\square$  10–180 мин.) и инфразвуком (период менее 5 мин.). Из всех составляющих геокоσμической бури, кроме академического, наибольший практический интерес представляют ионосферные бури. Именно эти бури ограничивают потенциальные характеристики радиосистем различного назначения (телекоммуникации, радионавигации, радиолокации, дистанционного радиозондирования, радиоастрономии). Показано, что ионосферные бури сопровождаются возникновением многолучёвости, уширением доплеровских спектров (и даже их развалом), значительными аперiodическими и квазипериодическими вариациями доплеровского смещения частоты, амплитуды радиосигналов и траекторий радиоволн декаметрового диапазона. В частности, высота отражения радиоволн изменялась во время ионосферных бурь на 50–180 км. Концентрация электронов во время умеренных отрицательных ионосферных бурь уменьшалась до 2 раз, а в течение умеренных положительных ионосферных бурь она увеличивалась до 3 раз. Под действием атмосферных гравитационных волн относительная амплитуда квазипериодических вариаций концентрации электронов достигала 50%, а за счёт низкочастотного инфразвука она не превышала 0,7%.

**Ключевые слова:** геокоσμическая буря, магнитная буря, ионосферная буря, магнитометр, ионозонд, доплеровский спектр, амплитуда сигнала, концентрация электронов, волновые возмущения.

L.F. Chernogor

*Kharkiv National University, Ukraine, Kharkov**e-mail: [leonid.f.chernogor@gmail.com](mailto:leonid.f.chernogor@gmail.com)*

### **Physical effects of geocosmic storms. Part 3**

**Abstract.** A review of the results of observing the effects of the most interesting ionospheric and magnetic storms that took place in 2018–2019 is presented. Ionospheric and magnetic storms are considered as components of geocosmic storms. In accordance with the systemic paradigm of L.F. Chernogor, a geocosmic storm is a complex of processes caused by a

solar storm, reduced to synergistically interacting storms in a magnetic field (magnetic storm), ionosphere (ionospheric storm), atmosphere (atmospheric storm) and electric field atmospheric-ionospheric-magnetospheric origin (electric storm). Using the analysis of specific magnetic and ionospheric storms as an example, it is shown that, in addition to general patterns, each storm has its own individual characteristics. The expediency of a comprehensive study of the manifestations of each new geocosmic storm has been confirmed. A wide variety of ionospheric and magnetic storms have been confirmed. A weak magnetic storm is not necessarily accompanied by a weak ionospheric storm, while a strong one is accompanied by a strong one. An ionospheric storm can be single-phase (positive or negative) or multi-phase, when the phases alternate. Storms can last from several hours to many days. Storms are accompanied by both aperiodic and quasi-periodic variations. The latter are caused by atmospheric gravity waves (periods  $\square 10\text{--}180$  min) and infrasound (period less than 5 min). Of all the components of a geocosmic storm, except for academic ones, ionospheric storms are of the greatest practical interest. It is these storms that limit the potential characteristics of radio systems for various purposes (telecommunications, radio navigation, radar, remote radio sounding, radio astronomy). It is shown that ionospheric storms are accompanied by the appearance of multipath, broadening of the Doppler spectra (and even their collapse), significant aperiodic and quasi-periodic variations in the Doppler frequency shift, the amplitude of radio signals, and the trajectories of radio waves in the decameter range. In particular, the height of reflection of radio waves changed during ionospheric storms by 50–180 km. The electron concentration during moderate negative ionospheric storms decreased up to 2 times, and during moderate positive ionospheric storms it increased up to 3 times. Under the action of atmospheric gravity waves, the relative amplitude of quasi-periodic variations in the electron concentration reached 50%, and due to low-frequency infrasound, it did not exceed 0.7%.

**Key words:** geospace storm, magnetic storm, ionospheric storm, magnetometer, ionosonde, Doppler spectrum, signal amplitude, electron concentration, wave disturbances.

Л. Ф. Черногор

*В.Н. Каразин атындағы Харьков ұлттық университеті, Украина, Харьков қ.*  
*e-mail: [leonid.f.chernogor@gmail.com](mailto:leonid.f.chernogor@gmail.com)*

### Геоғарыштық дауылдардың физикалық әсері. 3-бөлім

**Аңдатпа.** Мақалада 2018–2019 жылдары болған ең қызықты ионосфералық және магниттік дауылдардың әсерін бақылау нәтижелеріне шолу жасалған. Ионосфералық және магниттік дауылдар геоғарыштық дауылдардың құрамдас бөлігі ретінде қарастырылады. Л.Ф. Черногорияның жүйелі парадигмасына сәйкес геокосмостық дауыл – бұл магнит өрісінде (магниттік дауыл), ионосферада (ионосфералық дауыл), атмосферада (атмосфералық дауыл) және атмосфералық-ионосфералық-магнитосфералық шығу тегі (электр дауылы) синергетикалық өзара әрекеттесетін дауылдарға дейін азаятын күн дауылынан туындаған процестер кешені. Мысал ретінде нақты магниттік және ионосфералық дауылдарды талдауды пайдалана отырып, жалпы заңдылықтардан басқа, әрбір дауылдың өзіне тән жеке ерекшеліктері бар екені көрсетілген. Әрбір жаңа геоғарыштық дауылдың көріністерін жан-жақты зерттеудің мақсатқа сай екендігі дәлелденді. Ионосфералық және магниттік дауылдардың алуантүрлілігі расталды. Әлсіз магниттік дауыл міндетті түрде әлсіз ионосфералық дауылмен, ал күштісі күштімен жүруі міндетті емес. Фазалар алмасып тұрғанда ионосфералық дауыл бірфазалы (оң немесе теріс) немесе көпфазалы болуы ықтимал. Дауылдар бірнеше сағаттан бірнеше күнге дейін созылуы мүмкін. Дауылдар аперидоттық және квазипериодтық вариациялармен бірге жүреді. Соңғыларына атмосфералық гравитация толқындары (периодтар  $\square 10\text{--}180$  мин) және инфрадыбыс (период 5 минуттан аз) әсер етеді. Геоғарыштық дауылдың барлық құрамдас бөліктерінің ішінде академиялық құрамдастардан басқа, ионосфералық дауылдар ең үлкен практикалық қызығушылық тудырады. Дәл осы дауылдар әртүрлі мақсаттағы радиожүйелердің потенциалды сипаттамаларын (телекоммуникациялар, радионавигация, радиолокаторлар, қашықтықтан радиозондылау, радиоастрономия) шектейді. Ионосфералық дауылдар көп сәулеленудің пайда болуымен, Доплер спектрлерінің кеңеюімен (тіпті олардың құлдырауымен),

Доплер жиілігінің ығысуындағы маңызды аперидтық және квазиперидтық өзгерістермен, радиосигналдар амплитудасымен және декаметрлік диапазондағы радиотолқындар траекторияларымен бірге жүретіні көрсетілген. Атап айтқанда, радиотолқындардың шағылу биіктігі ионосфералық дауылдар кезінде 50–180 км-ге өзгерді. Орташа теріс ионосфералық дауылдар кезінде электрондардың концентрациясы 2 есеге дейін төмендеді, ал орташа оң ионосфералық дауылдар кезінде ол 3 есеге дейін өсті. Атмосфералық гравитация толқындарының әсерінен электрондар концентрациясының квазиперидтық ауытқуларының салыстырмалы амплитудасы 50%-ға жетті, ал төмен жиілікті инфрадыбыстың әсерінен ол 0,7%-дан аспады.

**Түйін сөздер:** геоғарыштық дауыл, магниттік дауыл, ионосфералық дауыл, магнитометр, ионзонд, доплерлік спектр, сигнал амплитудасы, электрон концентрациясы, толқындық бұзылулар.

## Введение

Статья является продолжением работы [1].

## Эффекты геокосмической бури 5 – 6 августа 2019 г.

Целью настоящего раздела является изложение общих сведений о геокосмической буре, результатов анализа особенностей магнитной и ионосферной бурь [2]. Данная буря также обсуждается в работе [3].

## Средства и методы

Магнитометр-флюксометр размещен в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина (49.64°N, 36.93°E). Измеряет флуктуации H- и D-компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов  $T = 1 - 1000$  с. Временное разрешение составляет 0.5 с. Чувствительность магнитометра порядка 1 пТл – 1 нТл при  $T \approx 1 - 1000$  с. Магнитометр-флюксометр подробнее описан в работе [4].

Метеомагнитная станция LEMI-017 размещена в Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ (49.93°N, 36.95°E) [[http://geospace.com.ua/data/metmag\\_mf.php](http://geospace.com.ua/data/metmag_mf.php)]. Измеряет три компоненты магнитного поля (H-, D- и Z-компоненты). Разрешающая способность по времени – 1 с, чувствительность – 10 пТл.

Многочастотный многотрассовый программно-аппаратный радиотехнический комплекс наклонного зондирования ионосферы размещен на территории Харбинского инженерного университета (КНР) (45.78°N, 126.68°E) [2, 5–9]. Осуществляет непрерывный мониторинг

состояния ионосферы на 14 радиотрассах. Используется радиоизлучение широковегательных радиостанций, дислоцированных в Китае, Южной Корее, Японии, России и Монголии в диапазоне частот 5 – 10 МГц (рис. 1). Длина радиотрасс около 1 – 2 тыс. км. Прием и обработка сигналов ведется на территории Харбинского инженерного университета.

Ионзонд использовался для общей оценки состояния ионосферы. Расположен в Японии вблизи г. Wakkanai (URSI код WK546, 45.16°N, 141.75°E).

Опишем кратко методы анализа. Уровень сигнала магнитометра-флюксометра с учетом амплитудно-частотной характеристики прибора сначала преобразуется из относительных единиц в абсолютные. Затем временные вариации геомагнитного поля подвергаются системному спектральному анализу, который использует одновременно оконное, адаптивное преобразования Фурье, а также вейвлет-преобразование на базе материнской функции Морле [10]. Далее анализируются полученные спектры.

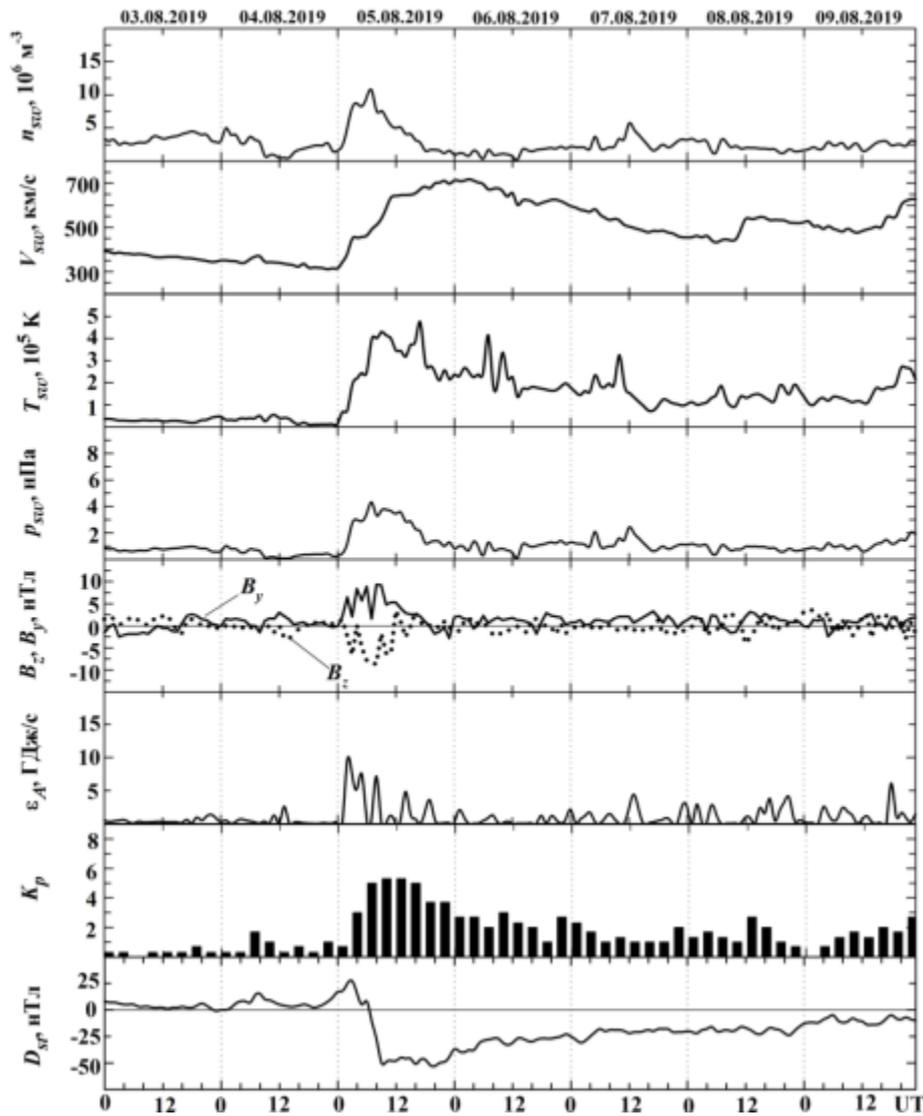
Трехкомпонентный магнитометр РИ НАНУ служит для общего контроля за состоянием геомагнитного поля. Специальная обработка сигналов при этом не требовалась.

Данные измерений многочастотного многотрассового комплекса наклонного зондирования ионосферы подвергались детальной обработке, направленной на получение временных зависимостей доплеровских спектров, доплеровского смещения частоты  $f_D(t)$  основной моды и

амплитуды  $A(t)$  сигнала. Далее  $f_D(t)$  и  $A(t)$  подвергались вторичной обработке с целью получения трендов  $\bar{f}_D(t)$  и  $\bar{A}(t)$ , флуктуаций  $\delta f_D(t) = f_D(t) - \bar{f}_D(t)$ ,  $\delta A(t) = A(t) - \bar{A}(t)$ , а также спектров в диапазоне периодов  $T \approx 1 - 60$  мин и более.

4 и 5 августа 2019 г. наблюдался рост концентрации частиц  $n_{sw}$  в солнечном ветре от  $\sim 2.5 \cdot 10^6$  до  $10 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$  (рис. 1). Увеличение скорости  $V_{sw}$  частиц от  $\sim 350$  до  $715 \text{ км/с}$  отмечалось 5 августа 2019 г. Далее  $V_{sw}$  постепенно уменьшалась от  $715$  до  $450 \text{ км/с}$ . Резкий рост температуры частиц от  $\sim 10^4$  до  $4.5 \cdot 10^5 \text{ К}$  имел место в первой половине суток 5 августа 2019 г., за ним последовало посте-

**Состояние космической погоды**



**Рисунок 1** – Временные вариации параметров солнечного ветра: измеренные концентрации частиц  $n_{sw}$ , температуры  $T_{sw}$ , радиальной скорости  $V_{sw}$  (по данным сайта <ftp://ftp.swrsc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>) и рассчитанного динамического давления  $p_{sw}$ , измеренные компоненты  $B_z$  и  $B_y$  межпланетного магнитного поля (по данным спутника ACE); рассчитанных значений энергии  $\epsilon_A$ , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени;  $K_p$ -индекса и  $D_{st}$ -индекса (по данным сайта <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/>) в период 3 – 9 августа 2019 г. Даты указаны вдоль оси абсцисс

пенное уменьшение до  $\sim 10^5$  К. Рост  $n_{sw}$  и  $V_{sw}$  привел к увеличению динамического давления  $p_{sw}$  в солнечном ветре от  $\sim 0.5$  до 5 нПа, которое наблюдалось 5 августа 2019 г. За ним последовало постепенное уменьшение  $p_{sw}$  от 5 до 1–2 нПа. 5 августа 2019 г. имело место увеличение от  $\sim 0$  до 11.1 нТл азимутальной ( $B_y$ ) составляющей межпланетного магнитного поля. Почти синхронно с этим наблюдалось уменьшение от 0 до  $-7.5$  нТл его вертикальной ( $B_z$ ) компоненты. Появились все признаки магнитной бури. Наблюдалась мощная всплески (до 10 ГДж/с) энергии в единицу времени, поступающей от солнечного ветра в магнитосферу. Примерно с 00:00 и до 04:00 5 августа 2019 г. (здесь и далее UT – всемирное время) значения индекса  $D_{st}$  увеличились от 0 до 27 нТл. Отмечалось внезапное начало магнитной бури. За этим последовало резкое падение  $D_{st}$ -индекса от 27 до  $-53$  нТл, означавшее наступление главной фазы магнитной бури. Она длилась примерно с 06:00 до 08:30 5 августа 2019 г. Далее в течение более чем четырех суток наблюдалась фаза восстановления. 3 и 4 августа 2019 г. значения  $K_p$ -индекса не превышали 1–2. В течение 5 августа 2019 г. он изменялся от 3 до 5.3. Последующие сутки отмечалось постепенное уменьшение значений  $K_p$  до 1–2.

### Анализ магнитной бури

Опишем сначала временные вариации Н-, D- и Z-компонент геомагнитного поля, измеренные магнитометром РИ НАНУ (рис. 2). В контрольные дни поведение всех трех компонент было сходным. Уровень Н-компоненты, флуктуируя, сначала уменьшался от положительных значений до  $-(20–40)$  нТл, затем увеличивался до 0–20 нТл. Уровень D-компоненты сначала увеличивался примерно от 0 до 30 нТл, затем уменьшался примерно до  $-30$  нТл, далее, флуктуируя, приближался к 0 нТл. Уровень Z-компоненты изменялся в пределах от  $-20$  до 20 нТл. Среднеквадратическое отклонение для всех трех компонент было относительно небольшим (единицы нанотесла).

5 августа 2019 г., т.е. в день магнитной бури, вариации Н-компоненты значительно

увеличились (от 60 до  $-100$  нТл). Уровень D-компоненты изменялся от  $\sim 40$  до  $-55$  нТл. Заметно изменился и уровень Z-компоненты. Среднеквадратическое отклонение для всех компонент увеличилось на порядок (до 10–20 нТл). Все это отражало факт возникновения магнитной бури. Ее проявления имели место 5 и отчасти 6 августа 2019 г. Если 5 августа 2019 г. наблюдалось внезапное начало и главная фаза бури, то после 09:00 5 августа, 6 августа и до конца суток 9 августа 2019 г. – фаза восстановления.

Опишем теперь результаты наблюдения флуктуаций Н- и D-компонент геомагнитного поля, выполненные в ХНУ имени В. Н. Каразина (рис. 3).

2 августа 2019 г. уровень флуктуаций D- и Н-компонент не превышал  $\sim 0.5–1$  нТл. Наибольшую энергию имели составляющие с  $T \approx 800–900$  с (см. рис. 3а).

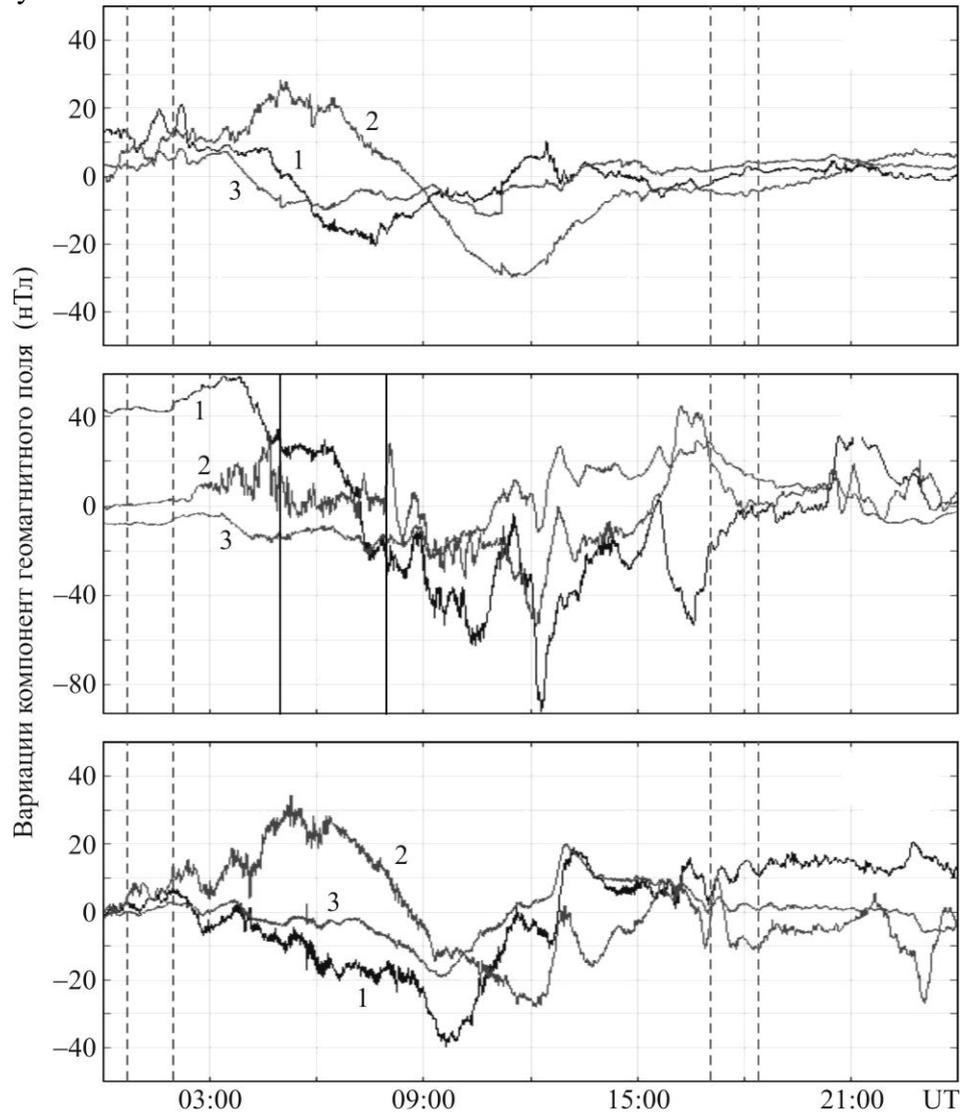
5 августа 2019 г. в интервале времени 03:00–07:00 уровень флуктуаций D- и Н-компонент вырос до 5–7 нТл. В спектре преобладали периоды 400–600 и 700–900 с соответственно (см. рис. 25б).

6 августа 2019 г. с 00:00 до 07:00 уровень флуктуаций D- и Н-компонент не превышал 2–3 нТл. Наибольшую энергию имели колебания с  $T \approx 400–800$  с для D-компоненты и 700–900 с для Н-компоненты (см. рис. 3).

### Анализ ионосферной обстановки

Временные вариации параметров ионограмм, полученных на ионозонде WK546 (Япония) показаны на рис. 4. Из рис. 4 видно, что 2, 5 и 6 августа 2019 г. частота  $f_{min}$  флуктуировала возле частоты 1.5 МГц. В эти же сутки частота  $f_oE$  в дневное время достигала 3.0–3.3 МГц, а утром и вечером была около 2 МГц. Частота  $f_oE_s$  изменялась в широких пределах: от  $\sim 3$  до 14–16 МГц в отдельные моменты времени. В течение главной фазы магнитной бури, т.е. примерно в интервале времени 05:00–09:00 5 августа 2019 г.  $f_oE_s$  увеличивалась от 4 до 8 МГц. Частоту  $f_oF_2$  удавалось измерять очень редко. В течение главной фазы магнитной бури регистрировались ее флуктуации от  $\sim 5$  до 10 МГц. В течение

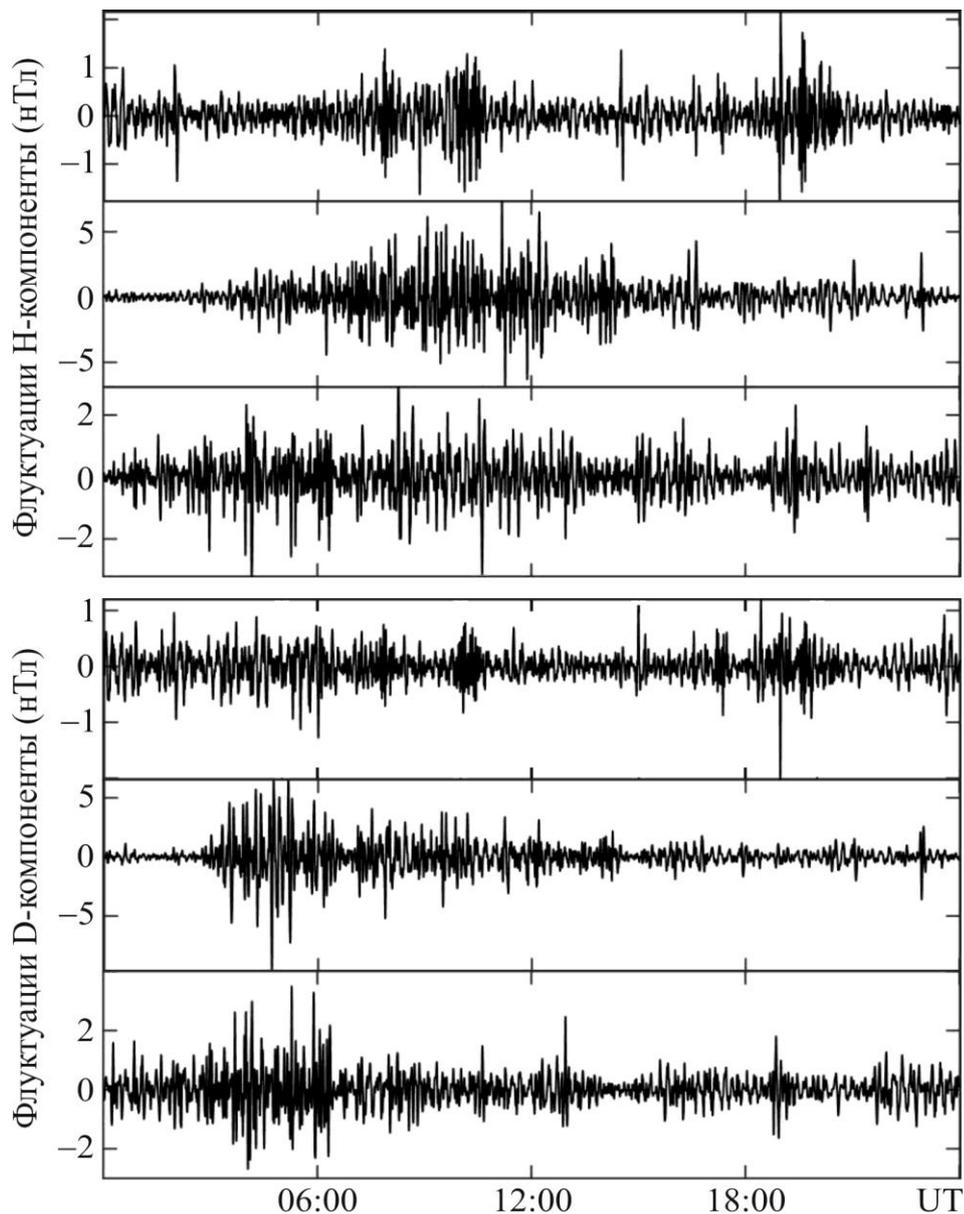
фазы восстановления  $f_oF_2 \approx 6$  МГц. После падения до 3 МГц.  
 13:30 5 августа 2019 г. отмечалось ее



**Рисунок 2** – Временные вариации уровня H-, D- и Z-компонент геомагнитного поля 2, 5 и 6 августа 2019 г. (панели сверху вниз): 1 – H-компонента; 2 – D-компонента; 3 – Z-компонента [[http://geospace.com.ua/data/metmag\\_mf.php](http://geospace.com.ua/data/metmag_mf.php)]. Сплошными вертикальными линиями показан интервал времени, соответствующий главной фазе магнитной бури, а штриховыми линиями – моменты времени захода и восхода Солнца на уровне Земли и на высоте 100 км

Высота  $h'E$  изменялась от 90 до 120 – 130 км. В течение главной фазы магнитной бури наблюдалось ее увеличение от ~95 до

120 км. Это продолжалось около 60 мин. Высота  $h'E_s$  5 августа 2019 г. флуктуировала в пределах от 90 до 120 – 130 км.



**Рисунок 3** – Временные вариации уровня горизонтальных H- и D-компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов 100 – 1000 с, 2, 5 и 6 августа 2019 г. (панели сверху вниз)

Измерений  $h'F_2$  было очень мало. В течение главной фазы магнитной бури отмечался резкий рост  $h'F_2$  от 210 до 280 км.

Таким образом, ионосферная буря практически не затронула E-область ионосферы, но сильно сказалась на состоянии F-области ионосферы.

Судя по вариациям  $f_{min}$ , D-область возмущалась незначительно.

### Результаты наклонного зондирования ионосферы

Поскольку радиопередающие устройства излучают не непрерывно, для дальнейшего анализа используются

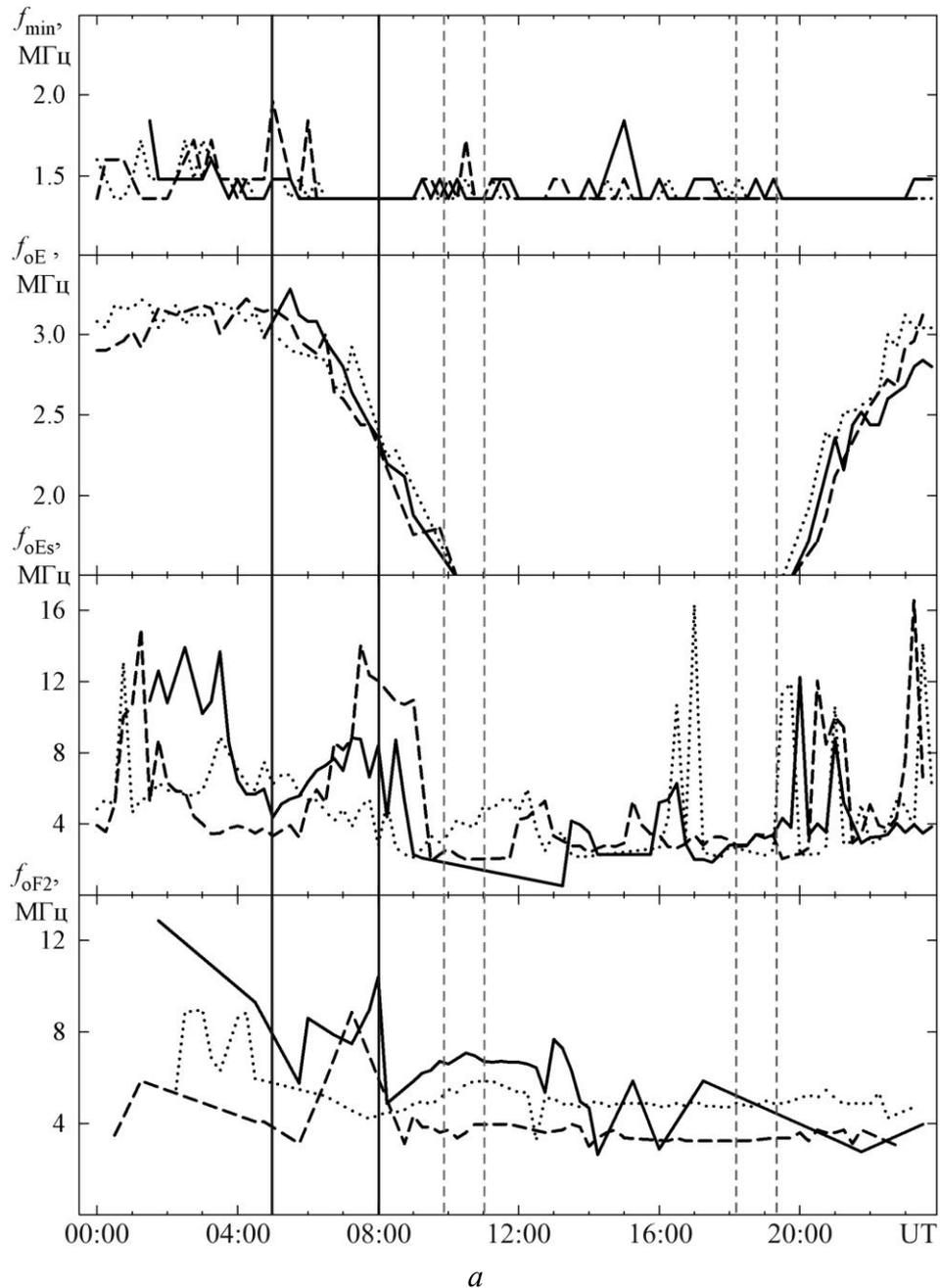
измерения для 10 из 14 радиотрасс. По техническим причинам в качестве контрольного дня выбран день 2 августа 2019 г., а не 4 августа 2019 г.

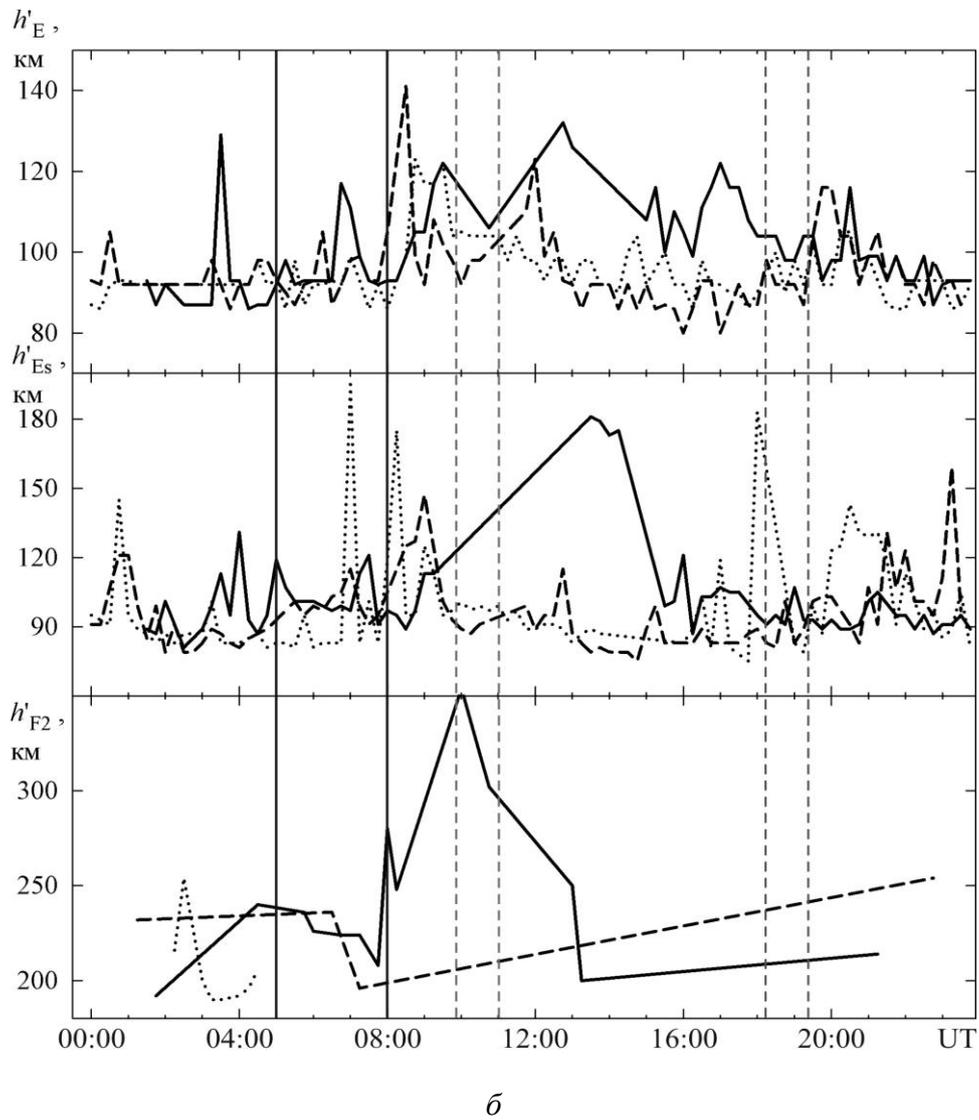
Рассмотрим эффекты на радиотрассе Lintong/Pucheng – Harbin. Радиостанция, излучающая на частоте 5000 кГц, расположена на территории Китая. Длина радиотрассы вдоль земной поверхности  $R \approx 1875$  км. До 06:00 радиостанция не излучала.

Временные зависимости доплеровских спектров, именуемых доплерограммами, и амплитуды сигнала для дня с магнитной

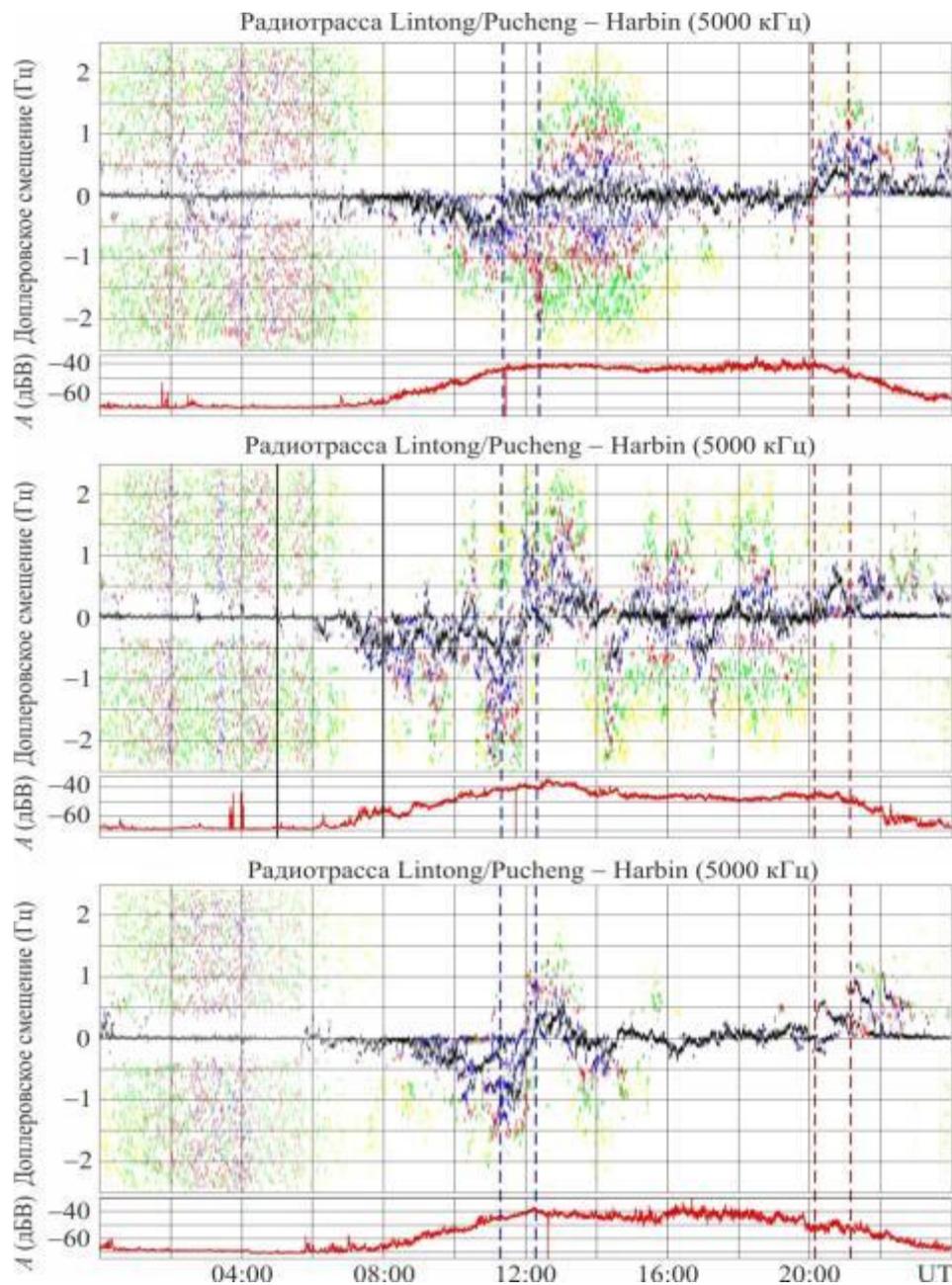
бурей (5 августа 2019 г.) и двух контрольных дней (2 и 6 августа 2019 г.) приведены на рис. 5. Из рис. 5 видно, что 2, 5 и 6 августа 2019 г. доплеровские спектры были преимущественно диффузными. В день бури диффузность существенно усилилась. Значительные изменения в характере доплеровских спектров наблюдались в

окрестности вечернего солнечного терминатора (с 10:00 до 14:00), а также с 14:00 и до 20:00. Доплеровские спектры занимали диапазон от  $-2.5$  до  $2 - 2.5$  Гц. В течение бури доплеровское смещение частоты  $f_D(t)$  основной моды флуктуировало в основном в пределах от  $-0.5$  до  $0.5$  Гц.





**Рисунок 4** – Временные зависимости  $f_{\min}$ ,  $f_oE$ ,  $f_oE_s$  и  $f_oF_2$  (а) и действующих высот  $h'E$ ,  $h'E_s$  и  $h'F_2$  (б) для 2 (точки), 5 (сплошная линия) и 6 (штрихи) августа 2019 г. Сплошными вертикальными линиями показан интервал времени, соответствующий главной фазе магнитной бури, а штриховыми линиями – моменты времени захода и восхода Солнца на уровне Земли и на высоте 100 км



**Рисунок 5** – Временные вариации доплеровских спектров и амплитуд сигнала на радиотрассе Lintong/Pucheng – Harbin 2, 5 и 6 августа 2019 (панели сверху вниз). Сплошными вертикальными линиями показан интервал времени, соответствующий главной фазе магнитной бури, а штриховыми линиями – моменты времени захода и восхода Солнца на уровне Земли и на высоте 100 км

В интервале времени 06:20 – 09:20 5 августа 2019 г. наблюдались значительные (до 10 дБ) вариации амплитуды  $A(t)$  сигнала, отсутствующие в контрольные дни.

Опишем эффекты на радиотрассе Hwaseong – Harbin. Радиостанция, работающая на частоте 6015 кГц, дислоцирована в Южной Корее. При этом  $R \approx 950$  км. Станция была выключена в интервале времени 00:00 – 03:30.

2 августа 2019 г. доплеровские спектры были диффузными преимущественно в окрестности вечернего и утреннего терминаторов (рис. 6). 6 августа 2019 г. доплеровские спектры были практически одномодовыми.

5 августа 2019 г. диффузность существенно увеличилась в интервалах времени 07:00 – 14:00 и 17:00 – 19:30. Кроме того, с 10:00 до 14:00 регистрировались

квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с периодом  $T \approx 20$  мин и амплитудой  $f_{Da} \approx 0.2$  Гц.

С 07:00 до 11:00 5 августа 2019 г. отмечались значительные (до 15 дБ) вариации  $A(t)$ . Такие вариации отсутствовали в контрольные дни.

Охарактеризуем эффекты на радиотрассе Chiba/Nagara – Harbin. Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 6055 кГц, находится на территории Японии. При этом  $R \approx 1610$  км. Излучение выключалось с 15:00 до 22:00.

2 августа 2019 г. в интервале времени 06:00 – 15:00 доплеровские спектры были диффузными (рис. 7).

В день ионосферной бури диффузность заметно усилилась. Примерно с 09:00 до 15:00 доплеровские спектры занимали полосу частот от  $-1.5$  до  $1.5$  Гц.

6 августа 2019 г. доплеровские спектры были практически одномодовыми. Доплеровское смещение частоты в окрестности вечернего терминатора изменялось от  $-0.5$  до  $0.5$  Гц.

5 августа 2019 г. с 06:00 до 15:00 вариации  $A(t)$  в пределах 10 дБ были квазипериодическими. Преобладали гармоники с  $T \approx 40$  мин. Подобный эффект отсутствовал в контрольные дни.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе Beijing – Harbin. Радиостанция, работающая на частоте 6175 кГц, дислоцирована на территории Китая. При этом  $R \approx 1050$  км. Радиостанция прекращала вещание с 00:00 до 07:00 и с 18:05 до 20:10.

5 августа 2019 г. в отличие от контрольных дней имело место большее уширение доплеровских спектров (рис. 8). Кроме того, в интервале времени 11:00 – 14:00  $f_D(t)$  изменялось по

квазипериодическому закону с  $T \approx 24$  мин,  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц и длительностью  $\Delta T \approx 180$  мин.

Вариации  $A(t)$  в день ионосферной бури и в контрольные дни практически не отличались.

Дадим характеристику эффектов на радиотрассе Goyang – Harbin. Радиостанция, излучающая на частоте 6600 кГц, находится на территории Кореи. При этом  $R \approx 910$  км. Регистрация сигнала отсутствовала с 00:00 до 09:00.

В день ионосферной бури доплеровские спектры заметно отличались от спектров в контрольные дни (рис. 9). Во-первых, они были более диффузными. Во-вторых, в интервале времени 09:00 – 14:00 вариации  $f_D(t)$  были квазипериодическими с  $T \approx 24$  мин и  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц. Их длительность была не менее 240 мин.

Отличия в характере вариаций  $A(t)$  не обнаружено.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе Ulaanbaatar – Harbin. Радиопередающее устройство, работающее на частоте 7260 кГц, находится на территории Монголии. При этом  $R \approx 1496$  км. Устройство отключалось с 05:00 до 07:00 и с 18:00 до 20:25.

5 августа 2019 г. поведение доплеровских спектров значительно отличалось от поведения спектров в контрольные дни (рис. 10). Доплеровские спектры были диффузными. Они занимали полосу частот от  $-1.5$  до  $1.5$  Гц. Кроме того, в интервале времени 08:00 – 10:00 имели место квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с периодом  $T \approx 25 - 30$  мин,  $f_{Da} \approx 0.15 - 0.20$  Гц и  $\Delta T \approx 120$  мин.

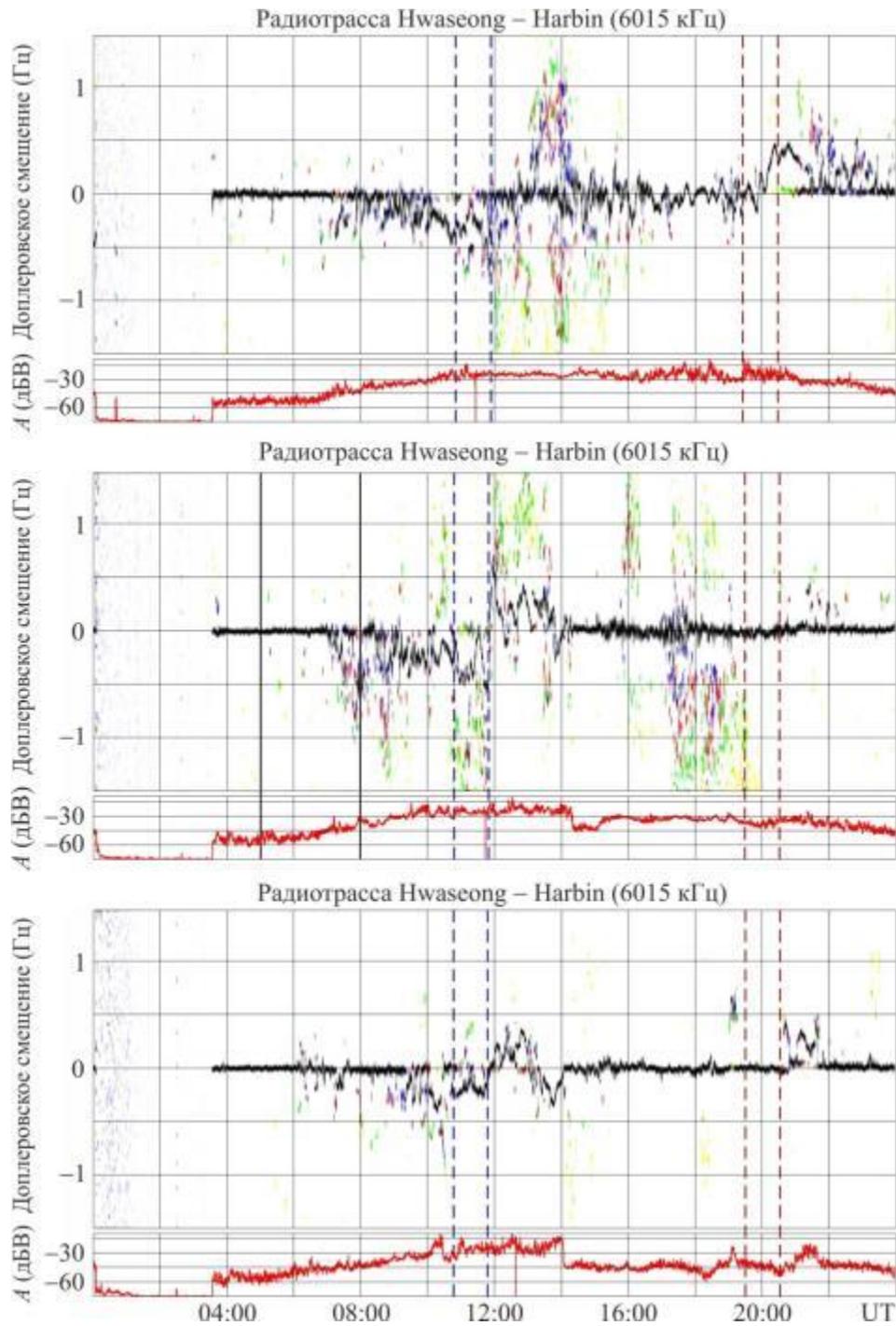


Рисунок 6 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Hwaseong – Harbin

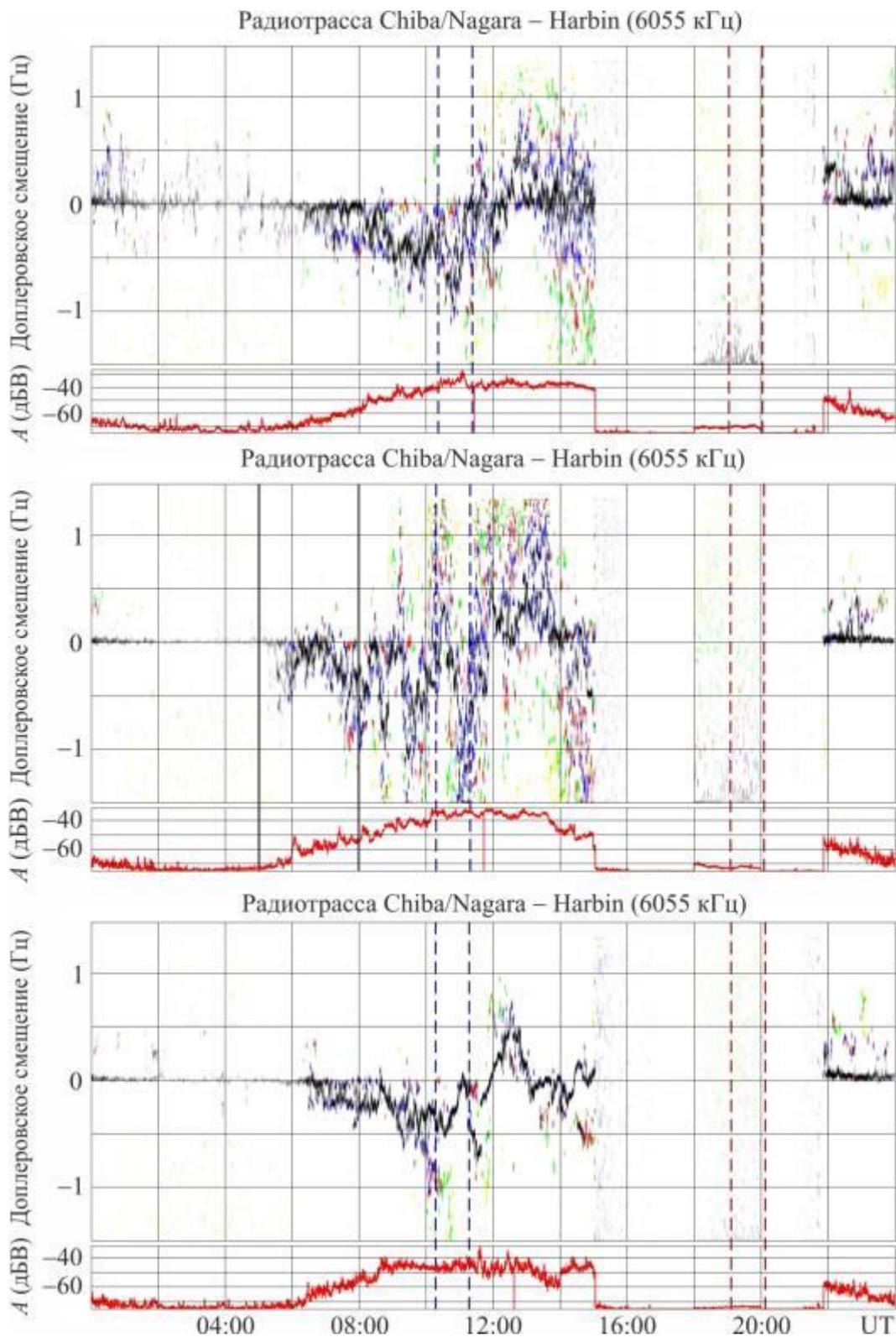


Рисунок 7 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Chiba/Nagara – Harbin

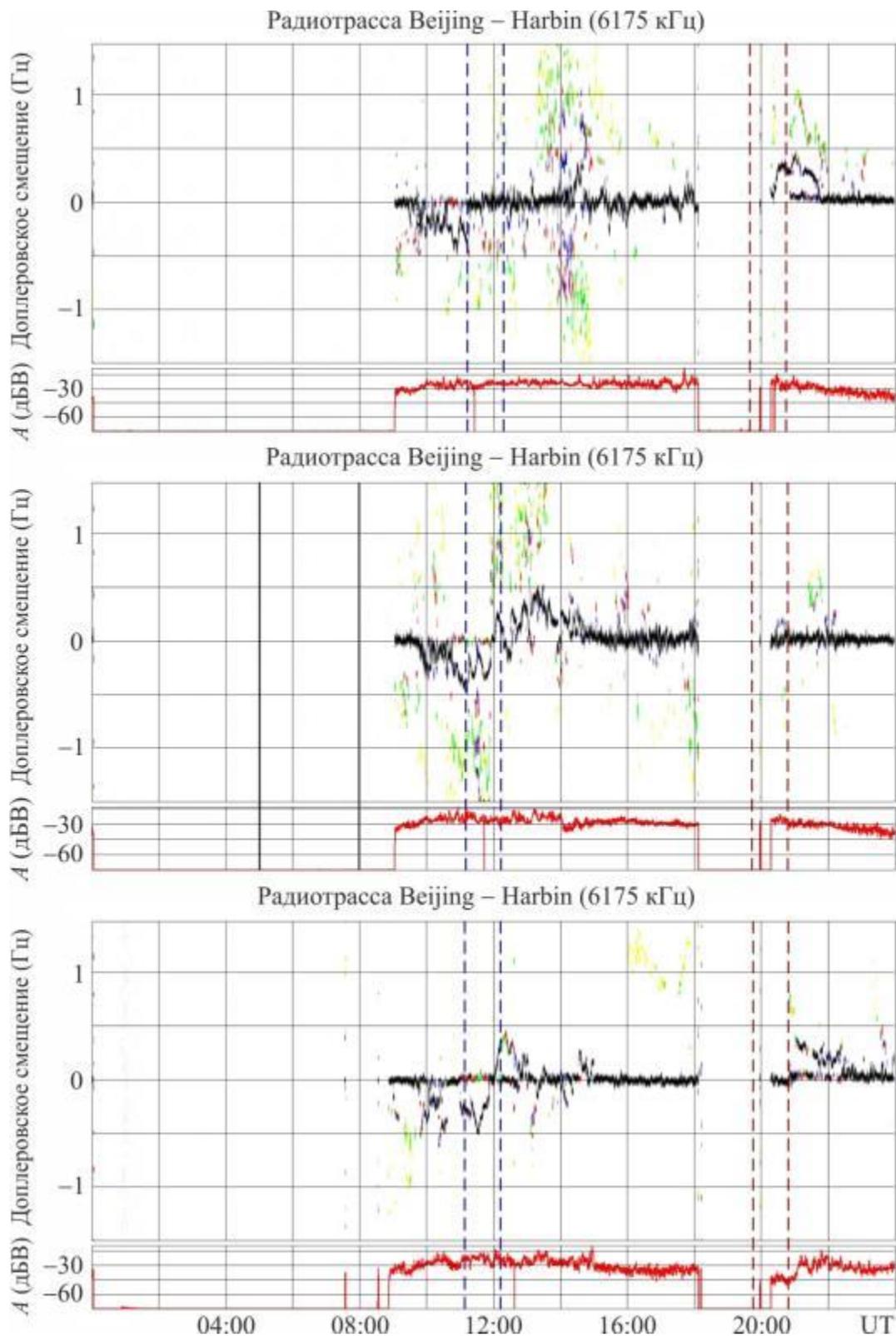


Рисунок 8 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Beijing – Harbin

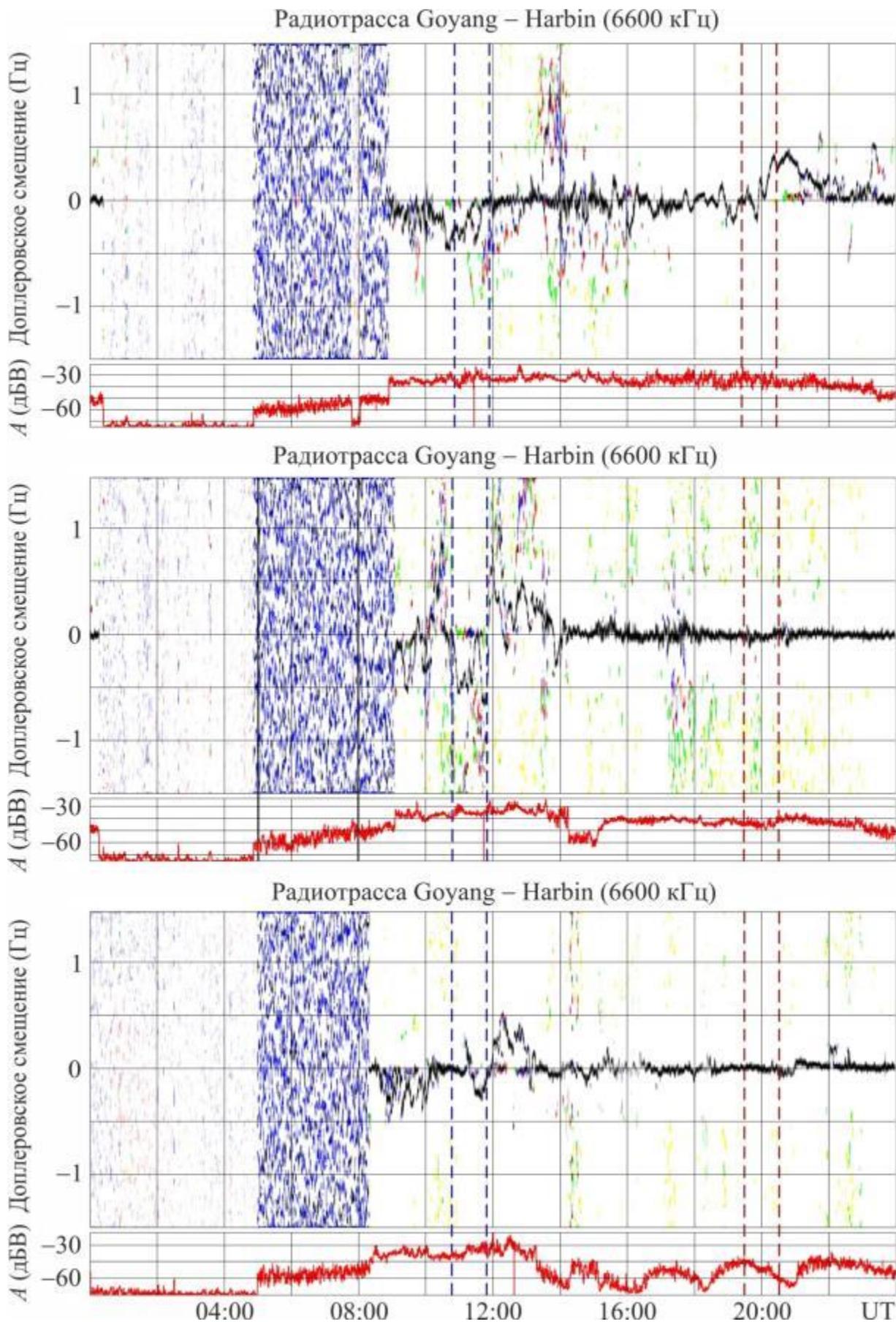


Рисунок 9 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Goyang – Harbin

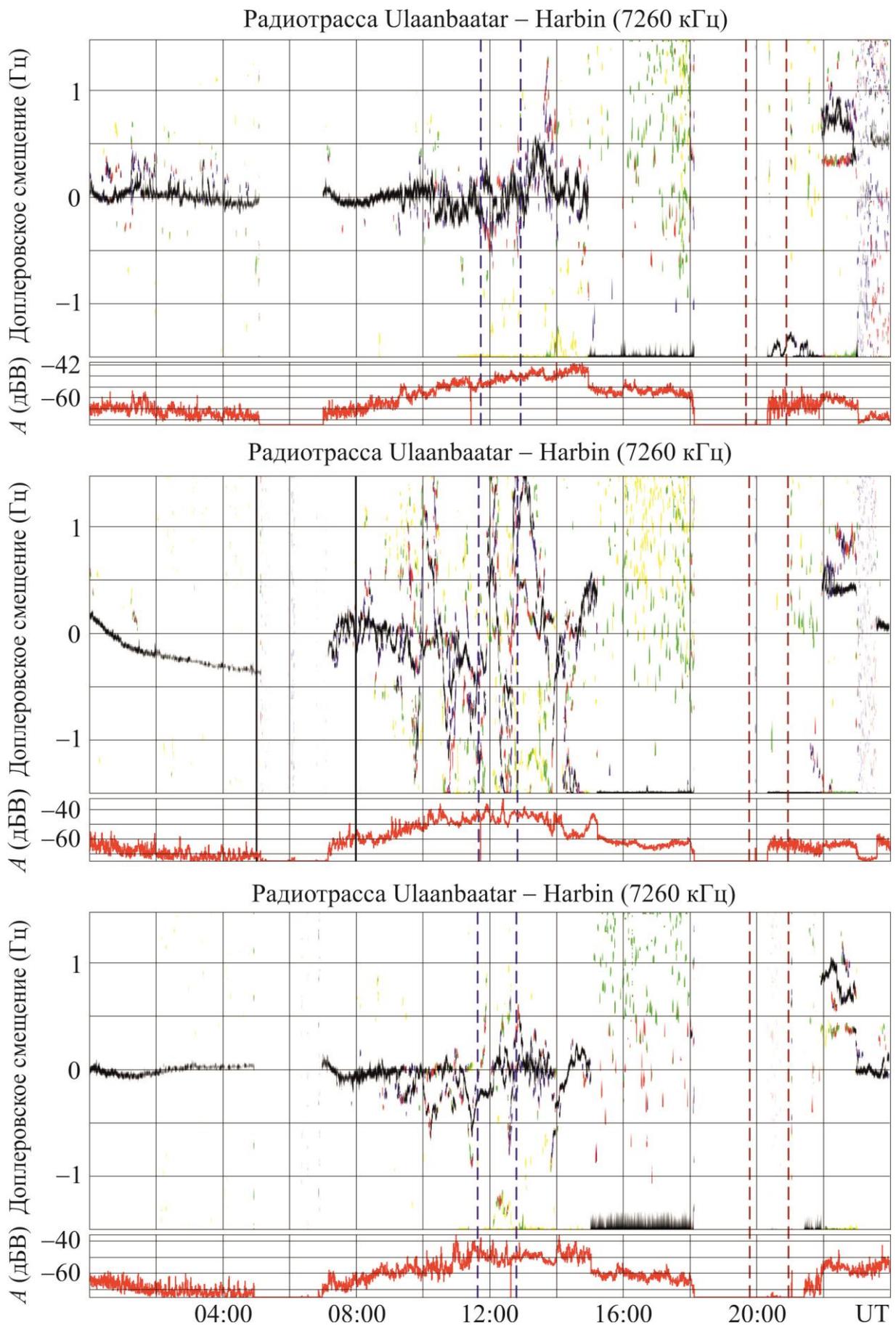


Рисунок 10 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Ulaanbaatar – Harbin

Существенные различия в поведении  $A(t)$  2, 5 и 6 августа 2019 г. отсутствовали.

Опишем эффекты на радиотрассе Yakutsk – Harbin. Радиостанция, излучающая на частоте 7345 кГц, расположена на территории России. При этом длина радиотрассы близка к 1045 км. Радиостанция излучала в интервале времени 11:00 – 18:05.

В день ионосферной бури доплеровские спектры были более диффузными, чем в контрольные дни (рис. 11).

Вариации  $A(t)$  5 августа 2019 г. достигали 6 – 12 дБ.

Охарактеризуем эффекты на радиотрассе Shijiazhuang – Harbin. Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 9500 кГц, находится на территории Китая. При этом  $R \approx 1310$  км. В день ионосферной бури выключения радиопередающего устройства были непродолжительными.

Поведение доплеровских спектров 5 августа 2019 г. заметно отличалось от поведения спектров в контрольные дни (рис. 12). В интервале времени 09:00 – 14:00 отмечались квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с  $T \approx 30$  мин,  $f_{Da} \approx 0.1 - 0.3$  Гц и  $\Delta T \approx 240$  мин.

Вариации  $A(t)$  2, 5 и 6 августа 2019 г. мало чем отличались.

Дадим краткую характеристику эффектов на радиотрассе Hohhot – Harbin. Радиостанция, излучающая на частоте 9520 кГц, расположена на территории Китая. При этом  $R \approx 1340$  км. В день ионосферной бури станция отключалась с 16:05 до 21:40.

5 августа 2019 г. вариации доплеровских спектров значительно отличались от вариаций спектров в контрольные дни (рис. 13). С 10:00 до 14:00 имели место аномально большие (от  $-0.7$  до  $0.7$  Гц) квазипериодические вариации  $f_D(t)$ . При этом  $T \approx 40$  мин, а  $\Delta T \approx 240$  мин.

Существенных различий в вариациях  $A(t)$  2, 5 и 6 августа 2019 г. не замечено.

Рассмотрим далее эффекты на радиотрассе Yamata – Harbin. Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 9750 кГц, дислоцировано на территории Японии. При этом  $R \approx 1570$  км.

Почти половину суток радиоизлучение отсутствовало.

С 08:00 до 16:00 в контрольные сутки доплеровские спектры были практически одномодовыми (рис. 14). 6 августа 2019 г. с 10:00 до 14:00 наблюдалась мода от другой радиостанции.

5 августа 2019 г. доплеровские спектры были диффузными. Они занимали полосу частот от  $-1.5$  до  $1$  Гц.

Поведение амплитуд 2, 5 и 6 августа 2019 г. мало отличалось.

### Обсуждение

Геокосмическая буря 5 – 6 августа 2019 г. была одной из самых заметных по интенсивности и продолжительности в 2019 г.

Геокосмическая буря привела к существенным возмущениям геомагнитного поля, которые продолжались не менее двух суток. Уровень и среднеквадратическое отклонение всех компонент геомагнитного поля заметно увеличился. Частота флуктуаций значительно увеличилась. На порядок увеличился уровень флуктуаций геомагнитного поля в диапазоне периодов 1 – 1000 с. Наибольшую амплитуду имели гармоники с периодом 400 – 600 с для D-компоненты и 700 – 900 с для H-компоненты.

Геокосмическая буря вызвала существенные возмущения в F-области ионосферы, особенно в период движения по ионосфере солнечного терминатора, практически не затронув E-область ионосферы. Эти возмущения сказались на характеристиках радиоволн в диапазоне частот 5 – 10 МГц. На всех радиотрассах наблюдалось заметное уширение доплеровских спектров. Это свидетельствовало об усилении плазменной турбулентности в ионосфере, об усилении рассеяния радиоволн, что и приводило к многолучевости. Заметно изменялось поведение основной моды в отраженном от ионосферы сигнале. На ряде радиотрасс наблюдались квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты с периодами от 20 до 40 мин и длительностью 120 –

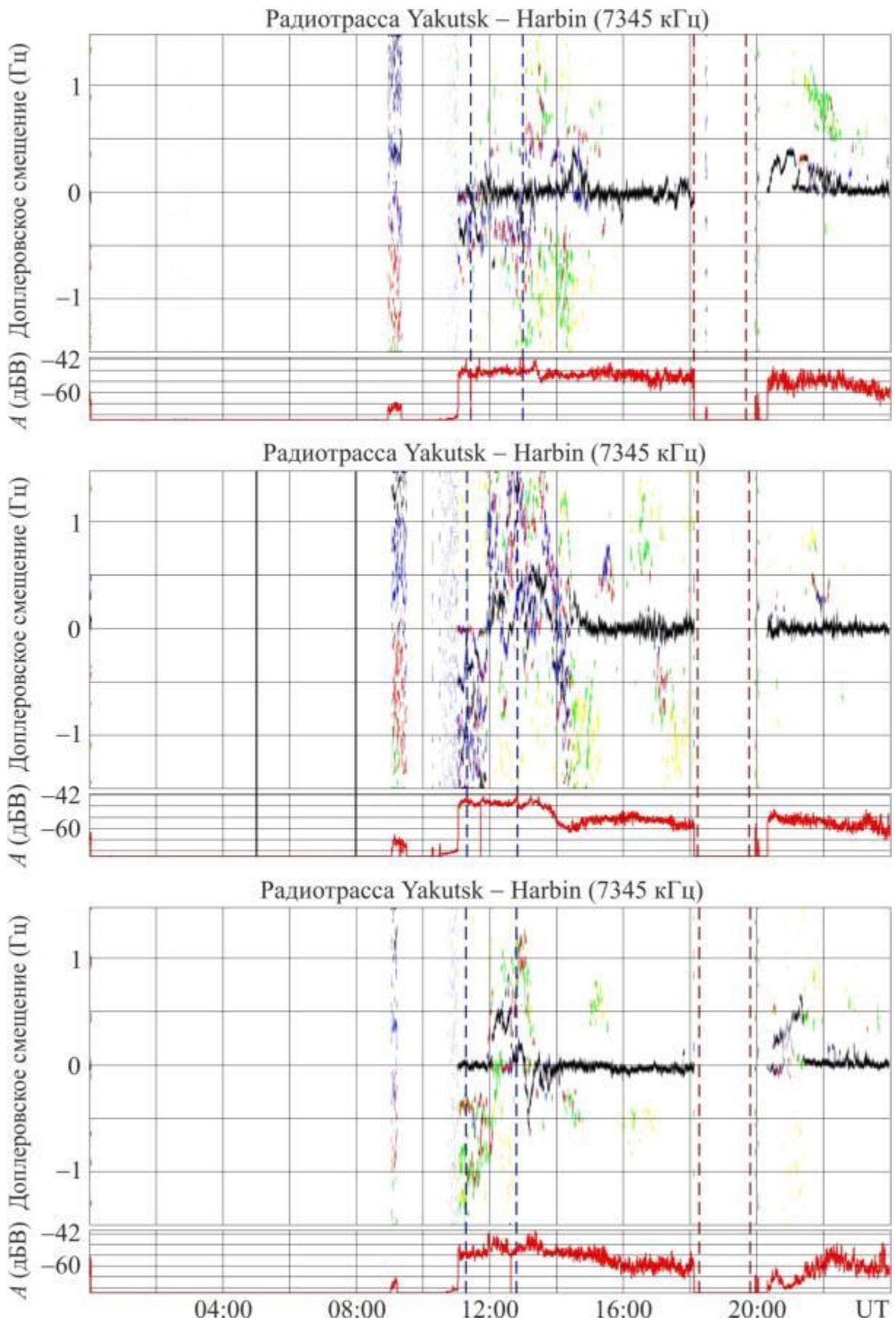


Рисунок 11 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Yakutsk – Harbin

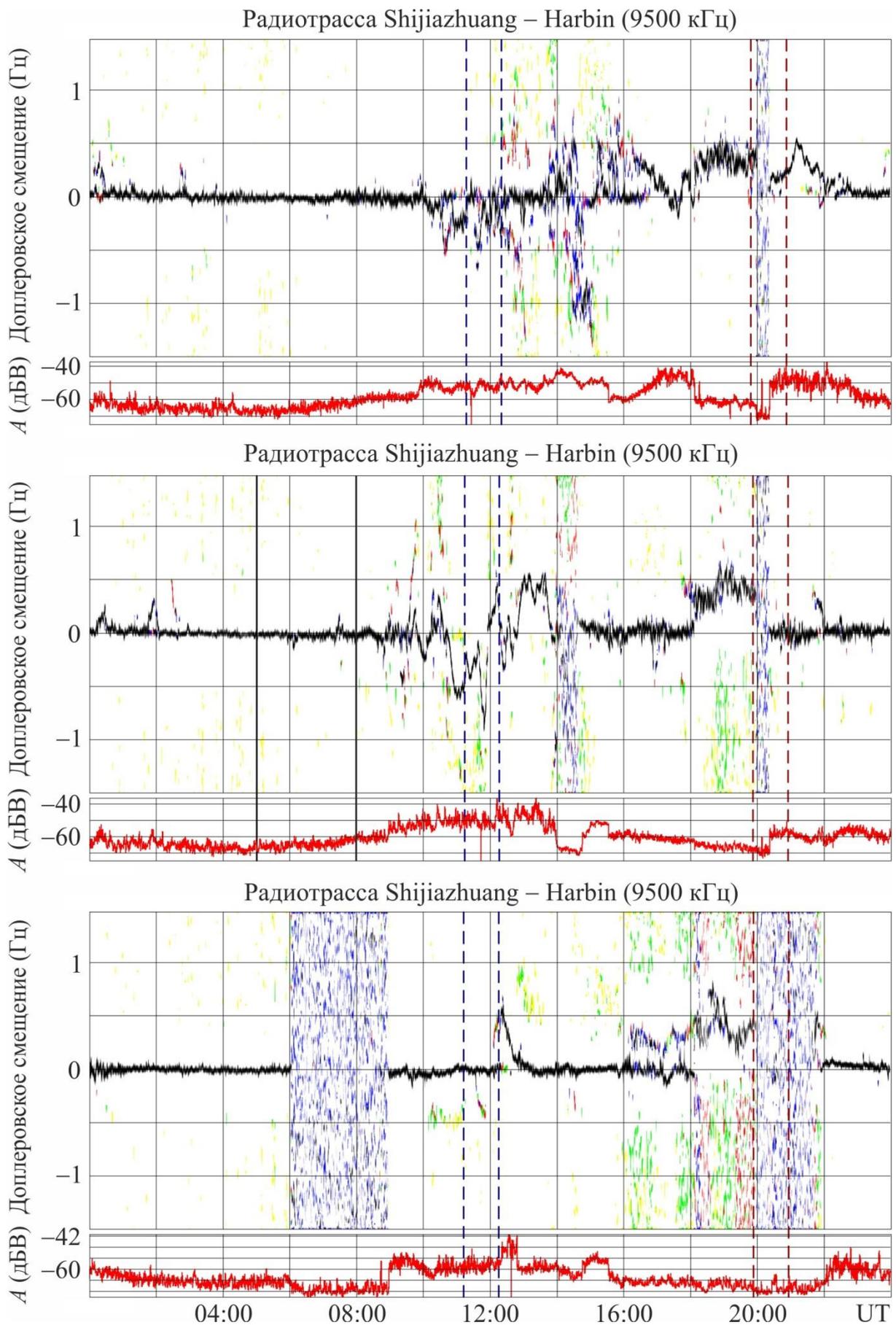


Рисунок 12 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Shijiazhuang – Harbin

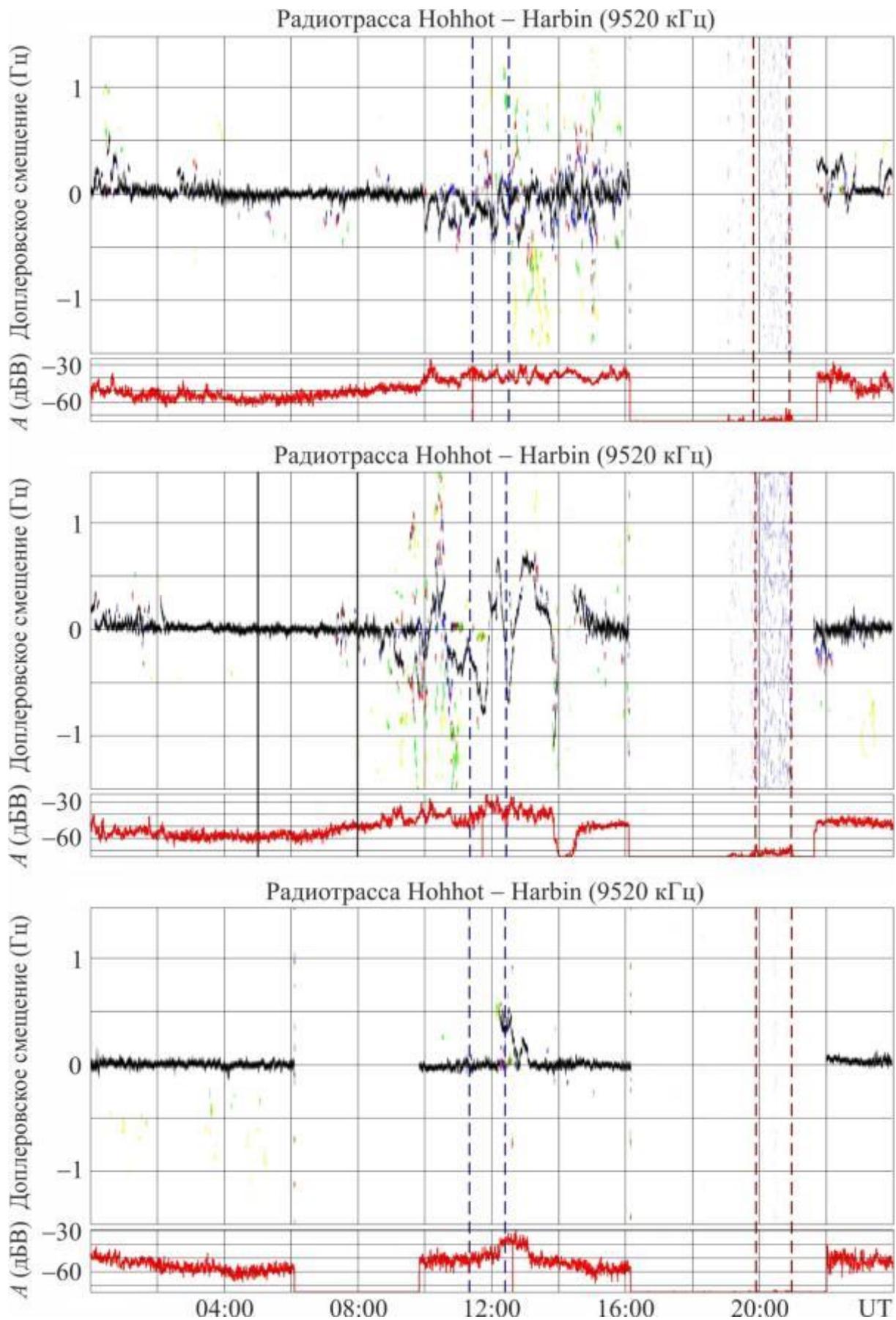


Рисунок 13 – То же, что на рис. 5, для радиорассы Hohhot – Harbin

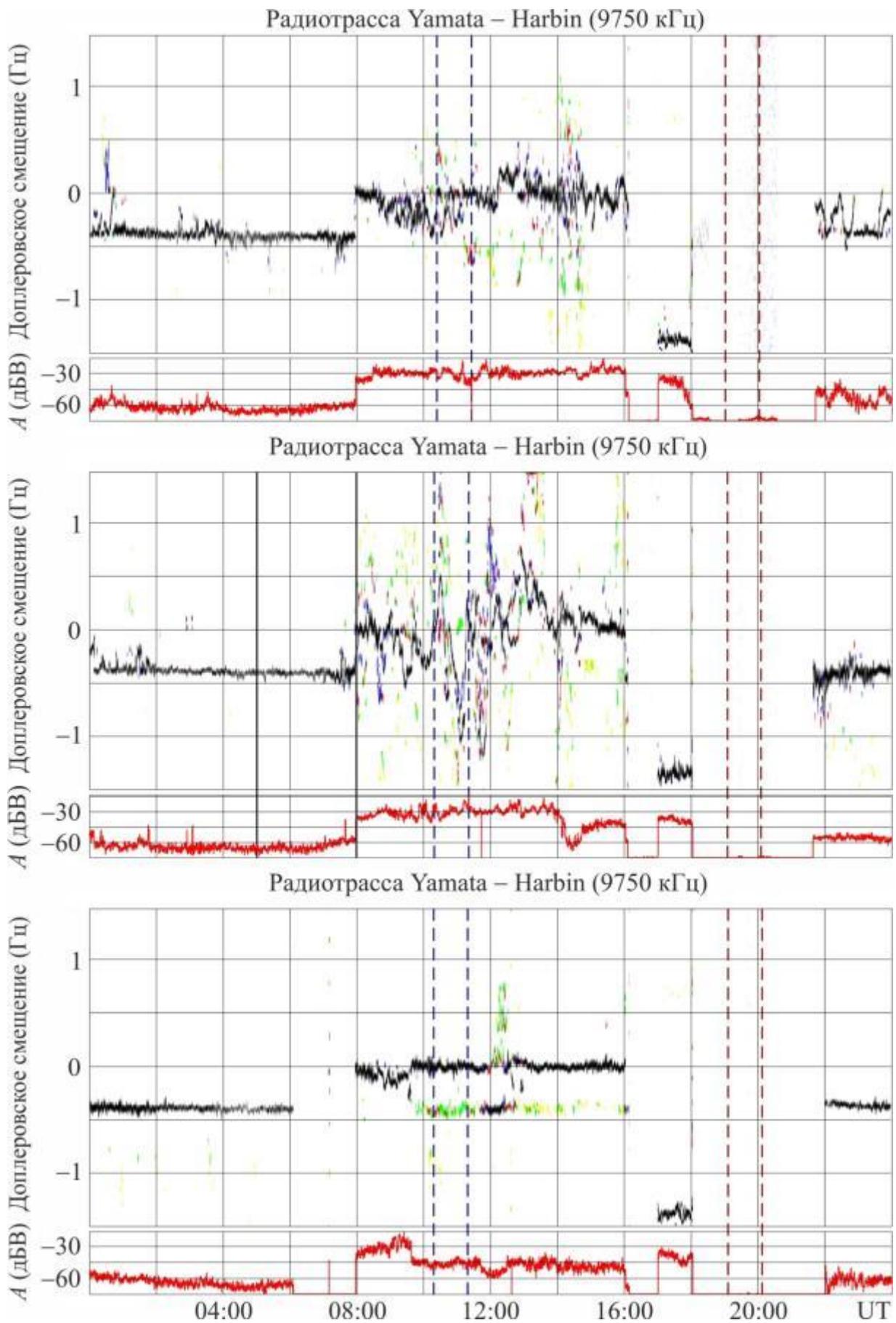


Рисунок 14 – То же, что на рис. 5, для радиотрассы Yamata – Harbin

240 мин. Эти вариации вызваны распространением атмосферных гравитационных волн, модулирующих концентрацию электронов  $N$  в ионосфере по периодическому закону. Амплитуду относительных возмущений  $N$  можно оценить из соотношения (19). Оценки по соотношению (19) для радиотрассы Ulaanbaatar – Harbin дают при  $2H \approx 30$  км  $\delta_{Na} \approx 10 - 16\%$ , а для радиотрассы Shijiazhuang – Harbin при  $2H \approx 50$  км  $\delta_{Na} \approx 3 - 10\%$ . Аномально большие амплитуды колебаний  $N$  были на радиотрассе Hohhot – Harbin, при этом  $\delta_{Na} \approx 80 - 90\%$ .

Подтверждено, что геокосмические бури сопровождаются усилением волновой активности в диапазоне атмосферных гравитационных волн. Эти волны генерируются в зоне полярного овала и распространяются к средним широтам.

На большинстве радиотрасс ионосферная буря не повлияла заметным образом на амплитуду сигнала. Это означает, что нижняя ионосфера, определяющая амплитуду сигнала, в течение данной ионосферной бури практически не возмущалась.

В целом ионосферная буря существенно повлияла на эффекты терминатора. Можно утверждать, что имело место синергетическое взаимодействие двух мощных источников возмущения ионосферы.

Перечислим основные результаты исследований эффектов геокосмической бури 5–6 августа 2019 г.

1. Увеличение основных параметров солнечного ветра 5 августа 2019 г. привело к геокосмической буре, которая наблюдалась в основном 5 и 6 августа 2019 г.

2. Главная фаза магнитной бури имела место 5 августа 2019 г. с 06:00 до 08:30. Фаза восстановления продолжалась не менее 4 суток.

3. Магнитная буря проявлялась в существенных вариациях всех компонент геомагнитного поля, увеличении на порядок уровня колебаний геомагнитного поля в диапазоне 400 – 950 с.

4. В течение ионосферной бури имели место значительные возмущения F-области ионосферы. E-область ионосферы оставалась практически невозмущенной.

5. Ионосферная буря существенно повлияла на доплеровские спектры радиоволн в диапазоне частот 5–10 МГц. Имели место значительное уширение доплеровских спектров, вариации доплеровского смещения частоты и его квазипериодические изменения с периодом 20–40 мин и длительностью 120–240 мин.

6. Квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты обусловлены квазипериодическими вариациями концентрации электронов, амплитуда их относительных возмущений изменялась от 3 до 16%.

7. На одной из трасс амплитуда доплеровского смещения частоты достигала 0.7 Гц. При этом  $\delta_{Na}$  могла достигать 80 – 90%.

8. Ионосферная буря незначительно повлияла на амплитуду сигнала на большинстве радиотрасс.

### Эффекты геокосмической бури 30 августа – 2 сентября 2019 г.

Целью настоящего раздела является общий анализ геокосмической бури 30 августа – 2 сентября 2019 г., анализ возмущений геомагнитного поля и ионосферы, а также влияния ионосферной бури на характеристики радиоволн ВЧ диапазона над территорией Китая [8].

Особенностью данной геокосмической бури является ее продолжительность (до четырех суток).

Используемые средства и методы описаны в предыдущих разделах.

### Состояние космической погоды

Для анализа параметров солнечного ветра воспользуемся данными сайта (<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>).

29 августа 2019 г. концентрация протонов  $n_{sw}$  увеличилась от  $\sim 10^6$  до  $15 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ , а затем в течение ближайших трех суток убывала от  $15 \cdot 10^6$  до  $\sim 10^6 \text{ м}^{-3}$  (рис. 15). Скорость  $V_{sw}$  частиц 28, 29 и в первой половине



от  $\sim 0.2$  до  $\sim 3$  нПа. Азимутальная  $B_y$ - и вертикальная  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля флуктуировали в пределах от  $-3$  до  $8$  нТл и от  $-7$  до  $3$  нТл соответственно. Примерно с 12:00 30 августа 2019 г. значения  $B_z$ -компоненты оставались преимущественно отрицательными. Это означало, что в геокосмосе и на Земле наступила магнитная буря. В течение последующих суток (от 08:00 30 августа 2019 г. до 07:00 3 сентября 2019 г. значения энергии в единицу времени  $\epsilon_A$ , поступающей от солнечного ветра в магнитосферу Земли, эпизодически увеличивались до  $14 - 15$  ГДж/с). До наступления бури значения  $\epsilon_A$  не превышали  $1$  ГДж/с. Значения индекса  $K_p$  до наступления бури изменялись от  $0$  до  $2$ , а после ее наступления в течение последующих четырех суток  $K_p$ -индекс изменялся от  $\sim 2$  до  $5.7$ . До наступления бури значения  $D_{st}$ -индекса флуктуировали в пределах от  $-10$  до  $6$  нТл. Примерно около 12:00 30 августа 2019 г.  $D_{st} \approx 12$  нТл. С 10:00 до 14:00 имело место внезапное начало геомагнитной бури. После 20:00 30 августа 2019 г. значения  $D_{st}$ -индекса стали уменьшаться до  $-55$  нТл. Это произошло около 06:00 1 сентября 2019 г. В указанном интервале времени наблюдалась главная фаза геомагнитной бури. После 06:00 1 сентября 2019 г. в течение еще нескольких суток регистрировалась фаза восстановления. Эта геомагнитная буря была самой продолжительной, но не самой сильной за последние годы. В этом заключается ее главная особенность. Ожидалось, что за продолжительной магнитной бурей последует продолжительная ионосферная буря.

Далее несколько подробнее опишем особенности геомагнитной и ионосферной бурь.

### Анализ магнитной бури

Рассмотрим вначале вариации уровня геомагнитного поля. 29 августа 2019 г. геомагнитное поле находилось в спокойном состоянии (рис. 16, а). После 12:00 30 августа 2019 г. появились относительно небольшие ( $\sim 10 - 20$  нТл) вариации всех

компонент поля (см. рис. 16, б). 31 августа 2019 г. вариации усилились до  $60 - 70$  нТл (см. рис. 16, в). Меньше изменялась Z-компонента (не более, чем на  $20$  нТл). Примерно такими же были вариации и 1 сентября 2019 г. (см. рис. 16, г). Размах флуктуаций уровня компонент заметно уменьшился 2 сентября 2019 г. (см. рис. 16, д). В течение следующих суток магнитное поле было слабо возмущенным. Размах уровня флуктуаций не превышал  $15$  нТл (см. рис. 16, е).

Опишем далее флуктуации уровня геомагнитного поля. 29 августа 2019 г. до 11:00 вариации уровня H- и D-компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов  $100 - 1000$  с были незначительными (меньше  $0.2 - 0.3$  нТл) (рис. 17). С 11:00 до 17:00 их уровень эпизодически увеличивался до  $\pm 1$  нТл.

30 августа 2019 г. примерно в течение фазы внезапного начала магнитной бури уровень флуктуаций увеличился в  $2 - 3$  раза. Это продолжалось около  $4 - 5$  часов.

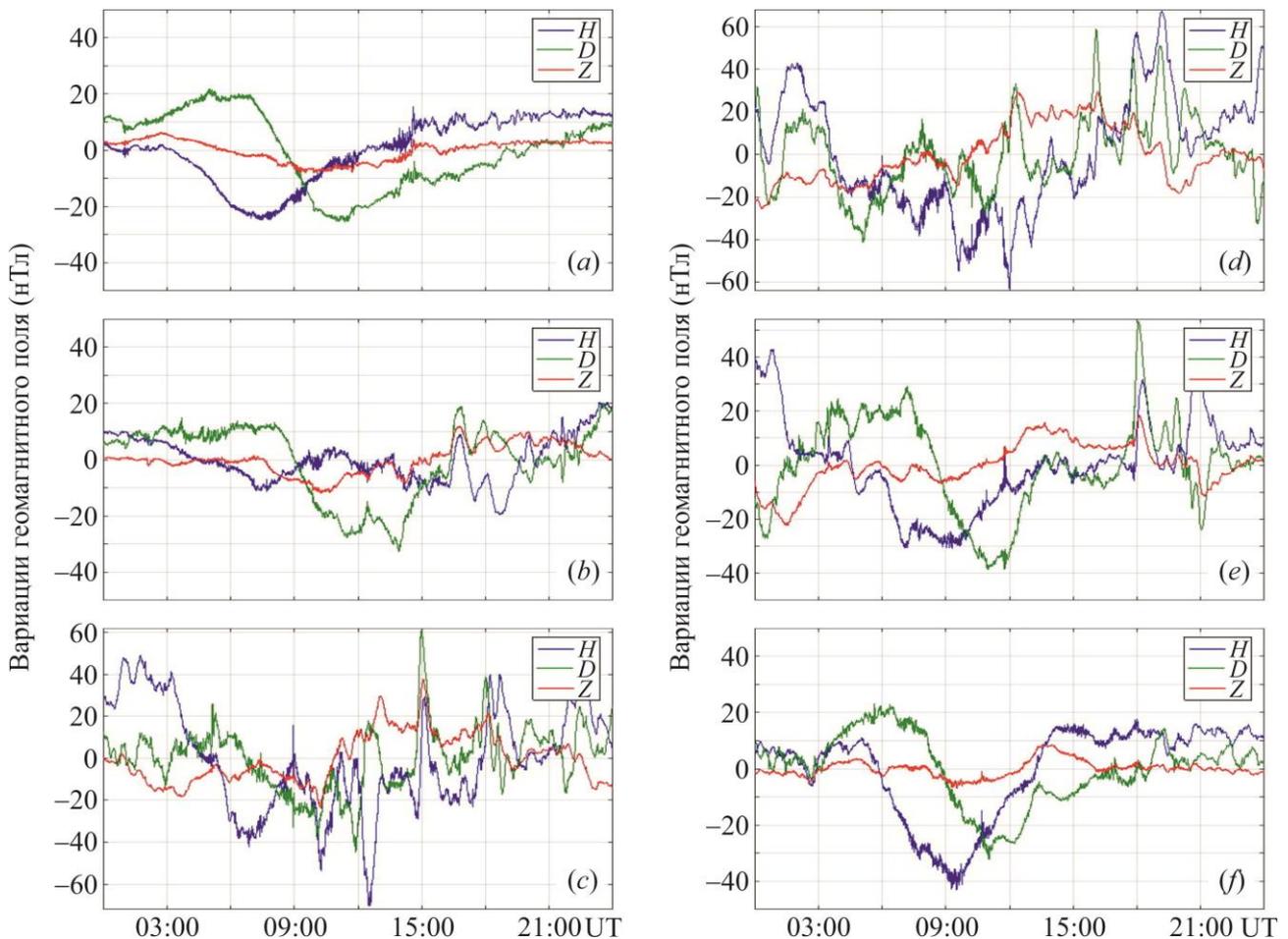
31 августа 2019 г. в течение главной фазы магнитной бури уровень флуктуаций увеличился до  $1.5 - 2$  нТл, а эпизодически даже до  $4$  нТл. Продолжительность этого эффекта была не менее  $10$  часов.

1 сентября 2019 г. примерно с 08:00 до 13:00 также наблюдалось существенное увеличение уровня флуктуаций (до  $2 - 4$  нТл).

2 и 3 сентября 2019 г. также имели место эпизодические увеличения уровня флуктуаций (до  $1.5 - 2$  нТл) продолжительностью около  $1$  часа.

### Анализ ионосферной бури

Проанализируем состояние ионосферы. Общее состояние ионосферы проанализировано по данным двух ионозондов. Первый из них расположен вблизи используемых радиотрасс наклонного зондирования ионосферы, а именно вблизи г. Wakkanai ( $45.16^\circ\text{N}$ ,  $141.25^\circ\text{E}$ ), Япония. Для оценки глобальности ионосферной бури привлечены данные ионозонда, расположенного возле г. Москва ( $55.47^\circ\text{N}$ ,  $37.30^\circ\text{E}$ ), Россия (рис. 18).



**Рисунок 16** – H-, D-, Z-компоненты: *a* – 29 августа 2019 г.; *б* – 30 августа 2019 г.; *в* – 31 августа 2019 г.; *г* – 1 сентября 2019 г.; *д* – 2 сентября 2019 г.; *е* – 3 сентября 2019 г. ([http://geospace.com.ua/data/metmag\\_mf.php](http://geospace.com.ua/data/metmag_mf.php))

Сначала рассмотрим данные японского ионозонда. С 29 августа 2019 г. до 3 сентября 2019 г. вариации  $f_{\min}$  обычно были незначительными (от 1.4 до 1.5 МГц). Лишь 1 сентября 2019 г. эпизодически наблюдались всплески  $f_{\min}$  до 1.7–2 МГц.

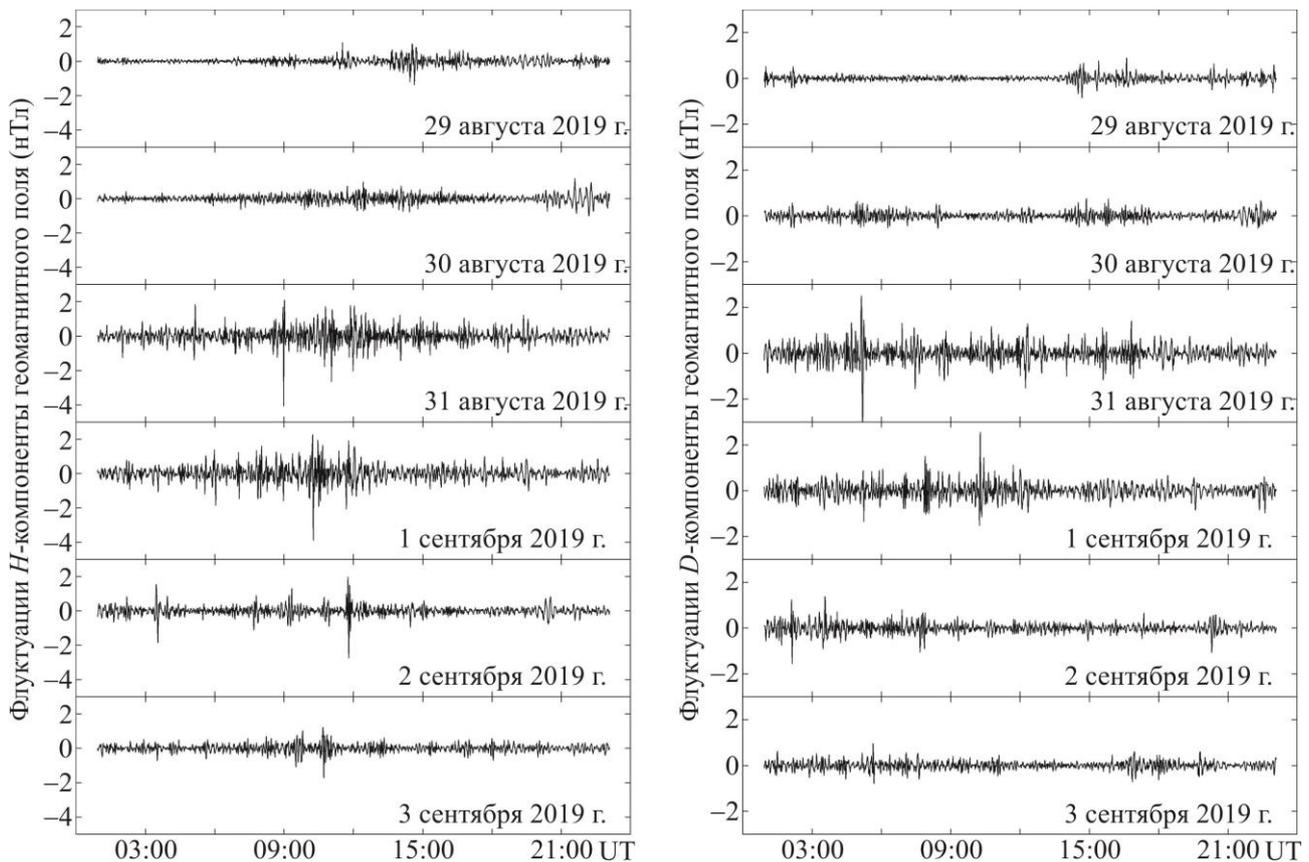
Поведение частоты  $f_oE(t)$  во все сутки было примерно одинаковым. Днем эта частота достигала 2.9–3.2 МГц. К вечеру она уменьшалась до 1.8 МГц. В ночное время  $f_oE$  не регистрировалась. Утром в течение трех часов она увеличивалась от 1.8 до ~3 МГц. Частота  $f_oE_s$  изменялась в широких пределах (от ~3 до ~12–16 МГц). В течение главной фазы магнитной бури вариации  $f_oE_s$  были незначительными.

Вариации  $f_oF_2(t)$  были небольшими. В дневное время эта частота была около

5 МГц, а ночью она постепенно уменьшалась от 4 до 3 МГц.

Временные вариации высоты  $h'E(t)$  обычно были незначительными (до 5–10 км). Однако, 31 августа 2019 г. и 1 сентября 2019 г. примерно с 16:00 до 19:00 высота  $h'E$  увеличивалась от ~100 до ~120 км. Значения  $h'E_s(t)$  сильно флуктуировали – от ~80 до 160–170 км. Надежных данных от высоты  $h'F_2(t)$  не удалось получить. Скорее всего, она изменялась от 200 до 300 км.

Опишем данные российского ионозонда. Временные вариации основных параметров ионограмм на станции Москва показаны на рис. 18.



**Рисунок 17** – Вариации магнитного поля, зарегистрированные в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина

Значения  $f_{\min}$ , чаще всего, были в диапазоне 1.2–1.7 МГц. Иногда наблюдались всплески до 2–3 МГц. 31 августа 2019 г. с 07:30 до 08:30  $f_{\min}$  увеличивалась от 1.4 до 2.2–2.4 МГц. С 1 до 3 сентября 2019 г. значения  $f_{\min}$  сильно флуктуировали.

Частота  $f_oE$  в течение всех суток отслеживала суточный ход концентрации электронов. Среднеквадратическое отклонение  $f_oE$  не превышало  $\sim 0.1$  МГц. В дневное время  $f_oE$  достигала примерно 3 МГц, а утром и вечером она уменьшалась до 1.3–1.4 МГц. В ночное время не удавалось измерять  $f_oE$ .

Частота  $f_oE_s$  сильно флуктуировала (от 2 до 5–7 МГц). В дневное время размах флуктуаций был больше, чем в ночное время. 31 августа 2019 г. с 05:00 до 08:00  $f_oE_s$  увеличивалась от 3 до 6–7 МГц.

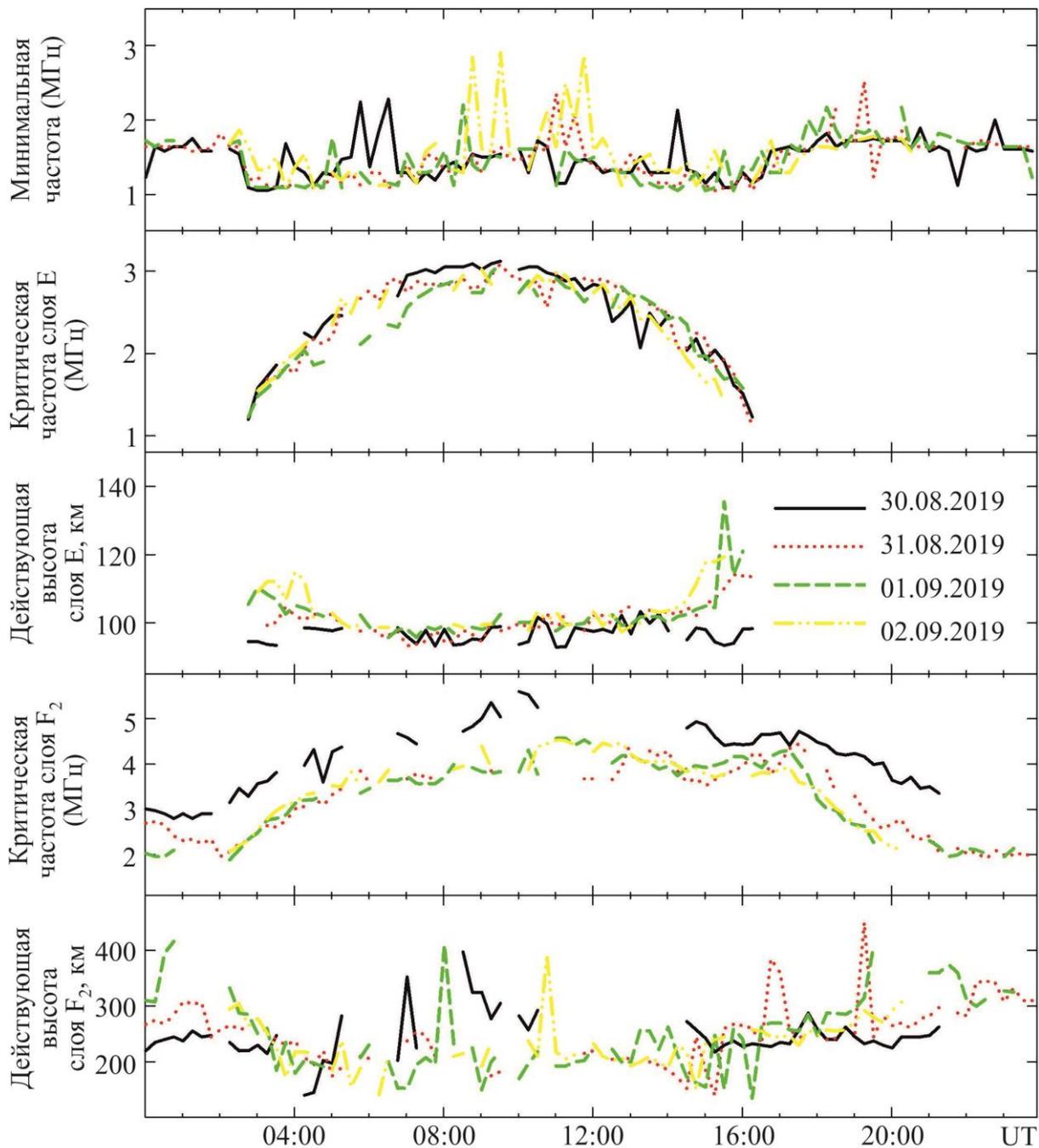
Частота  $f_oF_2$  29 августа 2019 г. в ночное время уменьшалась до 3 МГц, в дневное время она увеличивалась до 4.5 МГц, а 30 августа 2019 г. даже до 5 МГц. 31 августа 2019 г.  $f_oF_2$  была в течение почти

всех суток на 0.7–1.1 МГц ниже, чем 29 августа 2019 г. 31 августа 2019 г. с 09:00 до 11:00 и с 12:00 до 15:00 наблюдалось увеличение  $f_oF_2$  на 0.7–0.8 МГц.

Ночью и утром 1 сентября 2019 г. значения  $f_oF_2$  были на 0.5–0.6 МГц меньше, чем эти же значения 2 сентября 2019 г. В дневное время разница между этими частотами в среднем не превышала 0.2–0.3 МГц.

Высота  $h'E$  обычно флуктуировала в диапазоне 95–100 км. 31 августа 2019 г. с 10:00 до 13:00 она увеличилась от 102 до 113 км. Значительный рост  $h'E$  от 110 до 133 км имел место и 1 сентября 2019 г. примерно в 12:30.

Высота  $h'E_s$  флуктуировала в диапазоне от 100–105 до 130–140 км. 31 августа 2019 г. с 10:00 до 13:00 эта высота увеличивалась от  $\sim 105$  до 130 км. Увеличение от  $\sim 110$  до 125–132 км имело место также 1 сентября 2019 г. с 08:00 до 14:00.



**Рисунок 18** – Временные вариации минимальной частоты, критической частоты и действующей высоты E-слоя ионосферы, действующей высоты и критической частоты F<sub>2</sub>-слоя ионосферы (по данным

[<https://lgdc.uml.edu/common/DIDBYearListForStation?ursiCode=MO155>])

Высота  $h'F_2$  с 29 августа до 3 сентября 2019 г. сильно флуктуировала (от ~200 до 400 – 500 км). Резкие всплески  $h'F_2$  от 250 до 400 – 450 км имели место 31 августа 2019 г. в интервалах времени 13:30 – 14:30 и 16:00 – 16:30. Значительные (от 250 – 300 до 400 – 500 км) вариации  $h'F_2$  наблюдались также в

ночь с 31 августа на 1 сентября 2019 г. и с 16:00 до 18:00 1 сентября 2019 г.

**Результаты наклонного зондирования ионосферы**

Измерения выполнены для 14 радиотрасс. Режимы работы лишь 11 радиостанций оказались пригодными для дальнейшей обработки результатов измерений.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе Lintong/Pucheng – Harbin. Радиостанция, излучающая на частоте 5000 кГц, дислоцирована на территории Китая. Длина радиотрассы вдоль поверхности Земли  $R \approx 1875$  км.

Примерно с 00:00 до 07:00, т.е. в течение местного дня, амплитуда сигнала  $A \approx -70$  дБ, а доплеровское смещение частоты основной моды  $f_D(t) \approx 0$  Гц (рис. 19). После 07:00, т.е. в местное вечернее время,  $A$  постепенно увеличивалась до значений  $-40$  дБ после захода Солнца. Значения  $f_D(t)$  постепенно уменьшались от 0 до  $-(0.5 - 1)$  Гц. Примерно с 09:00 до 16:00 доплеровские спектры значительно уширились (от  $-2.5$  до 2 Гц).

30 августа 2019 г., т.е. в контрольные сутки, значительные вариации  $f_D(t)$  (от  $-0.3$  до 0.4 Гц) отмечались с 18:00 до 22:00.

31 августа 2019 г.  $f_D(t)$  изменялось от  $-0.3$  до 0.3 Гц в интервале времени 12:00 – 18:00. Имели место квазипериодические вариации  $f_D(t)$ . При этом период  $T \approx 40$  мин, а амплитуда  $f_{Da} \approx 0.20 - 0.25$  Гц. С 17:00 до 22:00 наблюдались значительные (до 15 – 20 дБ) вариации  $A(t)$ .

1 сентября 2019 г. при заходе Солнца в ионосфере вариации  $f_D(t)$  значительно (от  $-1.8$  до 1.4 Гц) увеличились. Эффект ионосферной бури наблюдался, по крайней мере, с 10:00 до 19:00. Существенные (до 20 дБ) вариации  $A(t)$  наблюдались в интервале времени 11:30 – 21:00.

2 и 3 сентября 2019 г. поведение доплеровских спектров почти не отличалось от их поведения в невозмущенные сутки.

Опишем эффекты на радиотрассе Hwaseong – Harbin. Радиопередающее устройство, работающее на частоте 6015 кГц, находится в Южной Корее. При этом  $R \approx 950$  км. С 00:00 до 03:40 радиопередающее устройство выключалось.

29 августа 2019 г. в течение почти всего времени  $f_D(t) \approx 0$  Гц (рис. 20). Наибольшие уширения доплеровских спектров наблюдались в окрестности интервалов времени прохождения солнечных терминаторов. Вариации  $A(t)$  соответствовали суточному ходу.

30 августа 2019 г. с 13:00 до 21:00 имели место значительные (от  $-0.4$  до

0.4 Гц) вариации доплеровского смещения частоты основной моды с квазипериодом  $T \approx 70 - 110$  мин и  $f_{Da} \approx 0.4$  Гц.

31 августа 2019 г. с 12:00 до 17:00 наблюдались квазипериодические изменения  $f_D(t)$ , для которых  $T \approx 40$  мин и  $f_{Da} \approx 0.4 - 0.7$  Гц.

1 сентября 2019 г. с 10:00 до 14:00 и с 16:30 до 19:00 имели место очень значительные (от  $-1.5$  до 1.3 Гц) вариации  $f_D(t)$ , а также доплеровских спектров. Примерно с 10:00 до 21:00 отмечались сильные (до 30 дБ) вариации уровня сигнала.

2 и 3 сентября 2019 г. значительных вариаций доплеровских спектров и амплитуд сигнала не наблюдалось.

Охарактеризуем эффекты на радиотрассе Chiba/Nagara – Harbin. Радиостанция, работающая на частоте 6055 кГц, находится на территории Японии. При этом  $R \approx 1610$  км. Излучение радиостанции отсутствовало с 15:00 до 22:00.

Поведение доплеровских спектров 29, 30 и 31 августа 2019 г. было сходным (рис. 21). С 06:00 до 15:00 спектры были диффузными. Они занимали диапазон частот от  $-1.5$  до 1.5 Гц.

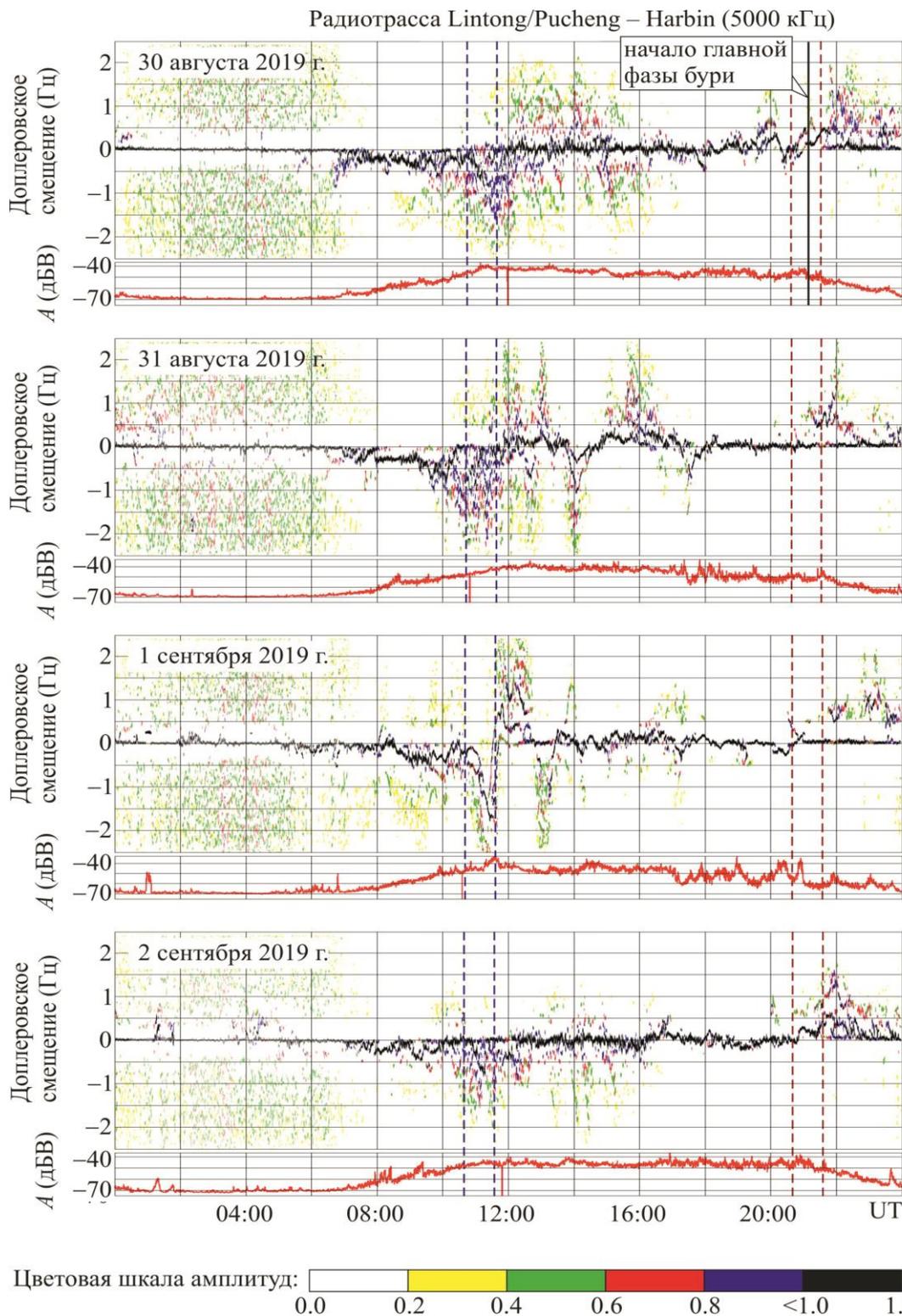
1 сентября 2019 г. поведение доплеровских спектров резко отличалось от их поведения в предыдущие сутки. Диффузность была выражена слабо. С 10:00 до 15:00 доплеровские смещения частоты резко изменялись от  $-1.5$  до 1.3 Гц. Отмечался квазипериодический процесс с  $T \approx 60$  мин и более и  $f_{Da} \approx 0.2$  Гц и более. Амплитуда сигнала в этот день также сильно флуктуировала (до 20 дБ).

2 сентября 2019 г. в интервале времени 07:00 – 12:00 доплеровские спектры были еще возмущены.

3 сентября 2019 г. диффузность доплеровских спектров была незначительна. Большую часть времени  $f_D(t) \approx 0$  Гц.

Дадим характеристику эффектам на радиотрассе Beijing – Harbin. Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 6175 кГц, расположено в Китае. При этом  $R \approx 1050$  км. Излучение имело место лишь с 09:00 до 18:00 и с 20:20 до 24:00.

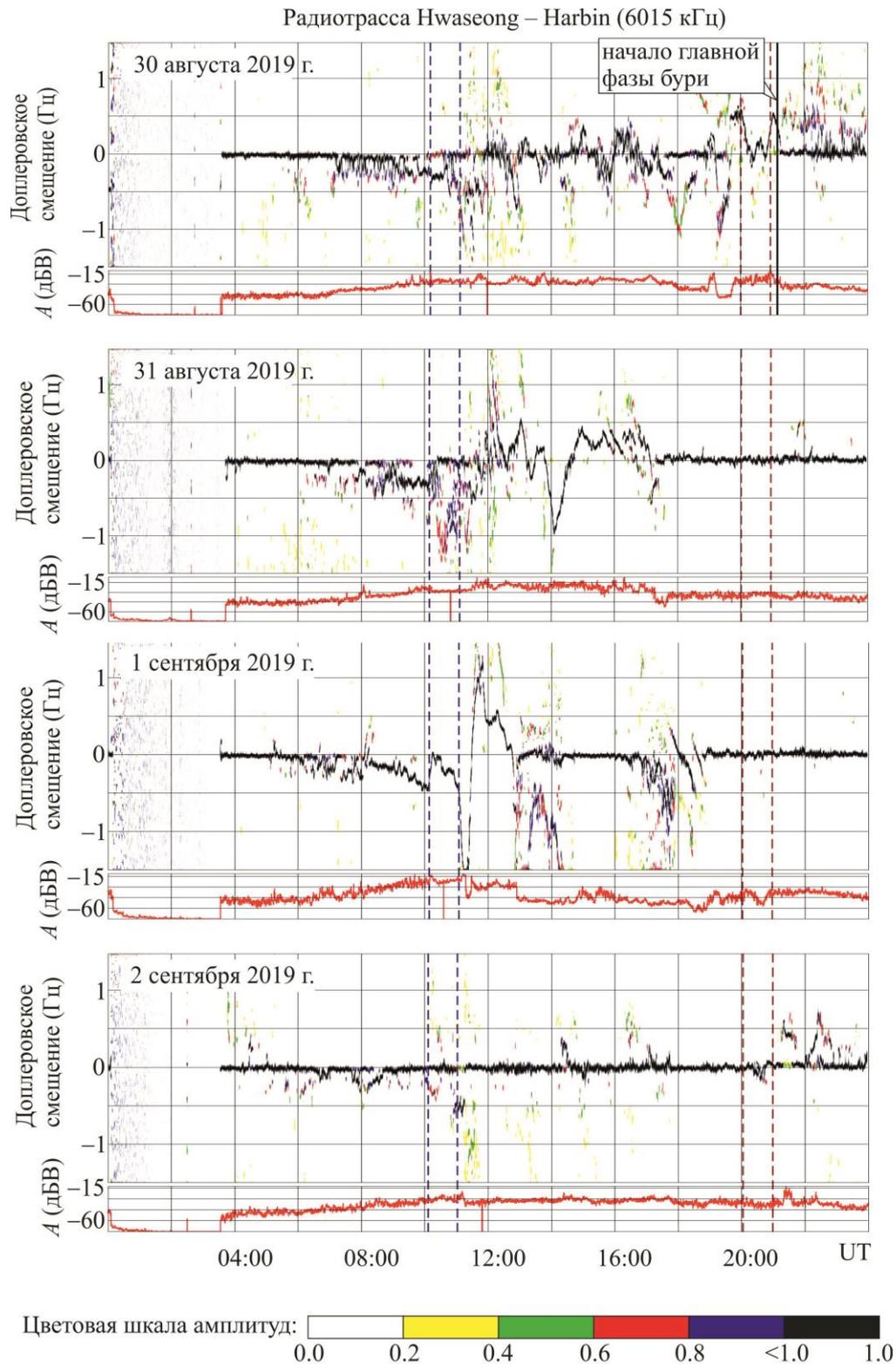




**Рисунок 19** – Временные вариации ДС и амплитуды  $A$  на радиотрассе Lintong/Pucheng – Harbin (панели сверху вниз): 30, 31 августа и 1 и 2 сентября 2019 г. Вертикальными штриховыми линиями здесь и далее показаны моменты захода и восхода Солнца на высотах 0 и 100 км соответственно.

29 и 30 августа 2019 г. доплеровские спектры были скорее одномодовыми, лишь эпизодически появлялась вторая мода

(рис. 22). Почти все время  $f_D(t) \approx 0$  Гц, а  $A(t) \approx -(30 - 40)$  дБ.

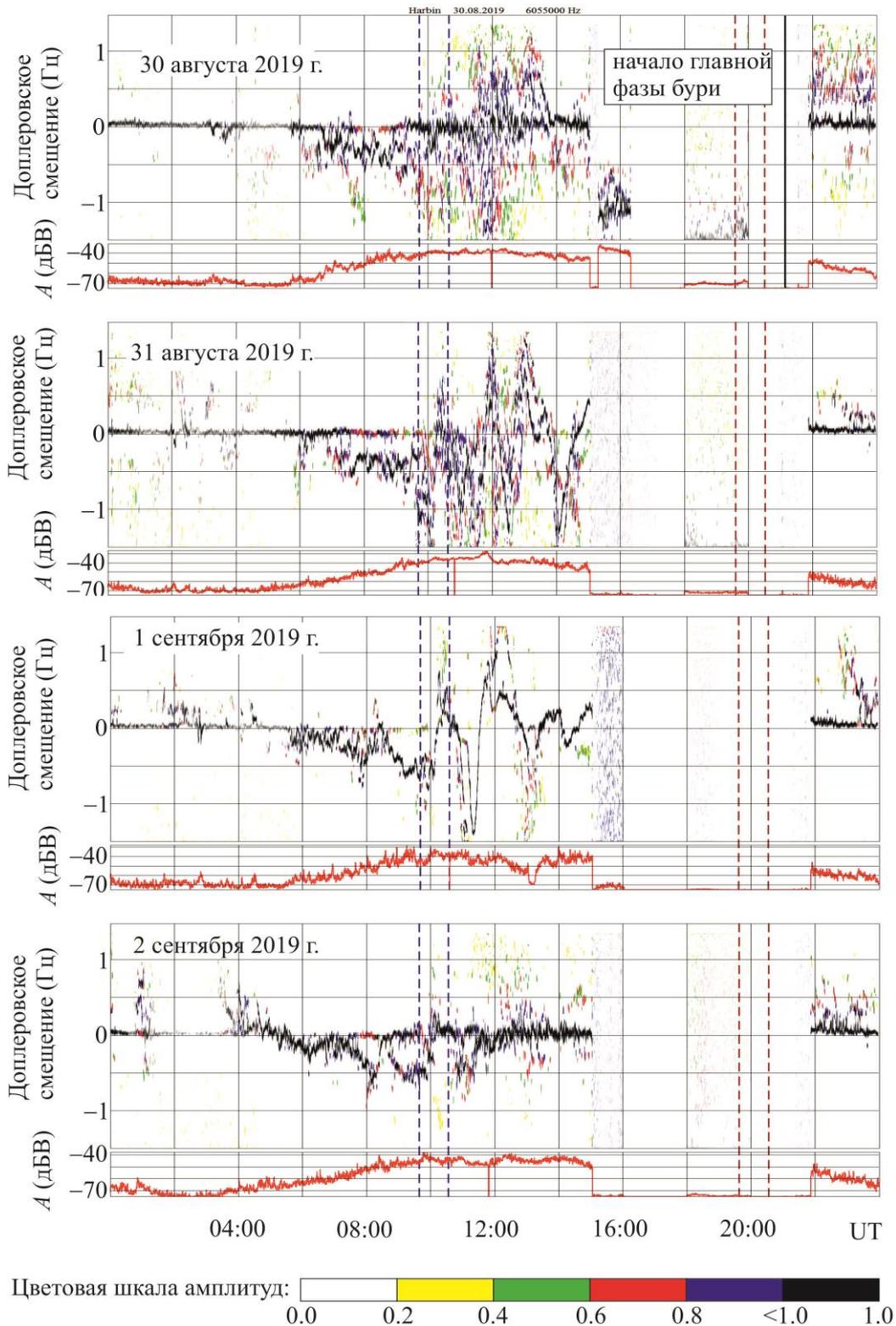


**Рисунок 20** – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Hwaseong – Harbin (6015 кГц)

31 августа 2019 г. в интервале времени 12:00 – 18:00 поведение  $f_D(t)$  резко изменилось. Зависимость  $f_D(t)$  стала квазипериодической с  $T \approx 30$  мин и

$f_{Da} \approx 0.2$  Гц. Около 14:00 имело место резкое уменьшение  $f_D$  от 0.2 до  $-0.7$  Гц.

Радиотрасса Chiba/Nagara – Harbin (6055 кГц)



**Рисунок 21** – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Chiba/Nagara – Harbin (6055 кГц).

Сильные (от  $-1.2$  до  $1.1$  Гц) вариации  $f_D$  наблюдались 1 сентября 2019 г. в интервалах времени 10:00 – 12:00 и 16:00 – 18:00. С 16:00 до 18:00  $A(t)$  уменьшилась на 30 дБ.

2 и 3 сентября 2019 г. поведение доплеровских спектров было типичным для спокойной ионосферы.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе Goyang – Harbin. Радиостанция, работающая на частоте 6600 кГц, находится

на территории Южной Кореи. При этом  $R \approx 910$  км. С 05:00 до 08:50 доплеровские измерения были невозможными. То же самое повторилось 3 сентября 2019 г. в интервале времени 10:00 – 11:30.

состоянию ионосферы. Для основной моды  $f_D(t) \approx 0$  Гц (рис. 23).

29 августа 2019 г. доплеровские спектры соответствовали невозмущенному Радиотрасса Beijing – Harbin (6175 кГц)

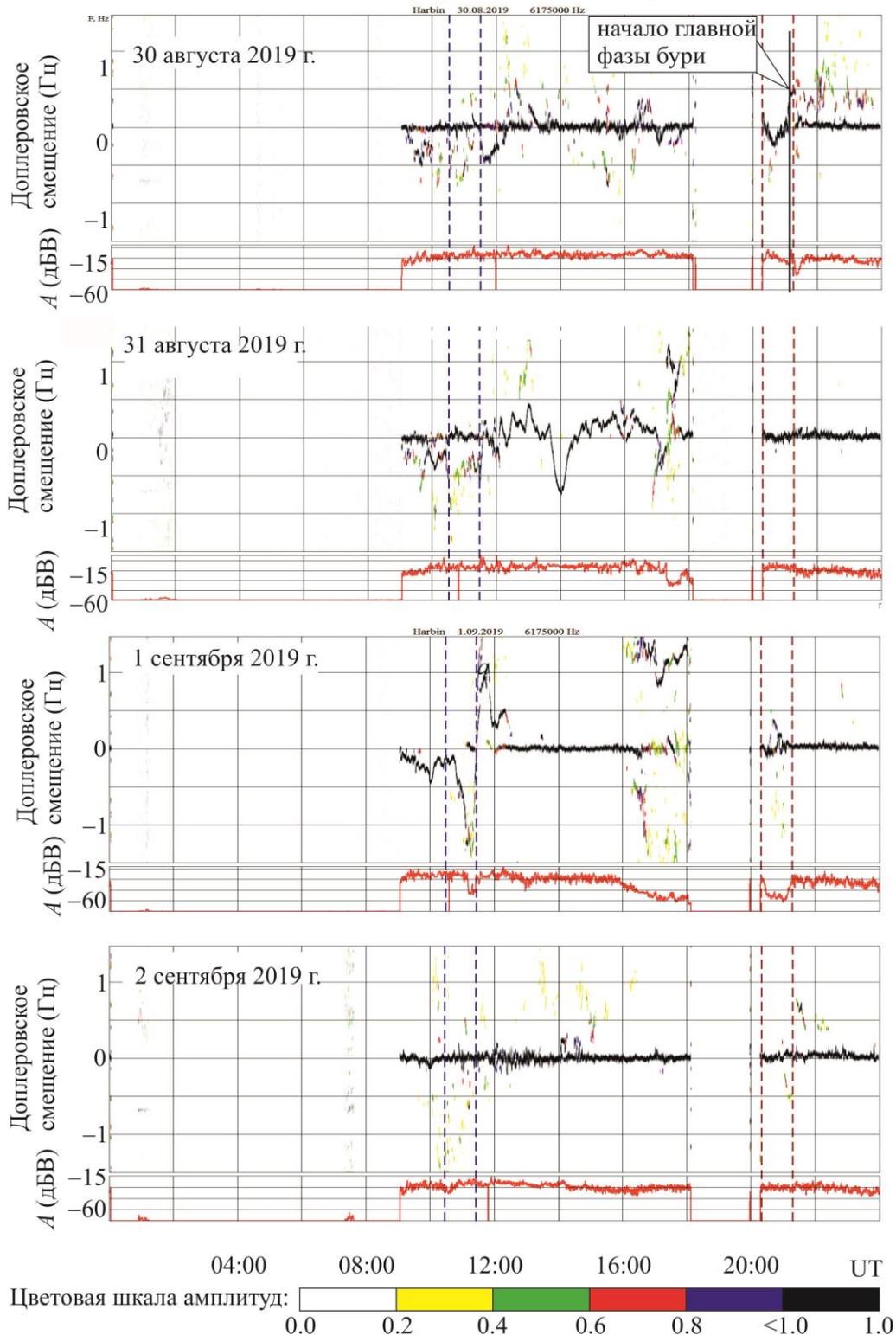
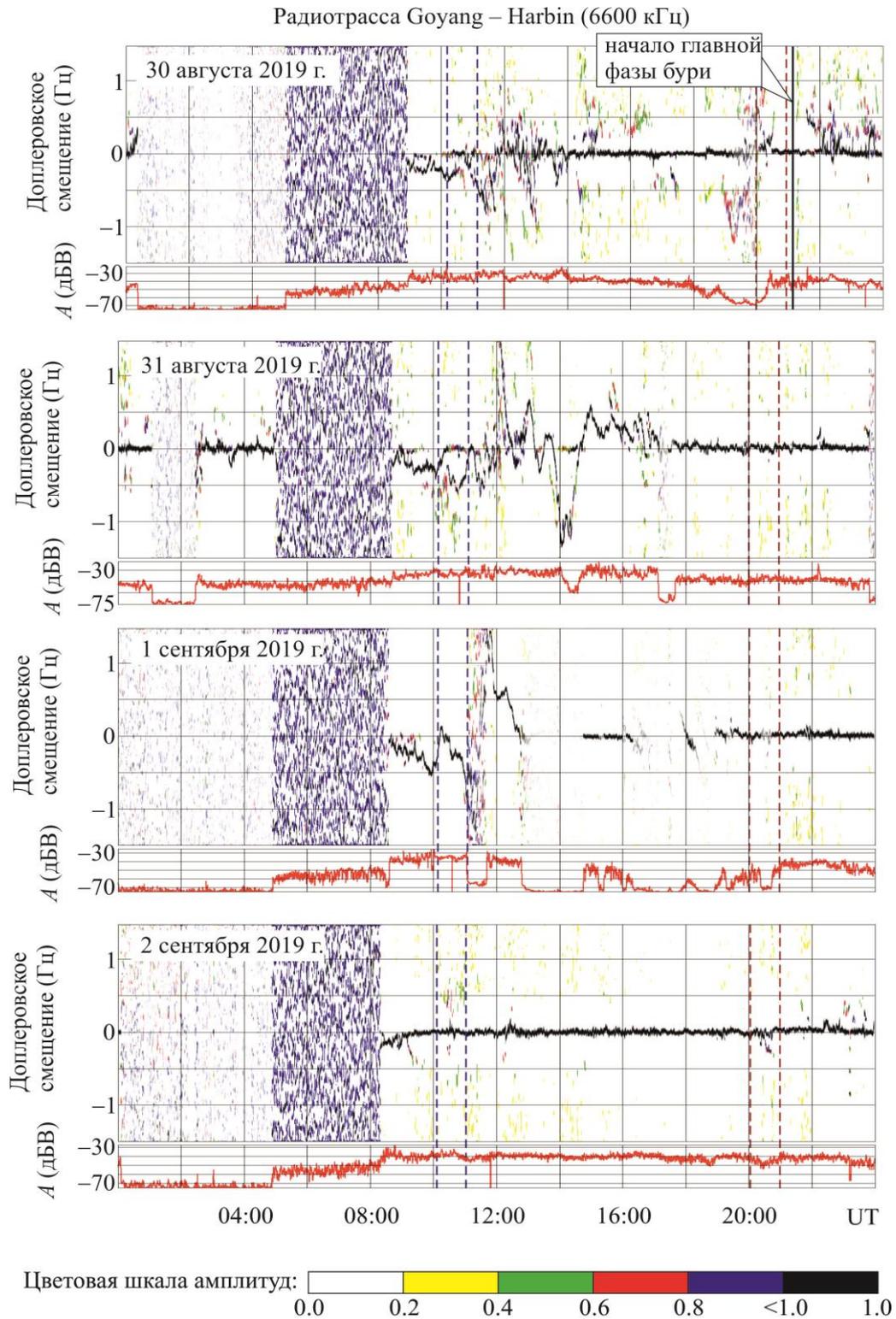


Рисунок 22 – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Beijing – Harbin (6175 кГц).



**Рисунок 23** – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Goyang – Harbin (6600 кГц).

30 августа 2019 г. с 09:00 до 14:00 наблюдалось заметное уширение доплеровских спектров. В этом же интервале времени усилились флуктуации  $A(t)$ , достигавшие 15–20 дБ.

31 августа 2019 г. с 09:00 до 17:00 имели место значительные (от  $-1.3$  до  $0.7$  Гц) вариации доплеровского смещения частоты. Вариации  $f_D(t)$  были квазипериодическими с  $T \approx 40$  мин и  $f_{Da} \approx 0.2 - 0.5$  Гц. С 17:30 до 19:00

$T \approx 15$  мин, а  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. Амплитуда  $A(t)$  эпизодически изменялась до 30 дБ.

Опишем основные эффекты на радиотрассе Ulaanbaator – Harbin. Радиостанция, которая излучает на частоте 7260 кГц, дислоцирована на территории Монголии. При этом  $R \approx 1496$  км. Радиостанция выключалась с 05:00 до 07:00 и с 18:00 до 20:30.

29 августа 2019 г. доплеровские спектры были скорее одномодовыми,  $f_D(t)$  изменялось практически монотонно (рис. 24).

30 августа 2019 г. с 12:00 до 15:00  $f_D(t)$  изменялось по квазипериодическому закону с периодами 20 и 40 мин,  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц для  $T \approx 20$  мин и  $f_{Da} \approx 0.3$  Гц для  $T \approx 40$  мин.

31 августа 2019 г.  $f_D(t)$  сильно флуктуировало, почти все время наблюдения изменялось по квазипериодическому закону с  $T \approx 20$  мин и  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. С 13:30 до 14:00 имело место резкое падение  $f_D(t)$  от 0 до  $-1.5$  Гц с последующим увеличением от  $-1.5$  до 0 Гц.

1 сентября 2019 г. в интервале времени 09:00 – 12:30 отмечались резкие изменения  $f_D(t)$  от 0 до  $-1.5$  Гц и обратно.

2 сентября 2019 г. с 11:00 до 15:00 имели место квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с  $T \approx 20 - 25$  мин и  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц.

3 сентября 2019 г. с 13:00 до 15:00 также наблюдались квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с  $T \approx 60$  мин и  $f_{Da} \approx 0.15$  Гц.

С 30 августа по 2 сентября 2019 г. отмечалось увеличение частоты и уровня флуктуаций амплитуды сигнала.

Охарактеризуем эффекты на радиотрассе Yakutsk – Harbin. Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 7350 кГц, находится на территории России. При этом  $R \approx 1845$  км. К сожалению, излучение было только в следующих интервалах времени: 11:00–18:00 и 20:15–24:00.

29 и 30 августа 2019 г. вариации доплеровских спектров и амплитуд сигнала были относительно невелики (рис. 25).

31 августа 2019 г. доплеровские спектры занимали диапазон частот от  $-1.5$  до 1.5 Гц. Наблюдались квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с  $T \approx 24$  мин и  $f_{Da} \approx 0.2$  Гц. С 13:40 до 14:50 имело место уменьшение

$f_D(t)$  от 0 до  $-1.5$  Гц, а затем его увеличение от  $-1.5$  до 0 Гц. При этом значения  $A(t)$  уменьшались на 10 дБ. С 15:00 до 16:00 размах флуктуаций  $A(t)$  достигал 20 дБ.

1 сентября 2019 г. в интервалах времени 11:00 – 13:00 и 16:00 – 18:00 наблюдались значительные вариации доплеровских спектров и амплитуды сигнала. С 16:00 до 18:00 их вариации были квазипериодическими с  $T \approx 30 - 40$  мин и  $f_{Da} \approx 0.15$  Гц.

2 и 3 сентября 2019 г. поведение  $f_D(t)$  и  $A(t)$  соответствовало спокойной ионосфере.

Проанализируем эффекты на радиотрассе Shijiazhuang – Harbin. Радиостанция, излучающая на частоте 9500 кГц, дислоцирована на территории Китая. При этом  $R \approx 1310$  км.

29 и 30 августа 2019 г. поведение доплеровских спектров и амплитуд сигнала было подобным. Заметных возмущений в состоянии ионосферы не наблюдалось (рис. 26).

31 августа 2019 г. доплеровские спектры были скорее одномодовыми. Имели место значительные (от  $-1$  до 0.8 Гц) вариации  $f_D(t)$ . Отмечались квазипериодические изменения  $f_D(t)$  с  $T \approx 30$  мин и  $f_{Da} \approx 0.3 - 0.5$  Гц. С 17:00 до 20:25  $A(t) \approx 0$  дБ.

1 сентября 2019 г. амплитуда сигнала была на уровне шумов в интервалах времени 09:10–11:50 и 17:00–21:40. В остальные моменты времени  $f_D(t) \approx 0$  Гц.

Поведение доплеровских спектров и амплитуд сигнала 2 и 3 сентября 2019 г. было типичным для невозмущенной ионосферы. Поскольку  $f_D(t) \approx 0$  Гц в течение всего времени наблюдения, радиоволна, по-видимому, отражалась от слоя  $E_s$ , экранировавшего область F ионосферы.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе Hohhot – Harbin. Радиопередающее устройство, работающее на частоте 9520 кГц, территориально расположено в Китае. При этом  $R \approx 1340$  км. Обычно с 16:00 до 21:40 радиостанция не излучает.

29 августа 2019 г. существенные вариации доплеровских спектров,  $f_D(t)$  и  $A(t)$  наблюдались при прохождении через ионосферу солнечного терминатора (рис. 27).

30 августа 2019 г. значительные вариации доплеровских спектров отмечались с 14:00 до 16:00.

31 августа 2019 г. в интервале времени 11:00–13:30 имели место значительные (от  $-0.7$  до  $0.7$  Гц) вариации  $f_D(t)$ . При этом  $T \approx 24$  мин, а  $f_{Da} \approx 0.1 - 0.5$  Гц.

1 сентября 2019 г. почти все время  $f_D(t) \approx 0$  Гц. С 08:00 до 16:00 наблюдались значительные (20 – 40 дБ) вариации  $A(t)$ .

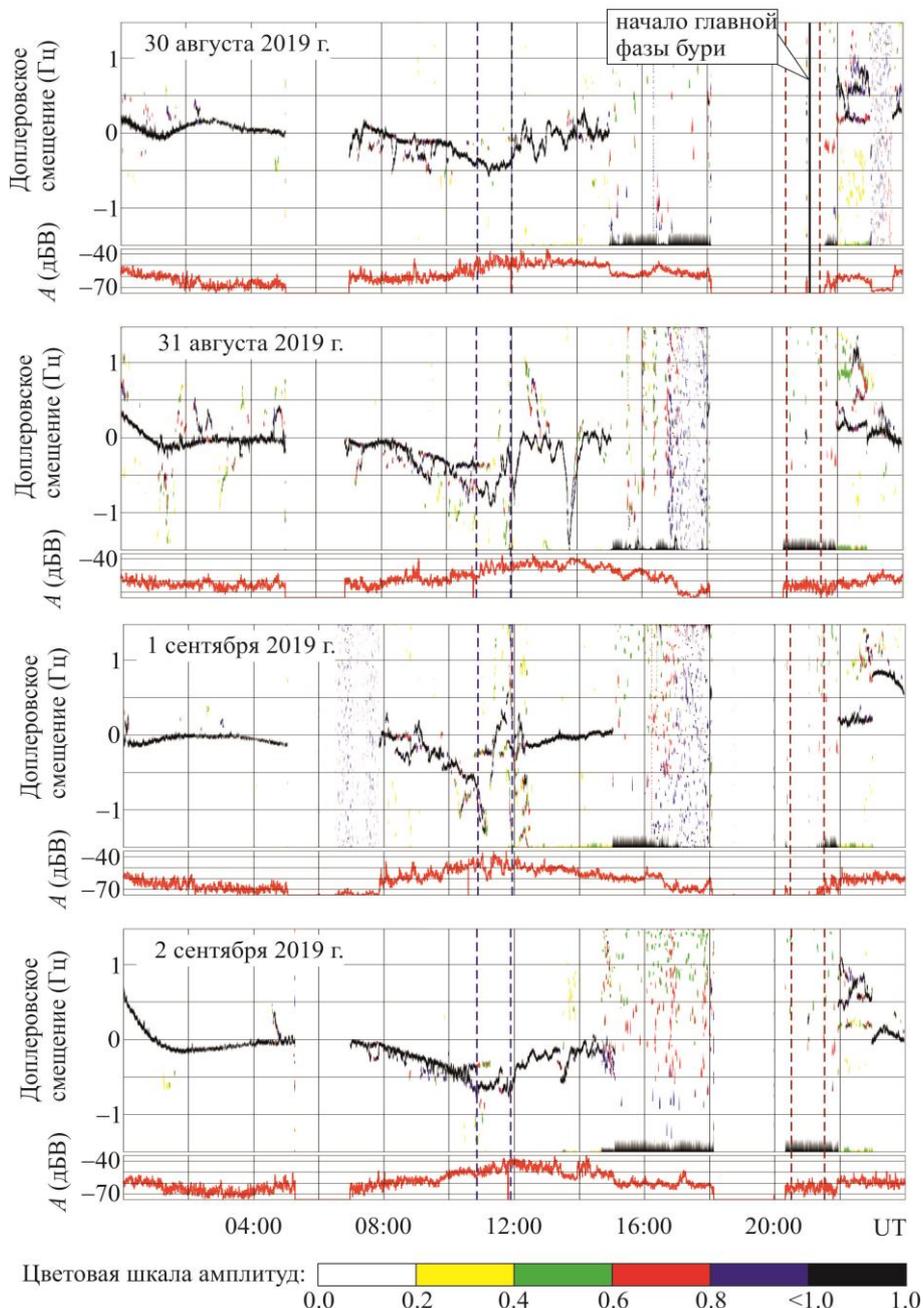
2 и 3 сентября 2019 г. существенные возмущения в ионосфере не отмечались.

Опишем эффекты на радиотрассе Yamata – Harbin. Радиопередающее устрой

ство, функционирующее на частоте 9750 кГц, находится в Японии. При этом  $R \approx 1570$  км. Излучение обычно отсутствует с 16:00 до 22:00.

29 – 31 августа 2019 г. днем (по местному времени) обычно  $f_D(t)$  флуктуирует возле 0 Гц (рис. 28). При этом  $T \approx 20 - 30$  мин, а  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. С 10:00 до 14:00 доплеровские спектры значительно уширились. Поведение  $f_D(t)$  было хаотическим.

Радиотрасса Ulaanbaatar – Harbin (7260 кГц)



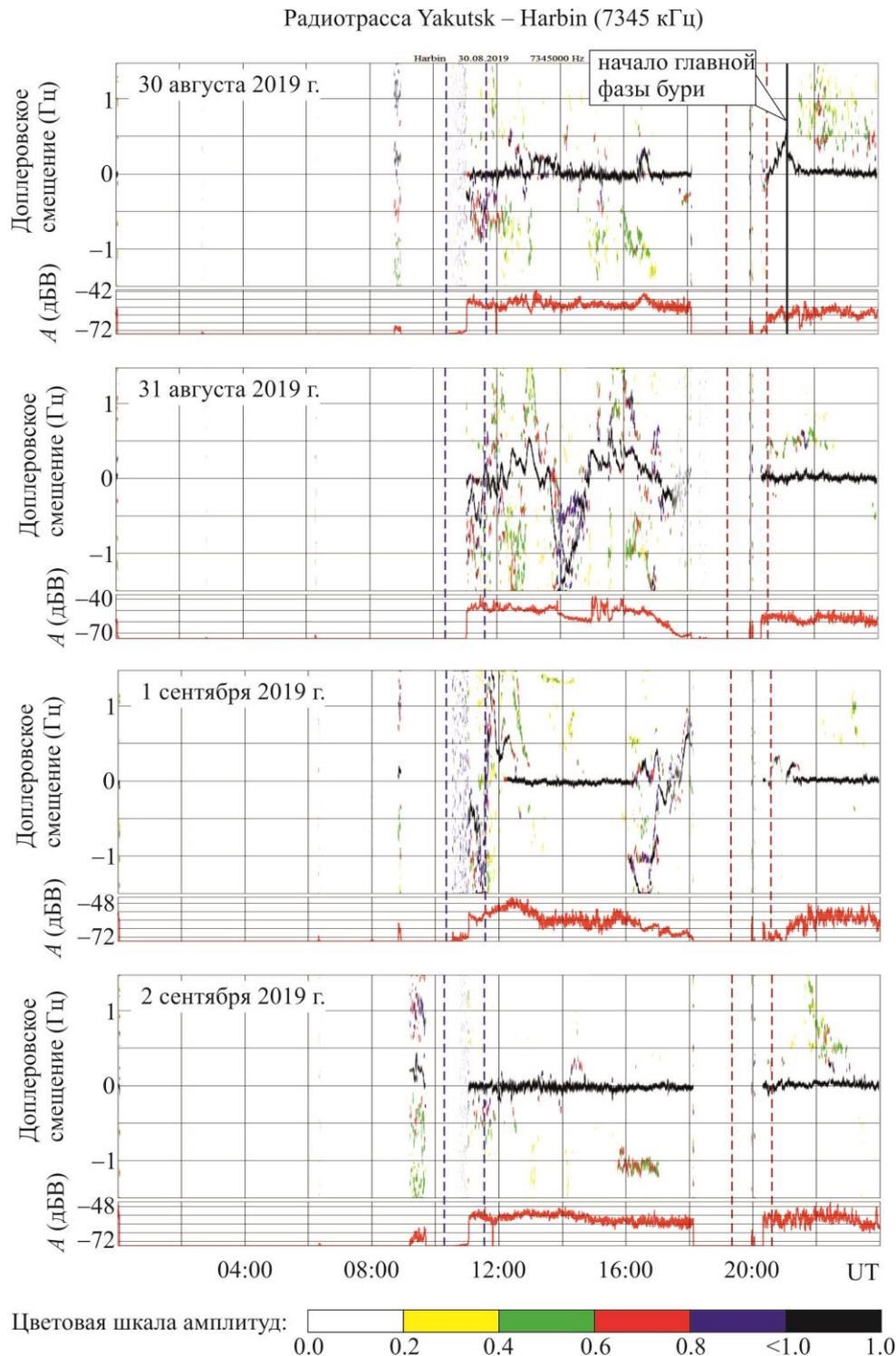
**Рисунок 24** – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Ulaanbaatar/Khonkhor – Harbin (7260 кГц).

30 августа 2019 г. с 12:00 до 16:00 вариации  $A(t)$  были близки к квазипериодическим. При этом  $T \approx 30$  мин, а размах составлял 10 – 15 дБ.

31 августа 2019 г. с 12:00 до 16:00 значительно (от  $-0.4$  до  $0.8$  Гц) увеличились

вариации  $f_D(t)$ . Флуктуации  $A(t)$  при этом были небольшими (в пределах 10 – 15 дБ).

1 сентября 2019 г. в течение времени 08:00 – 13:00 размах вариаций  $f_D(t)$  составлял от  $-0.5$  до 1 Гц. При этом резко изменялась и амплитуда сигнала (на 40 – 60 дБ).



**Рисунок 25** – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Yakutsk – Harbin (7345 кГц).

2 и 3 сентября 2019 г. поведение  $f_D(t)$  и  $A(t)$  мало чем отличалось от их поведения в спокойные дни.

Проанализируем эффекты на радиотрассе Beijing – Harbin. Радиостанция, излучающая менее половины суток на частоте 9830 кГц, находится на территории Китая. При этом  $R \approx 1050$  км.

29 и 30 августа, а также 2 и 3 сентября 2019 г. существенные вариации доплеровских спектров отсутствовали (рис. 29). Их вариации наблюдались 31 августа 2019 г. с 11:00 до 16:00 и 1 сентября 2019 г. с 10:00 до 12:30.

Радиотрасса Shijiazhuang – Harbin (9500 кГц)

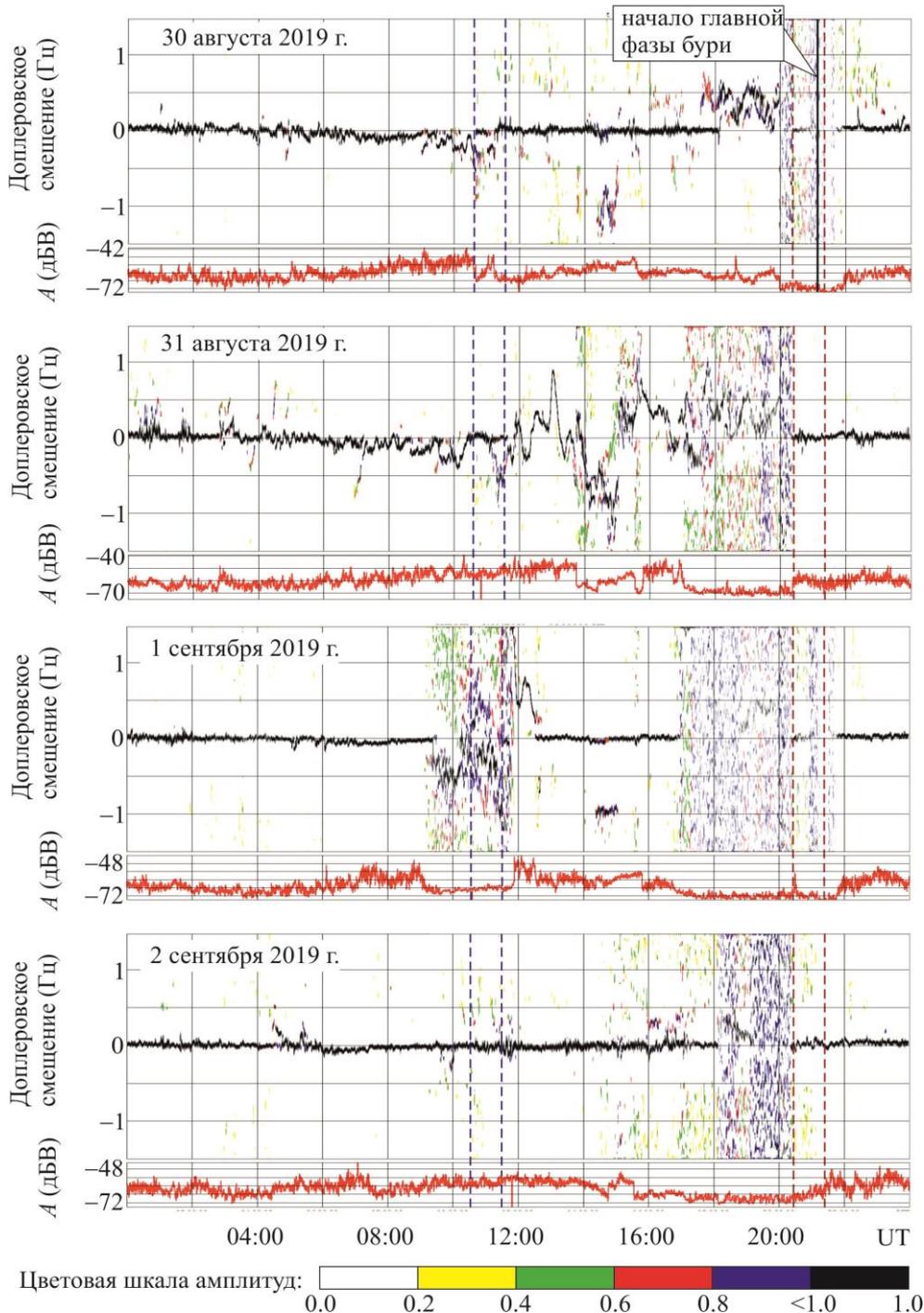


Рисунок 26 – То же, что на рис.19, для радиотрассы Shijiazhuang – Harbin (9500 кГц).

30 и 31 августа, а также 1 сентября 2019 г. регистрировались значительные

(до 30 дБ) вариации амплитуды сигнала. Отраженный сигнал отсутствовал с 14:00 до

18:00 31 августа 2019 г. и с 09:00 до 12:10 1 сентября 2019 г.

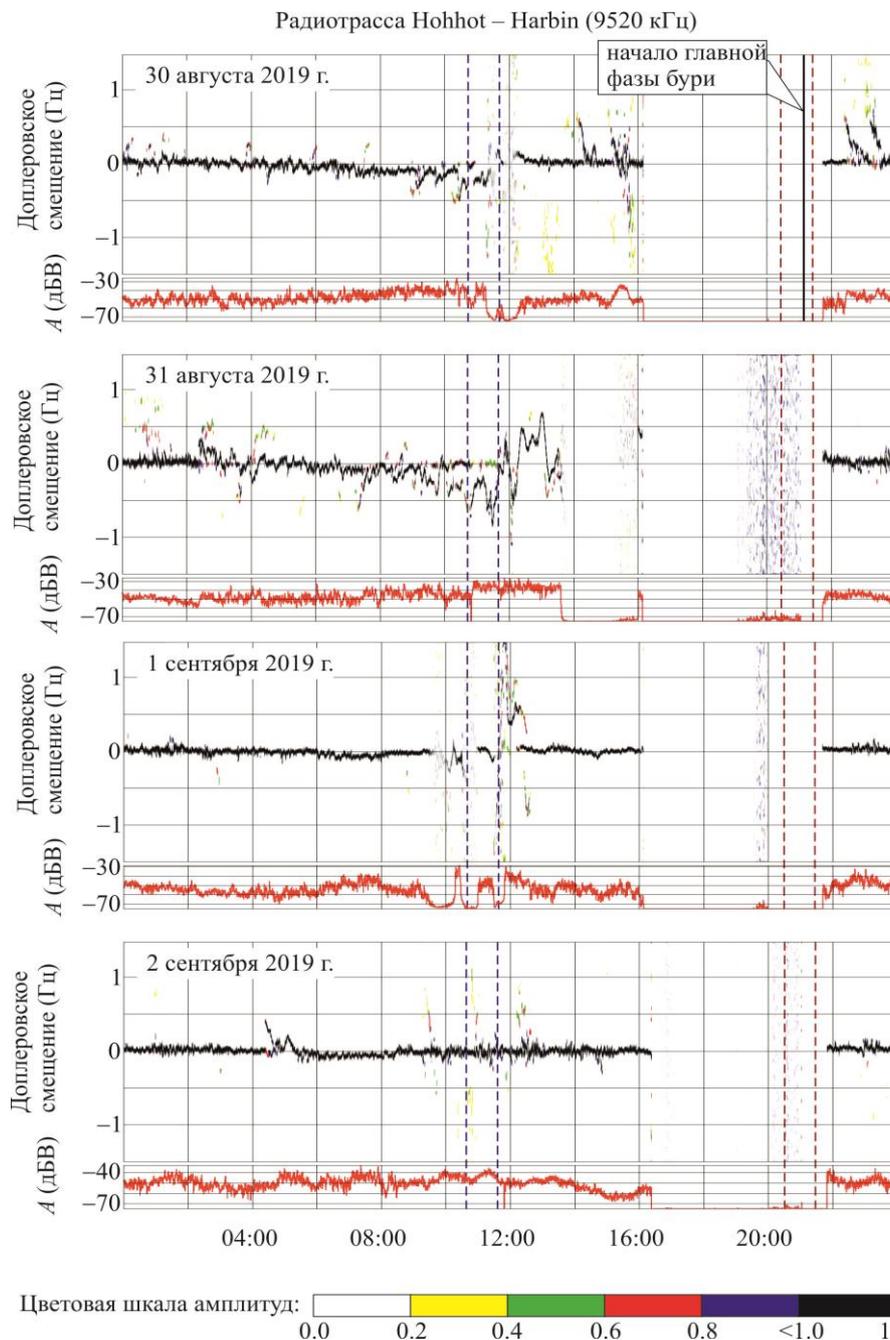
**Обсуждение**

Силу геокосмической бури удобно оценивать по величине энергии в единицу времени (функции Акасофу), поступающей в магнитосферу от солнечного ветра. Воспользуемся индексом, введенным в работе [11, 12]:

$$G_{st} = 10 \lg \frac{\epsilon_A}{\epsilon_{Amin}},$$

где  $\epsilon_{Amin} = 10$  ГДж/с. Тогда при  $\epsilon_{Amax} \approx 15$  ГДж/с имеем  $G_{st} \approx 1.8$ . Согласно классификации [11, 12] эта буря относится к слабым (Minor). При длительности геокосмической бури  $\Delta t \approx 10^5$  с имеем энергию  $E_{st} \approx 1.5 \cdot 10^{15}$  Дж. Такие бури относятся к типу GSSII (GSSI – Geospace Storm Index) [11, 12].

Обсудим вначале эффекты геомагнитного поля. Эффекты в геомагнитном поле начали проявляться после 12:00 30 августа



**Рисунок 27** – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Hohhot – Harbin (9520 кГц).

2019 г. Существенные возмущения геомагнитного поля имели место в течение главной фазы магнитной бури, т.е. 31 августа и 1 сентября 2019 г. Фаза восстановления длилась с 00:00 2 сентября 2019 г. в течение 2 – 3 суток.

Оценим энергию  $E$  и мощность  $P$  магнитной бури, исходя из соотношения [13]:

$$E_{ms} = \frac{3}{2} E_m \left| \frac{D_{st}^*}{B_0} \right|,$$

где  $B_0 \approx 3 \cdot 10^{-5}$  Тл – значение индукции магнитного поля на экваторе,  $E_m \approx 8 \cdot 10^{17}$  Дж

– энергия дипольного магнитного поля Земли. Скорректированное значение

$$D_{st}^* = D_{st} - b p_{sw}^{1/2} + c.$$

Здесь  $b = 5 \cdot 10^5$  нТл/(Дж·м<sup>-3</sup>)<sup>1/2</sup>,  $c = 20$  нТл,  $p_{sw} = n_p m_p V_{sw}^2$ ,  $n_p$  и  $m_p$  – концентрация и масса протонов,  $V_{sw}$  – скорость солнечного ветра. При  $p_{swmax} \approx 3$  нПа,  $D_{stmin} \approx -55$  нТл имеем  $D_{st}^* = -62$  нТл,  $E_{ms} = 1.5$  ПДж. При длительности бури около  $1.7 \cdot 10^5$  с имеем мощность  $P_{ms} \approx 9$  ГВт. По классификации

Радиотрасса Yamata – Harbin (9750 кГц)

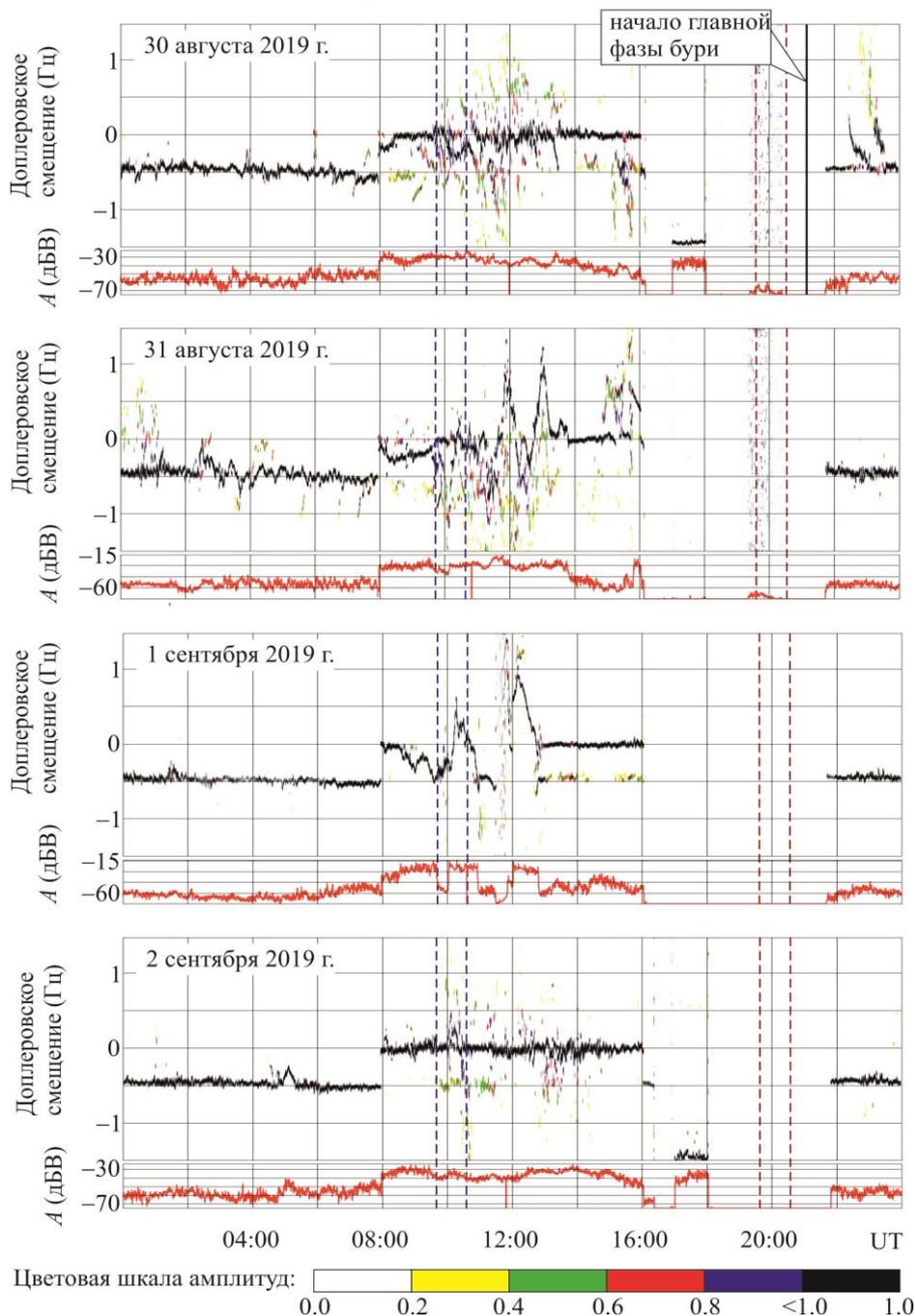


Рисунок 28 – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Yamata – Harbin (9750 кГц).

NOAA Space Weather Scale [http://www.sec.noaa.gov] эта буря относится к умеренным.

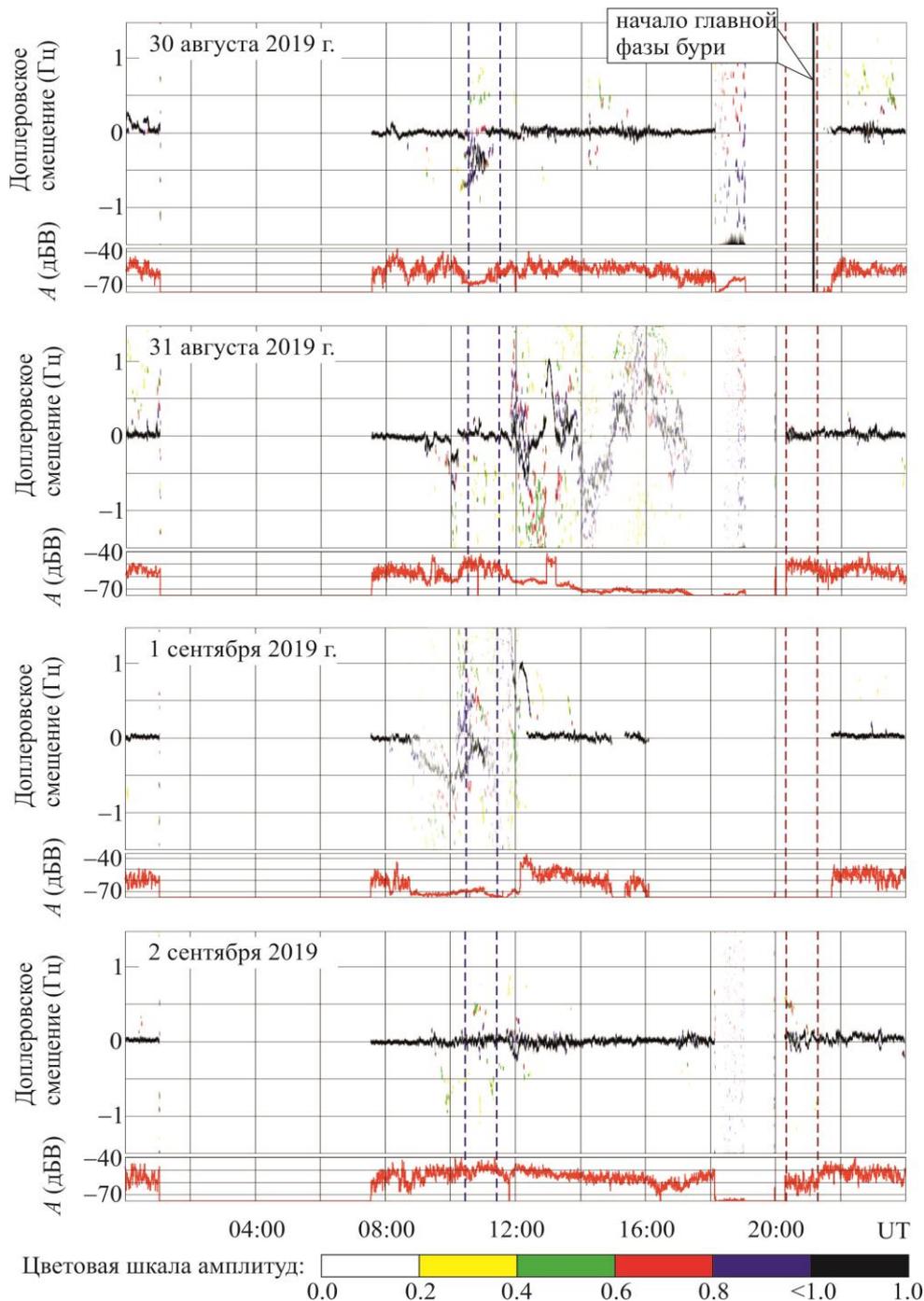
Согласно классификации [14] магнитные бури с  $K_p = 5.0 - 5.9$  также относятся к умеренным. Для них энергия  $E_{ms} \approx (1 - 5) \cdot 10^{15}$  Дж и мощность  $P_{ms} \approx (6 - 22) \cdot 10^{10}$  Вт.

Далее обсудим эффекты во флуктуациях геомагнитного поля. Временные зависимости уровня флуктуаций

горизонтальных компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов 100 – 1000 с подвергались системному спектральному анализу в диапазоне периодов 100 – 1000 с.

Результаты спектрального анализа для суток 29 августа 2019 г., которые можно рассматривать как контрольные, приведены на рис. 30. Уровень H- и D-компонент не превышал 2 – 3 нТл. В спектре преобладали колебания с периодом 600 – 900 с.

Радиотрасса Beijing – Harbin (9830 кГц)



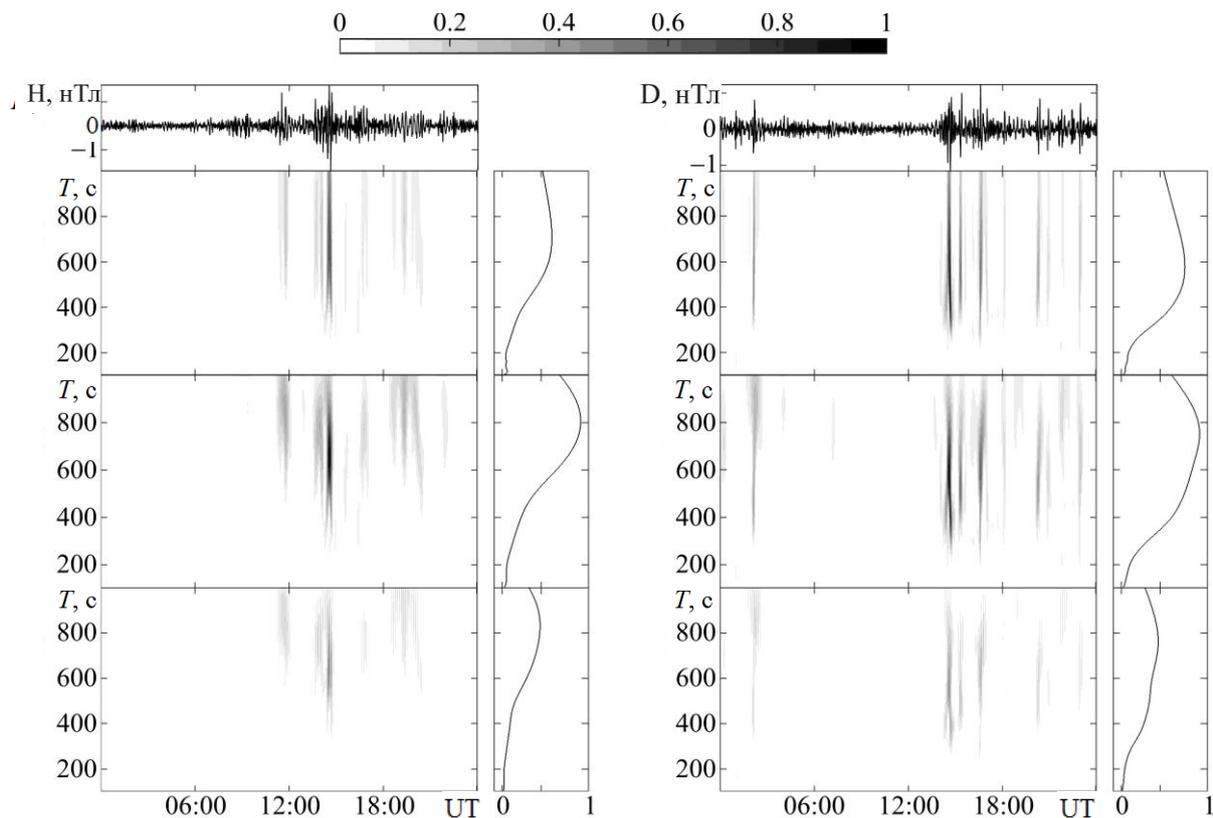
**Рисунок 29** – То же, что на рис. 19, для радиотрассы Beijing – Harbin (9830 кГц).

31 августа 2019 г., в день главной фазы магнитной бури, значения Н- и D-компонент достигали 5 – 10 нТл (рис. 31). В спектре преобладали периоды 300 – 400, 700 – 900 с и 400 – 600, 700 – 900 с для Н- и D-компонент соответственно.

1 сентября 2019 г. уровень компонент был примерно таким же, как и 31 августа 2019 г. Основными были колебания с периодом 800 – 1000 с для обеих компонент.

Перейдём к обсуждению эффектов ионосферной бури. Начнём с обсуждения возмущений параметров ионограмм. Вариации параметров ионограмм на японском и российском ионозондах схожи между собой. Это свидетельствует о глобальности изучаемой ионосферной бури.

Перечислим основные эффекты, связанные с ионосферной бурей.

**Рисунок 30** – Результаты ССА вариаций Н- и D-компонент геомагнитного поля за 29 августа 2019 г., зарегистрированные в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина.

- Увеличение  $f_{\min}$  от 1.4 до 2.2 – 2.4 МГц с 07:30 до 08:30 31 августа 2019 г.
- Увеличение  $f_oE_s$  от 3 до 6 – 7 МГц с 05:00 до 08:00 31 августа 2019 г.
- Уменьшение  $f_oF_2$  на 0.7 – 1.1 МГц 31 августа 2019 г. по сравнению с  $f_oF_2$  29 августа 2019 г.

- Уменьшение  $f_oF_2$  на 0.2 – 0.6 МГц 1 сентября 2019 г. по сравнению с  $f_oF_2$  2 сентября 2019 г.
- Увеличение  $h'E$  от 102 до 113 км с 10:00 до 13:00 31 августа 2019 г.
- Увеличение  $h'E$  от 110 до 133 км примерно в 12:30 1 сентября 2019 г.
- Увеличение  $h'E_s$  от 105 до 130 км с 10:00 до 13:00 31 августа 2019 г.

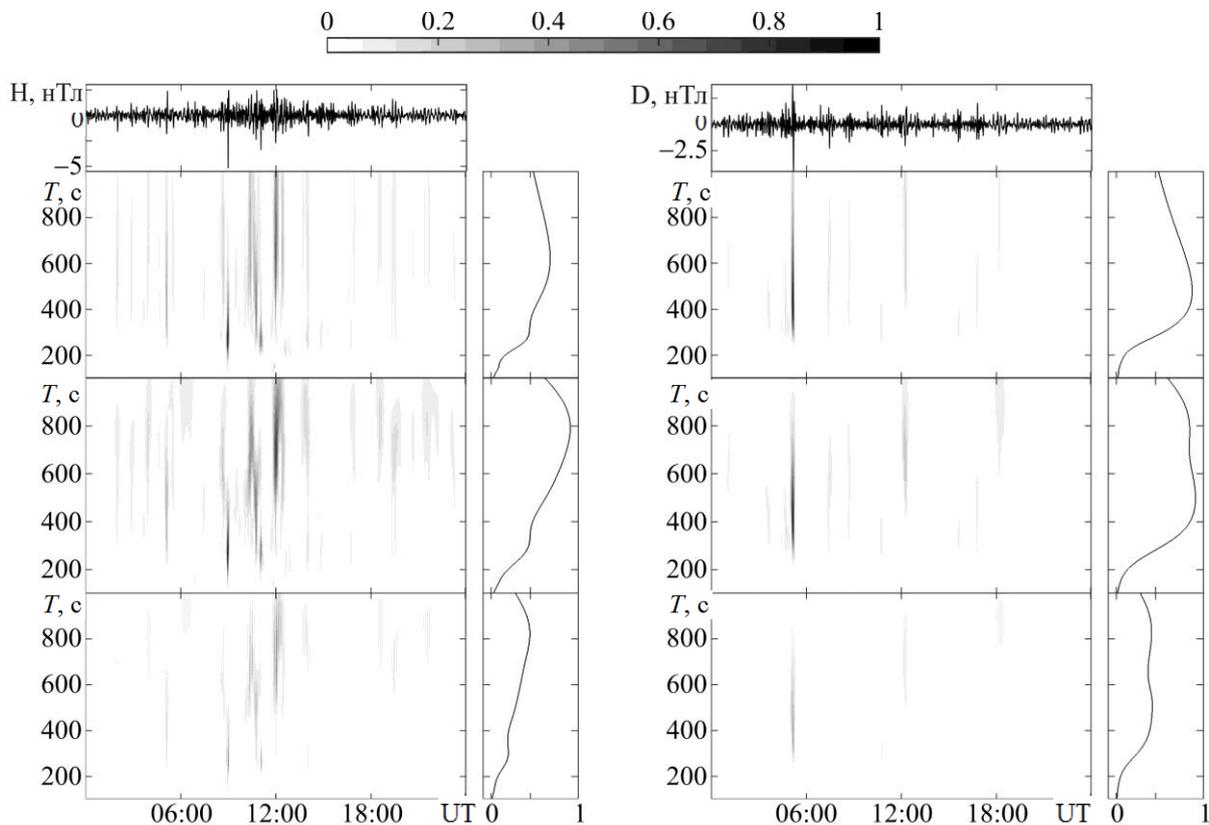
- Увеличение  $h'E_s$  от 110 до 125 – 132 км с 08:00 до 14:00 1 сентября 2019 г.
- Резкие всплески  $h'F_2$  от 250 до 400 – 450 км с 13:30 до 14:30 и с 16:00 до 16:30 31 августа 2019 г.
- Увеличение  $h'F_2$  от 250 – 300 до 400 – 500 км в ночь с 31 августа 2019 г. на 1 сентября 2019 г., а также с 16:00 до 18:00 1 сентября 2019 г.

Анализ параметров ионограмм позволяет утверждать, что ионосферная буря имела место в основном 31 августа 2019 г. и 1 сентября 2019 г. Ее продолжительность

практически совпала с продолжительностью главной фазы магнитной бури.

По своему характеру ионосферная буря была отрицательной, так как значения  $f_oF_2$  31 августа 2019 г. были на 0.7 – 1.1 МГц меньше, чем значения  $f_oF_2$  29 августа 2019 г. (в контрольный день). Кроме того, значения  $f_oF_{20}$  1 сентября 2019 г. были на 0.2 – 0.6 МГц меньше, чем значения  $f_oF_{20}$  2 сентября 2019 г. (в контрольный день).

Оценим уменьшение концентрации электронов  $N$  в день ионосферной бури по сравнению с этим же параметром  $N_0$  в контрольный день, исходя из следующего соотношения:



**Рисунок 31** – Результаты ССА вариаций H- и D-компонент геомагнитного поля за 31 августа 2019 г., зарегистрированные в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина.

$$\frac{N_0}{N} = \left( \frac{f_{oF20}}{f_{oF2}} \right)^2.$$

В утреннее, дневное и вечернее время 31 августа 2019 г. отношение  $N_0/N$  составляло 1.8 – 2, 1.4 и 2.4 соответственно. В утреннее и дневное время 1 сентября

2019 г. это отношение было близко к 1.56 и 1.16 соответственно.

Зная  $N_0/N$ , можно вычислить индекс отрицательной ионосферной бури [11, 12]:

$$I_{NIS} = 10 \lg \frac{N_0}{N_{\min}}, \text{ дБ.}$$

Для данной бури ( $N_0/N_{\min}$ )  $\approx 2.4$ , а  $I_{NIS} \approx 3.8$  дБ. Такая ионосферная буря типа NIS3 (NIS – Negative Ionospheric Storm), согласно классификации [11, 12], относится к сильным (Strong).

Добавим, что геокосмическая буря проявилась не только в F-области ионосферы, но и в E-области и слое E<sub>s</sub>.

Обсудим далее вариации высоты отражения радиоволн. Как видно из данных ионозонда (см. рис. 18), в определенные интервалы времени действующие высоты  $h'_E$ ,  $h'_{Es}$  и  $h'_{F2}$  резко увеличивались. Это свидетельствовало о значительных изменениях в профиле  $N(h)$ . Вариации  $N(h)$  приводили к резким изменениям доплеровского смещения частоты  $f_D(t)$ . 31 августа 2019 г. около 14:00 практически на всех радиотрассах наблюдалось резкое уменьшение  $f_D$  от 0 до  $-(1 - 1.5)$  Гц, а затем увеличение от минимального значения до 0 Гц. Продолжительность этого эффекта составляла для разных трасс от 50 до 60 мин. Резкое уменьшение  $f_D(t)$ , а затем его увеличение до исходного значения свидетельствовало о подъеме высоты отражения радиоволн. Высоту подъема можно оценить из соотношения (15).

Оценки по соотношению (15), например, для радиотрассы Lintong/Pucheng – Harbin при  $\Delta f_{Dm} \approx -1$  Гц и  $\Delta T = 60$  мин дают, что  $\Delta z_r \approx 110$  км, т.е. высота отражения радиоволны увеличилась в ночное время от  $\sim 150$  до  $\sim 260$  км.

Для радиотрассы Hwaseong – Harbin при  $\Delta f_{Dm} \approx -1$  Гц и  $\Delta T \approx 60$  мин получаем, что высота отражения радиоволны сместилась со 150 до 300 – 310 км.

Такого же порядка были высоты отражения радиоволн и на других радиотрассах. Данный эффект также относится к проявлениям ионосферной бури.

Перейдем к обсуждению эффектов волновых возмущений. Ионосферная буря сопровождалась генерацией квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты. Практически на всех радиотрассах с 12:00 до 17:00 31 августа 2019 г. имели место квазипериодические вариации  $f_D(t)$  с

периодом  $T \approx 30$  мин и амплитудой  $f_{Da} \approx 0.4 - 0.6$  Гц. Зная  $f_{Da}$ , можно оценить амплитуду относительных вариаций концентрации электронов, используя соотношение (19).

Оценки по соотношению (19), например, для радиотрассы Hwaseong – Harbin при  $z_r \approx 150$  км,  $f_{Da} = 0.4$  Гц,  $T = 30$  мин и  $L \approx 30$  км дают  $\delta_{Na} \approx 42\%$ .

На радиотрассе Goyang – Harbin в интервале времени 17:30 – 20:00 наблюдались колебания с  $T \approx 15$  мин и  $f_{Da} \approx 0.1$  Гц. При  $z_r \approx 200$  км и  $L \approx 80$  км имеем  $\delta_{Na} \approx 6\%$ .

Значения периодов  $\sim 15 - 60$  мин и амплитуды  $\delta_{Na}$  свидетельствуют о том, что квазипериодические вариации  $f_D(t)$  и  $N(t)$  вызываются атмосферными гравитационными волнами (АГВ). Хорошо известно, что в течение геокосмических бурь АГВ генерируются в области полярного овала и распространяются к низким широтам.

Таким образом, генерация перемещающихся ионосферных возмущений, произведенных АГВ, также относится к проявлениям геокосмических бурь.

Подводя итог, можно констатировать, что многочастотный многотрассовый программно-аппаратный комплекс наклонного зондирования ионосферы Харбинского инженерного университета является эффективным средством для исследования быстропротекающих динамических процессов в ионосфере, а также ионосферного канала распространения радиоволн.

Перечислим основные результаты исследования эффектов геокосмической бури 30 августа – 2 сентября 2019 г.

1. Оценены энергия и мощность геокосмической бури ( $1.5 \cdot 10^{15}$  Дж и  $1.5 \cdot 10^{10}$  Вт). Данная буря относится к слабым.

2. Оценены энергия и мощность магнитной бури ( $1.5 \cdot 10^{15}$  Дж и  $9 \cdot 10^9$  Вт). Данная буря относится к умеренным. Особенностью бури было то, что ее главная фаза продолжалась до двух суток.

Длительной была и фаза восстановления (не менее двух суток).

3. В течение 31 августа 2019 г. и 1 сентября 2019 г. вариации Н- и D-компонент геомагнитного поля достигали 60 – 70 нТл. Вариации Z-компоненты не превышали 20 нТл.

4. 31 августа 2019 г. и 1 сентября 2019 г. уровень флуктуаций геомагнитного поля в диапазоне периодов 1 – 1000 с увеличился от 0.2 – 0.3 нТл до 2 – 4 нТл. Наибольшую энергию имели колебания с периодом от 300 – 400 с до 700 – 900 с.

5. Геокосмическая буря сопровождалась от умеренной до сильной отрицательной ионосферной бурей. В течение 31 августа – 1 сентября 2019 г. концентрация электронов в F-области ионосферы по сравнению с контрольными сутками уменьшилась в 1.4 – 2.4 раза.

6. Геокосмическая буря привела к заметным возмущениям и в E-области ионосферы, а также слое E<sub>s</sub>.

7. В процессе ионосферной бури высота отражения радиоволн могла резко увеличиваться от ~150 до ~300 – 310 км.

8. Геокосмическая буря сопровождалась генерацией АГВ, модулирующих концентрацию электронов в ионосфере. Амплитуда относительных возмущения концентрации электронов могла достигать ~42% (для периода ~30 мин). Для периода ~15 мин она не превышала 6%.

### Основные результаты

1. При помощи многочастотного многотрассового радиотехнического комплекса наклонного зондирования ионосферы с привлечением данных магнитометров и ионозондов, а также сведений о космической погоде проанализированы особенности наиболее интересных ионосферных бурь, имевших место в 2018–2019 гг.

2. Подтверждено, что каждая ионосферная буря по-своему уникальна. Наряду с общими закономерностями имеют место индивидуальные особенности бури. Буря может быть однофазной (положительной или отрицательной), а также многофазной с

чередованием положительных и отрицательных бурь.

3. Для количественной характеристики геокосмических, магнитных и ионосферных бурь рекомендуется вычислять их энергетику и предложенные автором соответствующие индексы.

4. Во время ионосферных бурь концентрация электронов в F-области ионосферы изменялась в разы. Такие бури по классификации автора относятся к сильным. При этом область отражения наклонно падающих на ионосферу радиоволн декаметрового диапазона изменялась на 50–180 км. Изменения концентрации электронов в E-области были меньшими или вообще отсутствовали.

5. Ионосферные бури сопровождалась генерацией или усилением волновой активности в ионосфере в диапазоне атмосферных гравитационных и инфразвуковых волн. Относительная амплитуда квазипериодических вариаций концентрации электронов для этих волн достигала десятков процентов и не превышала 1% соответственно.

6. Ионосферные бури приводили к усилению многолучёвости, уширению и даже «развалам» доплеровских спектров, значительным вариациям ДСЧ и амплитуды сигнала.

7. Ионосферные бури заметно повлияли на функционирование радиосистем различного назначения, работающих в диапазонах длин волн от метрических до сантиметровых радиоволн.

### Список литературы:

1. Черногор Л. Ф. Физические эффекты геокосмических бурь. 2 // 2022. (В печати).
2. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. М. Эффекты геокоsmічної бурі 5—6 серпня 2019 р. // Космічна наука і технологія. – 2021. – Т. 27, № 2 (129). – С. 45–69. <https://doi.org/10.15407/knit2021.02.045>
3. Rajesh P. K., Lin C. H., Lin C. Y., Chen C. H., Liu J. Y., Matsuo T., Chen S. P., Yeh W. H., Huang C. Y. Extreme Positive Ionosphere Storm Triggered by a Minor Magnetic Storm in Deep Solar Minimum

Revealed by FORMOSAT-7/COSMIC-2 and GNSS Observations // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2021. – Vol. 126, № 2. – Paper № e2020JA028261.

<https://doi.org/10.1029/2020JA028261>

4. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Поднос В. А., Тырнов О. Ф. Радиофизическая обсерватория Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина – средство для мониторинга ионосферы в космических экспериментах // Космический проект «Ионосат-Микро». – К.: Академперіодика, 2013. – С. 160–182.

5. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Luo Y., Rozumenko V. T., Zheng Y. Ionospheric storm effects over the People's Republic of China on 14 May 2019: Results from multipath multi-frequency oblique radio sounding // Advances in Space Research. – 2020. – Vol. 66, Is. 2. – Pp. 226–242.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.037>

6. Moro J., Xu J., Denardini C. M., Resende L. C. A., Neto P. F. B., Da Silva L. A., Silva R. P., Chen S. S., Picanço G. A. S., Carmo C. S., Liu Z., Yan C., Wang C., Schuch N. J. First Look at a Geomagnetic Storm With Santa Maria Digisonde Data: F Region Responses and Comparisons Over the American Sector // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2021. – Vol. 126, № 1. – Paper no. e2020JA028663.

<https://doi.org/10.1029/2020JA028663>

7. Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Zheng Y. Effects of the Strong Ionospheric Storm of August 26, 2018: Results of Multipath Radiophysical Monitoring // Geomagnetism and Aeronomy. – 2021. – Vol. 61, No. 1. – Pp. 73–91. <https://doi.org/10.1134/S001679322006002X>

8. Luo Y., Chernogor L. F., Garmash K. P., Guo Q., Rozumenko V. T., Zheng Yu. Dynamic processes in the magnetic field and in the ionosphere during the 30 August – 2 September, 2019 geospace storm // Annales Geophysicae. – 2021. – Vol. 39, is. 4. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-657-2021>

9. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Zheng Yu. Эффекты сильной ионосферной бури 26 августа 2018 г.: результаты многотрассового радиофизического мониторинга //

Геоматнезизм и аэрономия. – 2021. – Т. 61, №1. – С. 66–84.

10. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов // Геоматнезизм и аэрономия. – 2008. – Т. 48, № 5. – С. 681 – 702.

11. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. Физика геокосмических бурь: Монография. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины. – 2014. – 408 с.

12. Черногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур // Космічна наука і технологія. – 2021. – Т. 27, № 1 (128). – С. 3—77.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.01.003>

13. Gonzalez W. D., Jozelyn J. A., Kamide Y., Kroehl H. W. What is a geomagnetic storm? // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 1994. – Vol. 99, № A4. – P. 5771–5792.

<https://doi.org/10.1029/93JA02867>

14. NOAA Space Weather Scales <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>

**Принято в печать 14.11.2022**

