

ЭФФЕКТЫ СИЛЬНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ БУРИ 26 АВГУСТА 2018 г.: РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОТРАССОВОГО РАДИОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

© 2021 г. Л. Ф. Черногор¹, *, К. П. Гармаш¹, Qiang Guo², **, Yu Zheng³, ***

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

²Харбинский инженерный университет, г. Харбин, Китай

³Университет Циндао, г. Циндао, Китай

*e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

**e-mail: guoqiang@hrbeu.edu.cn

***e-mail: zhengyu@qdu.edu.cn

Поступила в редакцию 14.01.2019 г.

После доработки 10.01.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Приведено краткое описание многотрассового когерентного радиотехнического комплекса, предназначенного для непрерывного мониторинга динамических процессов в ионосфере, вызванных вариациями космической погоды и воздействием высокоэнергетических источников в системе Земля–атмосфера–ионосфера–магнитосфера. Описаны вариации характеристик радиоволн (доплеровских спектров и амплитуд сигналов) ВЧ-диапазона и параметров ионосферы над Китаем в течение ионосферной бури, которая имела место 26 августа 2018 г. В течение бури на всех трассах неоднократно наблюдался подъем на ~50–100 км области отражения радиоволн, а также ее колебания с амплитудой ~30–40 км. За подъемами следовали опускания области отражения радиоволн на многие десятки километров. Подъемы и опускания области отражения были вызваны уменьшением концентрации электронов в 1.5–2 раза и ее увеличением в несколько раз соответственно. Максимальное увеличение концентрации электронов в E -области ионосферы достигало 1.5, а в F -области – 3. Относительная амплитуда колебаний концентрации электронов достигала многих десятков процентов. В контрольные дни амплитуда колебаний доплеровского смещения частоты была в несколько раз меньше. Наблюдаемые колебания доплеровского смещения частоты, по-видимому, были вызваны генерацией атмосферных гравитационных волн и последующим их распространением к широтам, где располагались средства наблюдения. Скорость волновых возмущений была ~275–480 м/с, а их период был ~60 мин 27 августа 2018 г., несмотря на повторную магнитную бурю, ионосферные возмущения были незначительными.

DOI: 10.31857/S0016794020060024

1. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферная буря – одна из составляющих геокосмической бури. Часто, но не всегда, ионосферная буря сопровождается магнитной бурей, значительными возмущениями параметров нейтральной атмосферы (атмосферной бурей) и электрического поля атмосферного, ионосферного и магнитосферного происхождения (электрической бурей) [Черногор и Домнин, 2014].

Ионосферным бурям посвящено большое количество работ (см., например, [Данилов и Морозова, 1985; Buonsanto, 1999; Prölss, 1995, 1999; Rees, 1995; Schunk and Sojka, 1996; Bradley et al., 1997; Danilov and Laštovička, 2001; Григоренко и др., 2003, 2005а, б, 2007а, б, в; Панасенко и Черногор, 2005; Bothmer and Daglis, 2006; Chernogor et al.,

2007; Vijaya Lekshmi et al., 2007, 2011; Mikhailov et al., 2007; Гуляева, 2008; Данилов, 2013]). Бури сильнее всего проявляются в высоких широтах, меньше – в средних широтах, но эффекты бурь наблюдаются даже в низких широтах. Различают положительные и отрицательные ионосферные бури (см., например, [Данилов и Морозова, 1985; Брюнелли и Намгаладзе, 1988]).

Во время положительных ионосферных бурь концентрация электронов N в F -области ионосферы может увеличиваться в несколько раз, во время отрицательных ионосферных бурь, напротив, N в F -области ионосферы может уменьшаться в 10 и более раз. Кроме N , в ионосфере изменяются температуры электронов и ионов, скорость движения плазмы, напряженность электрического

поля и т.д. [Chernogor et al., 2007; Григоренко и др., 2003, 2005а, б, 2007а, б, в].

E-область ионосферы подвержена возмущениям в меньшей степени, чем *F*-область ионосферы.

Сильно подвержена возмущениям *D*-область ионосферы. Во время как положительных, так и отрицательных бурь, значения *N* в *D*-области ионосферы за счет высыпания из магнитосферы высокоэнергичных частиц могут увеличиваться на 3–4 порядка.

Ионосферные бури сопровождаются генерацией волновых возмущений в атмосфере, ионосфере и геомагнитном поле в широком диапазоне периодов.

Во время бурь активизируется взаимодействие в системе Солнце–межпланетная среда–магнитосфера–ионосфера–атмосфера–Земля (СМСМИАЗ) [Черногор и Домнин, 2014].

Добавим, что проявления ионосферных бурь отличаются большим разнообразием [Buonsanto, 1999; Данилов, 2013]. Эти проявления зависят не только от процессов на Солнце, географических координат места наблюдения, но и от времени года, времени суток, местного времени, предшествующего состояния ионосферы и т.п. [Черногор и Домнин, 2014]. Можно утверждать, что нет двух подобных ионосферных бурь. Естественно, что сильная магнитная буря сопровождается сильной ионосферной бурей, а слабая – слабой бурей. Удивительно, что сильная магнитная буря может сопровождаться слабой ионосферной бурей (или ее отсутствием) и наоборот [Григоренко и др., 2007б, в; Mikhailov et al., 2007; Гуляева, 2008, Черногор и Домнин, 2014]. Поэтому представляет значительный интерес детальное изучение каждой новой ионосферной бури, в том числе достаточно сильной.

Особенность этой работы заключается в том, что при помощи оригинального многотрассового радиотехнического комплекса изучены не только влияние бури на распространение ВЧ-радиоволн на многих трассах одновременно, но и индивидуальные проявления ионосферной бури.

Ионосферные бури существенно возмущают ионосферный радиоканал. Эти возмущения оказывают значительное воздействие на характеристики радиоволн почти всех диапазонов (от метрических до сантиметровых). Больше всего влиянию подвержены декаметровые (ВЧ) радиоволны. Во время отрицательных ионосферных бурь резко снижаются возможности ионосферного канала для ВЧ-радиоволн, поскольку радиоволны с частотой $f > 4–10$ МГц не способны отражаться от возмущенной ионосферы (меньшая частота относится к ночному времени, а большая – к дневному времени). Увеличение *N* в *D*-области ионосферы приводит к значительному росту по-

глощения радиоволн различных диапазонов [Черногор и Кацко, 2013]. Радиофизические эффекты ионосферных бурь в настоящее время изучены недостаточно [Благовещенский, 2013].

С другой стороны, исследование вариаций характеристик радиоволн ВЧ-диапазона во время ионосферных бурь позволяет судить о процессах в ионосфере, вызванных бурями. На этом основан радиофизический мониторинг динамических процессов в ионосфере.

Для изучения ионосферных бурь используются мировая сеть ионозондов [Reinisch and Galkin, 2011; Verhulst et al., 2017], радары некогерентного рассеяния [Galushko et al., 2003], GPS-технология [Афраймович и Перевалова, 2006; Гуляева, 2008; Ясюкевич и др., 2013], наклонное зондирование ионосферы (НЗИ) [Ivanov et al., 2003; Galushko et al., 2003, 2008; Pictrella et al., 2009; Mlynarczyk et al., 2012; Paznukhov et al., 2012; Shi et al., 2015; Laštovička and Chum, 2017] и другие средства. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Так, ионозонды размещены по земному шару крайне неравномерно, они дают информацию о динамике ионосферы лишь над местом дислокации, типичный темп зондирования составляет один раз в 15 мин. Радары некогерентного рассеяния находятся в основном в западном полушарии, по два радара имеется в Европе и Азии. Из-за высокой стоимости радаров и измерений с их помощью непрерывный мониторинг ионосферы вряд ли возможен. GPS-технологии имеют ограниченную информативность, приемные средства обычно расположены на суше.

От перечисленных недостатков в значительной степени свободен метод НЗИ. Он отличается высокой чувствительностью, простотой реализации, охватом значительных регионов (вплоть до глобального масштаба), возможностью непрерывного мониторинга и низкой стоимостью. При использовании мировой сети радиопередающих средств метод НЗИ не требует собственных радиопередающих устройств. В этом случае комплексы НЗИ не вносят свой вклад в весьма высокий уровень помех в используемом радиодиапазоне. В изучении радиофизических и геофизических эффектов ионосферной бури заключается актуальность темы исследований.

По указанным причинам непрерывный мониторинг характеристик радиоволн и параметров ионосферы в спокойных и возмущенных условиях при помощи метода НЗИ является актуальной радиофизической и геофизической задачей.

Цель настоящей работы – изложение результатов наблюдения при помощи когерентного многотрассового радиотехнического комплекса радиофизических и геофизических эффектов ионосферной бури, имевшей место 26 августа 2018 г.

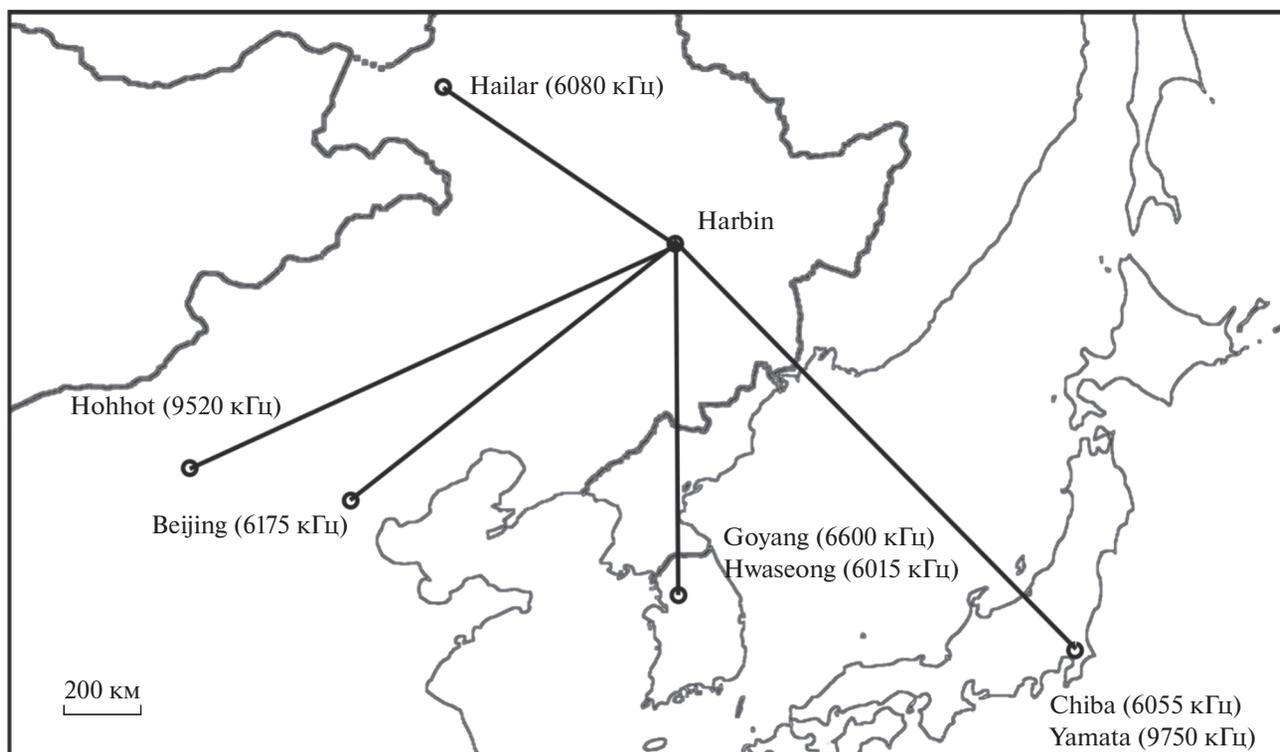


Рис. 1. Схематическое изображение радиотрасс, использованных для наблюдения за эффектами ионосферной бури.

2. СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ

В соответствии с Договором о научно-техническом сотрудничестве, заключенном Харьковским национальным университетом им. В.Н. Каразина (ХНУ) (Украина) и Харбинским инженерным университетом (ХИУ) (КНР) разработан, изготовлен и введен в строй в апреле 2018 г. когерентный многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс НЗИ, предназначенный для непрерывного радиофизического мониторинга динамических процессов в ионосфере, вызванных вариациями космической и атмосферной погоды, воздействием высокоэнергетических источников космического и земного происхождения, взаимодействием подсистем в системе СМСМИАЗ.

Комплекс расположен на территории ХИУ (г. Харбин, КНР). Его географические координаты: 45.78° N , 126.68° E .

Комплекс состоит из приемной активной антенны, работающей в диапазоне частот $f = 10 \text{ кГц} - 30 \text{ МГц}$, радиоприемного устройства SDR USRP № 210 LFRX LRTX и персонального компьютера. Комплекс использует оригинальное программное обеспечение.

В настоящее время комплекс работает в диапазоне частот $f \approx 5 - 10 \text{ МГц}$. Количество радиотрасс и их ориентация определяются кругом решаемых

задач. Для исследования эффектов ионосферной бури использовались 7 из 9 радиотрасс, схематически изображенных на рис. 1. Основные сведения об этих трассах приведены в табл. 1.

3. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Для мониторинга быстро протекающих ионосферных процессов для каждой из трасс измерялись доплеровские смещения частоты (ДСЧ) и амплитуда сигнала. Применение авторегрессионного анализа [Марпл-мл., 1990] для спектрального оценивания позволило достичь разрешающей способности по частоте 0.02 Гц при разрешающей способности по времени 7.5 с .

Аналізу подлежали временные зависимости доплеровских спектров (ДС). В них содержалась информация о нестационарных процессах в ионосфере.

4. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Магнитная буря 25–26 августа 2018 г. была самой сильной в этом году.

Опишем кратко состояние космической погоды в интервале времени с 23 по 29 августа 2018 г. (рис. 2). Всплески концентрации частиц N_{sw} в солнечном ветре наблюдались 24, 25 и 26 августа 2018 г. Наибольший всплеск (от $3 - 4$ до $15 - 20 \text{ см}^{-3}$)

Таблица 1. Основные сведения об используемых радиотрассах и радиопередающих станциях (<https://fmscan.org/>)

Частота	Местоположение (страна, город)	Расстояние до Harbin	Азимут	Мощность	Время работы
6015 кГц	Республика Корея, Hwaseong	949 км	179°	100 кВт	03:30–16:20 UT 19:00–00:00 UT
6055 кГц	Япония, Chiba	1613 км	130°	50 кВт	20:25–15:00 UT
6080 кГц	КНР, Hailar	646 км	309°	10 кВт	21:50–15:00 UT
6175 кГц	КНР, Beijing	1044 км	234°	100 кВт	09:00–18:05 UT 20:25–24:00 UT
6600 кГц	Республика Корея, Goyang	907 км	179°	50 кВт	05:00–23:00 UT
9520 кГц	КНР, Hohhot	1343 км	251°	50 кВт	21:50–16:05 UT
9750 кГц	КНР, Hohhot	1343 км	251°	50 кВт	21:50–16:05 UT
	Япония, Yamata	1531 км	129°	300 кВт	08:00–17:00 UT

имел место в ночь с 25 на 26 августа 2018 г. Скорость частиц V_{sw} солнечного ветра изменялась в пределах от 300 до 600 км/с.

Температура частиц T_{sw} в солнечном ветре 26 августа 2018 г. выросла от 5×10^4 до 3×10^5 К.

Динамическое давление p_{sw} в солнечном ветре 25 и 26 августа 2018 г. увеличивалось от ~ 0.3 до 3 нПа. Тепловое давление было меньше почти на порядок (до 0.6 нПа).

Компонента B_z межпланетного магнитного поля достигла значений -6 и -9 нТл соответственно 24 и 25 августа 2018 г. Отрицательные значения B_z свидетельствовали о наступлении на Земле магнитной бури.

Функция Акасофу ϵ_A , представляющая собой мощность, внедряемую в магнитосферу Земли, увеличилась в ночь с 25 на 26 августа 2018 г. от ~ 1 до 30 ГДж/с и более. В геокосмосе возникла буря. Индекс AE вырос от ~ 100 до 1500 нТл, индекс Kp — от ~ 1 до 7, а Dst -индекс сначала увеличился от ~ 0 до ~ 20 нТ, а после 17:00 25 августа 2018 г. стал уменьшаться примерно до -170 нТл. Отрицательные значения Dst -индекса имели место в течение еще нескольких суток. Новый рост индекса Kp до 6 отмечался 27 августа 2018 г. Это означает, что магнитная буря различной интенсивности регистрировалась с 25 по 28 августа 2018 г.

Состояние ионосферы контролировалось при помощи ионозонда DPS-4, который функционирует в Республике Корея (37.14° N, 127.54° E). На рисунке 3 приведена временная зависимость критической частоты слоя F_2 . Из рисунка 3 видно, что примерно с 22:00 25 августа 2018 г. и до 14:00 26 августа 2018 г. значения частоты foF_2 превышали в 1.3–1.7 раза эти же значения в контрольный день 28 августа 2018 г. Это свидетельствует о том, что имела место положительная ионосферная буря. Более того, она сопровождалась неоднократными уменьшениями на 1.5–2 МГц значений

foF_2 . Это означает, что ионосферная буря была многофазной: положительные всплески foF_2 сменялись отрицательными провалами в зависимости $foF_2(t)$.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Наблюдения эффектов ионосферной бури выполнены на 7 трассах. Далее опишем поведение временных вариаций ДС для 25–28 августа 2018 г. Основные проявления бури имели место 26 августа 2018 г.

5.1. Трасса Hwaseong–Harbin

Радиостанция, излучающая на частоте 6015 кГц, находится в Республике Корея. Расстояние между радиопередающим и радиоприемным устройствами $R \approx 950$ км. Радиостанция излучает с 03:30 до 24:00 (здесь и далее UT). Большую часть времени радиоволна отражалась от стабильной E -области ионосферы, а также от слоя E_s . При этом ДСЧ $F \approx 0$ Гц. Амплитуда сигнала A существенно (на 1–1.5 порядка) уменьшилась в дневное время по сравнению с ночным временем.

25 августа 2018 г. большую часть времени $F \approx 0$ Гц (рис. 4). После захода Солнца ДС уширились на ± 1.5 Гц, сигнал становился многомодовым. С 11:00 до 14:00 наблюдались квазипериодические вариации ДСЧ с периодом $T \approx 30$ мин и амплитудой $F_a \approx 0.15$ – 0.20 Гц. После восхода Солнца ДСЧ увеличилось от 0 до 0.4–0.7 Гц. Это продолжалось в течение интервала времени $\Delta T \approx 90$ мин.

26 августа 2018 г. с 04:00 и до 16:00 ионосфера была возмущена. До захода Солнца на Земле почти все время $F < 0$. Сигнал был практически одномодовым. Перед заходом Солнца $F_{\min} \approx -0.5$ Гц. В интервале времени 10:00–12:00 постоянная составляющая ДСЧ $\bar{F} \approx -0.35$ Гц. Наблюдалось квазипериодическое колебание ДСЧ с $T \approx 60$ мин,

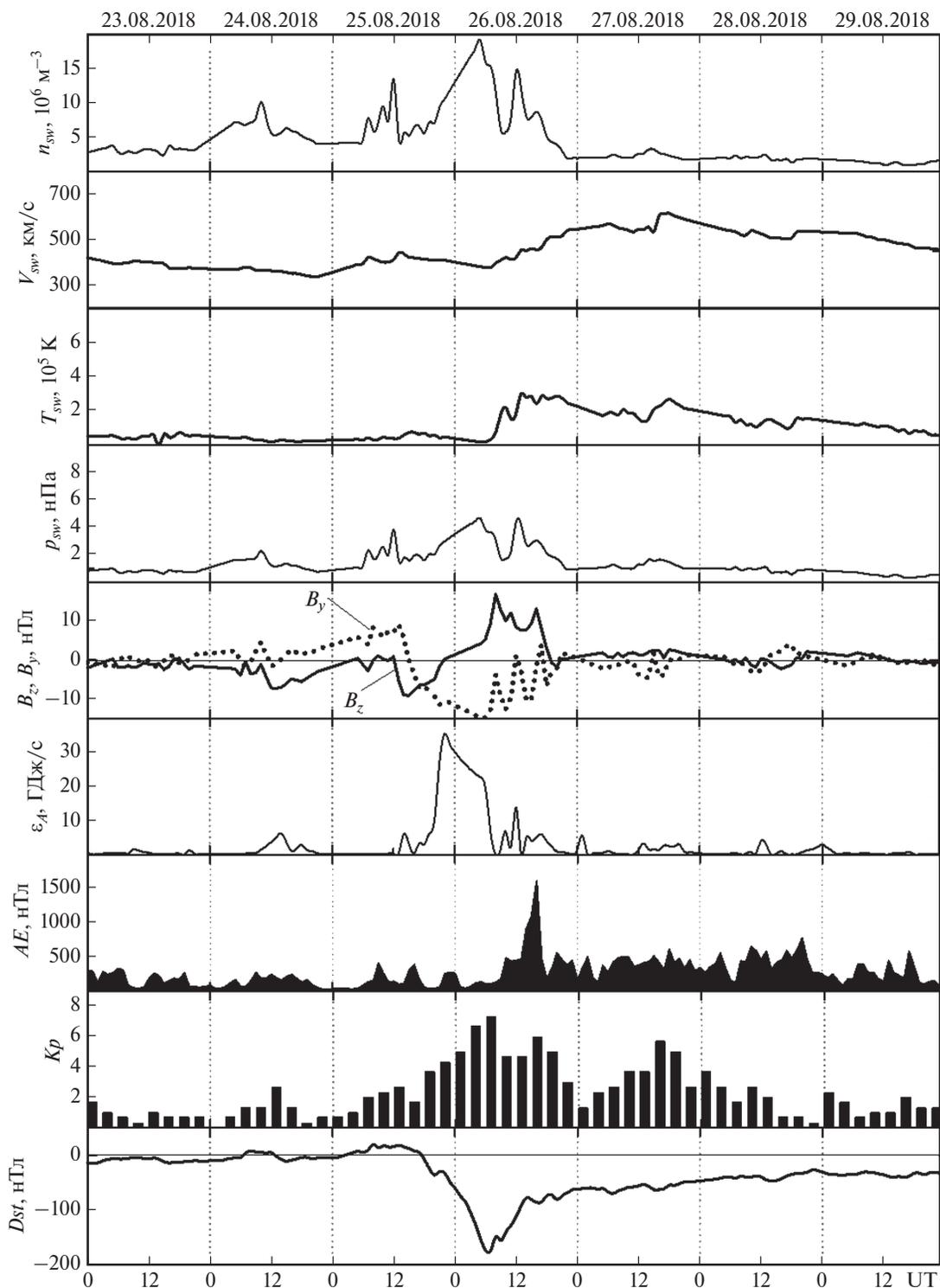


Рис. 2. Временные вариации основных параметров, описывающих состояние космической погоды (панели сверху вниз): временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации n_{sw} , радиальной скорости V_{sw} , температуры T_{sw} [Space Weather Prediction Center. National Oceanic and Atmospheric Administration. Accessible link: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>], и рассчитанных значений динамического давления p_{sw} , B_y - (точки) и B_z - (линия) компонент межпланетного магнитного поля [Space Weather Prediction Center. National Oceanic and Atmospheric Administration. Accessible link: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/ace2/>], рассчитанных значений энергии ϵ_A , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, AE -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Accessible link: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/>], Kp -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Accessible link: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>], Dst -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. Accessible link: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html] в течение 23–29 августа 2018 г.

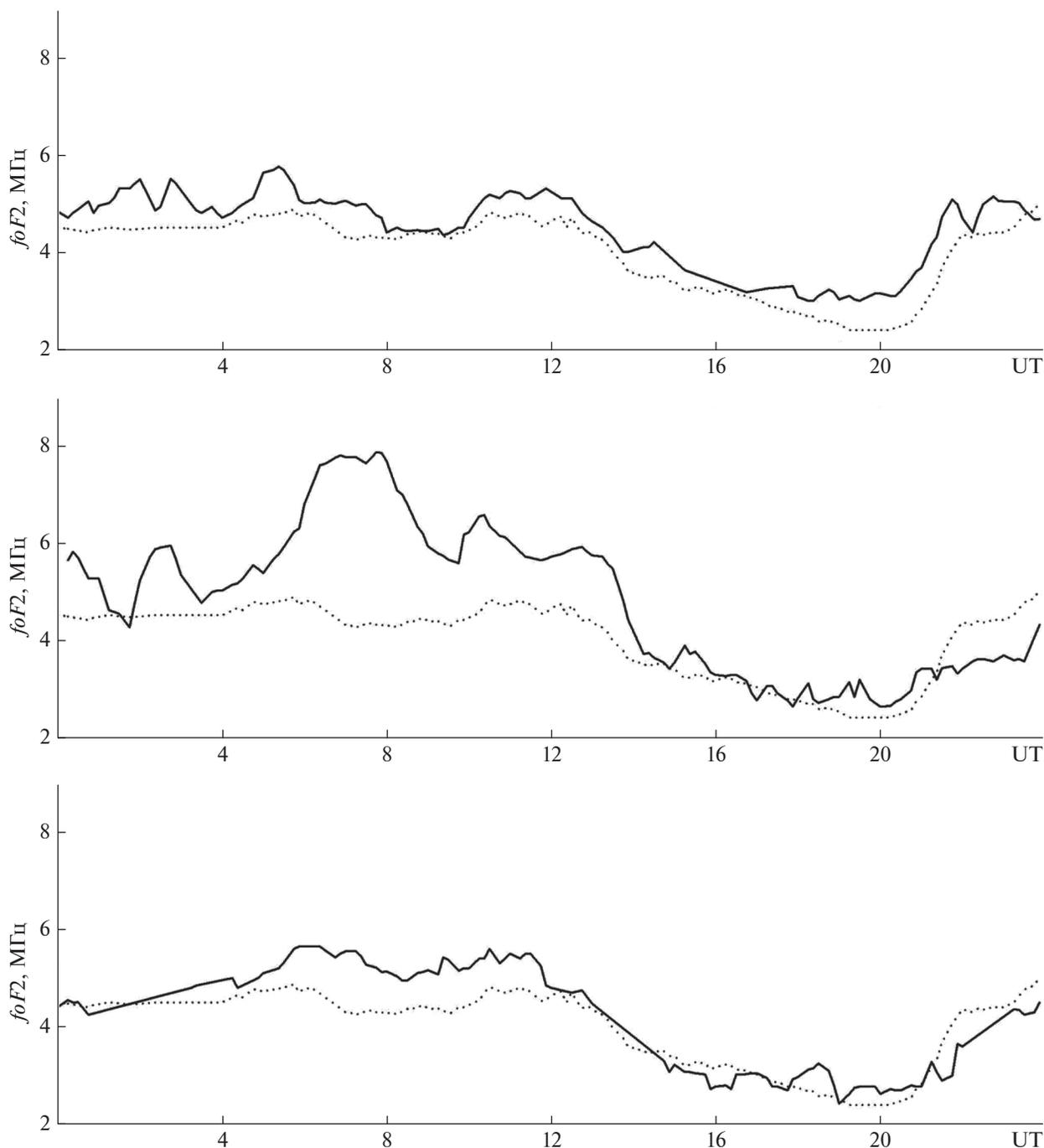


Рис. 3. Временные вариации частоты $foF2$ (панели сверху вниз) 25, 26, и 27 августа 2018 г., измеренные на ионозонде, функционирующем в Республике Корея (<https://ulcar.uml.edu/DIDBase/>). Точки соответствуют временным вариациям частоты $foF2$ 28 августа 2018 г. (контрольные сутки).

$F_a \approx 0.35$ Гц, $\Delta T \approx 160$ мин. В 12:20 ДСЧ резко увеличилось от -0.3 до $F_{\max} \approx 0.8$ Гц. Затем наблюдалось постепенное уменьшение F до 0 Гц, которое имело место примерно в 14:00. При этом на медленные вариации накладывалось квазипериодическое колебание с $T \approx 60$ мин и $F_a \approx 0.2$ Гц. В интервале времени 14:00–16:40 амплитуда сигнала

уменьшилась почти на порядок. Примерно через 1 ч после восхода Солнца на уровне Земли наблюдалось увеличение ДСЧ и амплитуды сигнала. Это продолжалось ~ 50 – 60 мин.

27 августа 2018 г. почти все время $F \approx 0$ Гц. С 08:00 и до 13:30 наблюдалась многомодовость сигнала. При этом уровень флуктуаций ДСЧ до-

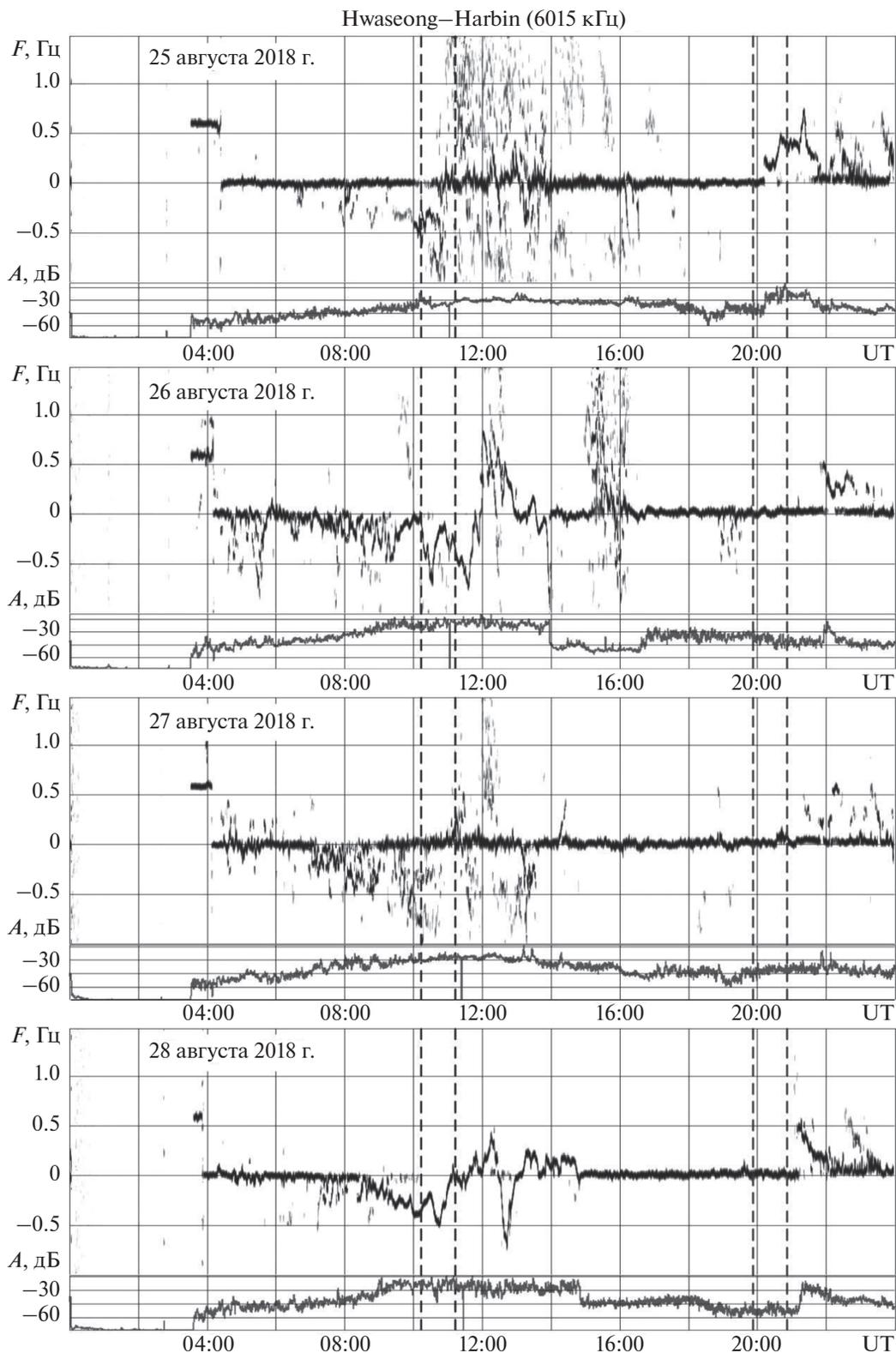


Рис. 4. Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Hwaseong–Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г. Вертикальными штриховыми линиями здесь и далее показаны моменты захода и восхода Солнца на высоте 0 и 100 км, а также 100 и 0 км соответственно.

стигал ± 1.5 Гц. В ночное время $F \approx 0$ Гц. Незначительное усиление многомодовости отмечалось после восхода Солнца.

28 августа 2018 г. в дневное и ночное время $F \approx 0$ Гц. Примерно за 2 часа до захода Солнца на Земле ДСЧ постепенно уменьшалось от 0 до -0.4 Гц, отмечалось колебание с $T \approx 20$ мин и $F \approx 0.1$ Гц. С 10:00 и до 15:00 амплитуда квазипериодических колебаний изменялась от 0.1 до 0.5 Гц. В ночное время $F \approx 0$ Гц. После восхода Солнца, точнее в интервале времени 21:00–22:00, наблюдались скачки как ДСЧ, так и амплитуды.

5.2. Трасса Chiba–Harbin

Радиостанция, работающая на частоте 6055 кГц, дислоцирована в Японии. Для нее $R \approx 1613$ км. Радиостанция выключается с 15:00 до 22:00.

25 августа 2018 г. в интервале времени 01:00–04:00 амплитуда сигнала была незначительной и доплеровские измерения были неэффективны (рис. 5). С 06:00 и до 10:00, т.е. в послеполуденное время сигнал был в основном двухмодовым. Для одной моды, которая отражалась от слоя E, ДСЧ было ~ 0 Гц. Для второй моды \bar{F} уменьшалось от 0 до -0.6 Гц. На медленное уменьшение ДСЧ накладывались квазипериодические вариации с $T \approx 60$ мин и $F_a \approx 0.2$ Гц. Примерно с 10:00 и до 15:00 наблюдался полный развал ДСЧ. Основная мода регистрировалась неуверенно.

26 августа 2018 г. с 00:20 и до 03:30 уровень сигнала был незначительным. В интервале времени 03:30–08:00 сигнал был практически одномодовым, наблюдались квазипериодическое колебание ДСЧ с $T \approx 45$ –50 мин и $F_a \approx 0.15$ –0.40 Гц. С 08:00 и до 12:00 отмечался полный развал ДСЧ. С 12:00 и до 15:00 уверенно регистрировалось колебание ДСЧ основной моды с $T \approx 60$ мин и $F_a \approx 0.3$ –0.4 Гц.

27 августа 2018 г. поведение ДСЧ в значительной мере напоминало их поведение 25 августа 2018 г.

28 августа 2018 г. в отличие от 25 и 27 августа 2018 г. ДСЧ были скорее одномодовыми. После захода Солнца резко увеличилась амплитуда квазипериодических вариаций ДСЧ с $T \approx 60$ мин и $F_a \approx 0.6$ Гц. Это продолжалось примерно до 13:00.

5.3. Трасса Hailar–Harbin

Радиостанция, излучающая на частоте 6080 кГц, находится на территории Китая. При этом $R \approx 646$ км.

25 августа 2018 г. радиопередающее устройство выключалось в интервале времени 05:00–09:00. В дневное время ДСЧ были скорее одномодовыми, в остальное время суток – многомодовыми (рис. 6). В интервалах времени 16:00–20:00 и 21:00–22:00

из-за уменьшения амплитуды сигнала наблюдались “развал” доплеровских спектров.

26 августа 2018 г. радиопередающее устройство выключалось с 03:00 и до 09:00. В интервале времени 09:00–12:00 имели место резкие знакопеременные вариации ДСЧ (от -1.2 до $+0.5$ Гц). С 12:00 и до 14:00 спектр был многомодовым. Полный “развал” ДСЧ наблюдался с 16:00 до 20:00.

27 августа 2018 г. основная мода в ДСЧ уверенно регистрировалась в интервале времени 09:00–16:00. Имели место резкие знакопеременные вариации ДСЧ (от -0.25 Гц до $+0.75$ Гц). С 16:00 и до 20:00 наблюдался полный “развал” ДСЧ.

28 августа 2018 г. поведение ДСЧ качественно мало чем отличалось от поведения ДСЧ 27 августа 2018 г.

“Развал” ДСЧ во все дни на данной трассе свидетельствовал о том, что радиоволна не отражалась от ионосферы, а свободно проходила сквозь нее в интервале времени 16:00–20:00.

5.4. Трасса Beijing–Harbin

Данная радиостанция излучает на частоте 6175 кГц. Она расположена на территории Китая, $R \approx 1044$ км. Радиопередающее устройство выключается в интервалах времени 00:00–09:00 и 18:00–20:00.

25 августа 2018 г. ДСЧ были диффузными (рис. 7). В период восхода Солнца четко выделялась основная мода.

26 августа 2018 г. ДСЧ были практически одномодовыми. С 10:00 и до 12:00 $\bar{F} \approx -0.3$ Гц. Период квазипериодического колебания $T \approx 50$ мин, $F_a \approx 0.25$ Гц. В 12:00 имел место резкий скачок ДСЧ от -0.2 Гц до 0.2 Гц. Далее в течение 2 часов значения \bar{F} уменьшались от 0.5 Гц до 0 Гц. На медленные вариации $\bar{F}(t)$ накладывался квазипериодический процесс с $T \approx 20$ мин и $F_a \approx 0.1$ –0.2 Гц. В интервалах времени 14:00–18:00 и 20:00–24:00 $\bar{F} \approx 0$ Гц. Эпизодически возникало колебание с амплитудой 0.10–0.15 Гц и переменным периодом. Примерно с 14:00 и до 15:00 наблюдалось резкое уменьшение (почти в 30 раз) амплитуды сигнала, которая затем восстанавливалась примерно в течение 1 часа.

27 августа 2018 г. почти на протяжении всего времени наблюдения ДСЧ были практически одномодовыми и $\bar{F} \approx 0$ Гц. Значения ДСЧ отличались от 0 Гц лишь в течение захода и восхода Солнца. В интервале времени 15:00–18:00 наблюдалось уменьшение амплитуды сигнала примерно в 5.5 раз.

28 августа 2018 г. с 09:30 и до 11:30 отмечалось уменьшение ДСЧ от 0 до -0.4 Гц, а затем его увеличение от -0.4 до 0 Гц. На медленные вариации

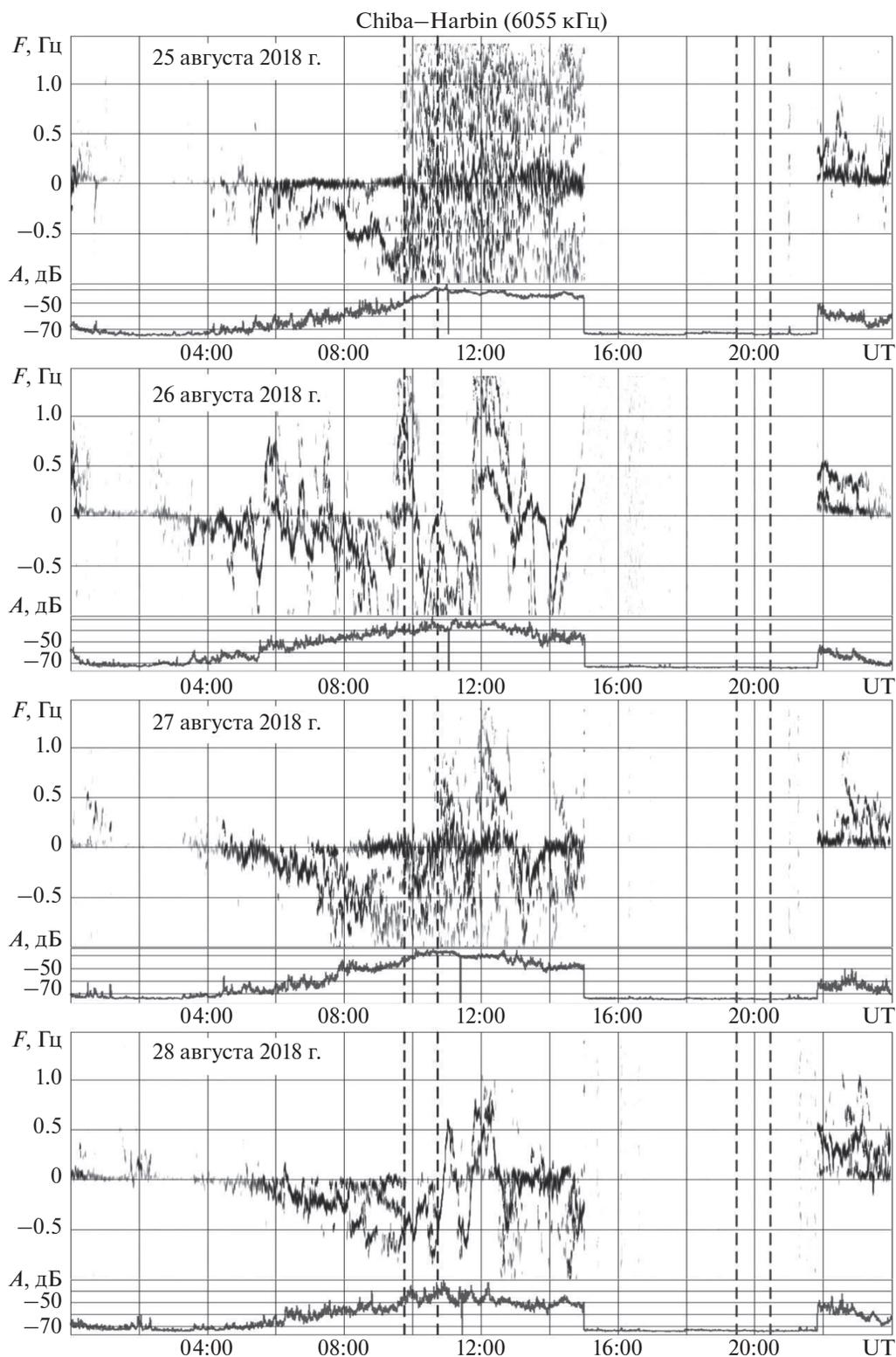


Рис. 5. Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Chiba–Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

ДСЧ накладывалось колебание с $T \approx 20$ мин и $F_a \approx 0.1$ Гц. В интервале времени 11:00–13:30 амплитуда колебания увеличилась до 0.35 Гц. При этом

$T \approx 60$ –70 мин. Значительное отклонение F до 0.5 Гц наблюдалось вскоре после восхода Солнца на уровне Земли.

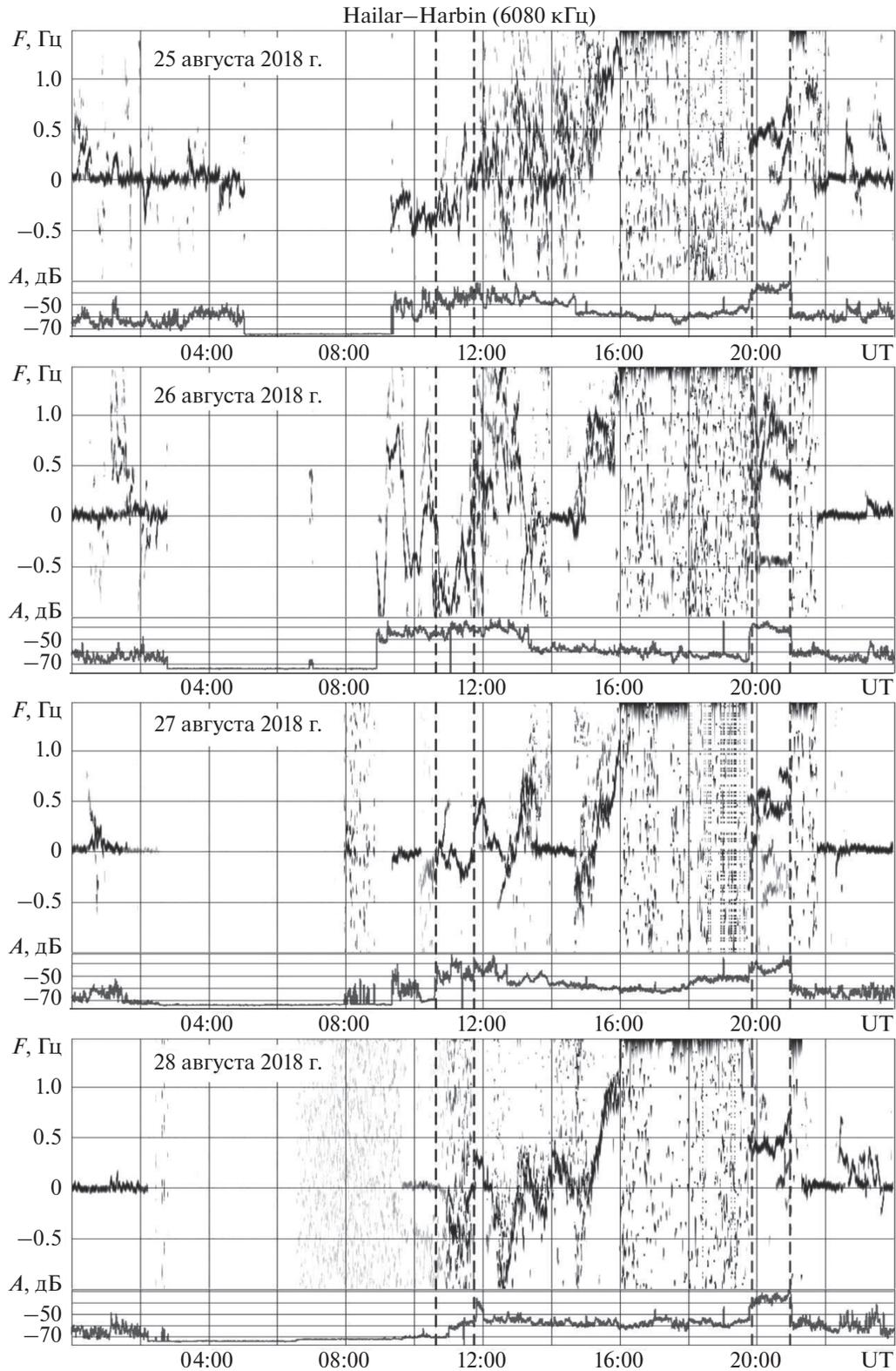


Рис. 6. Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Nailar–Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

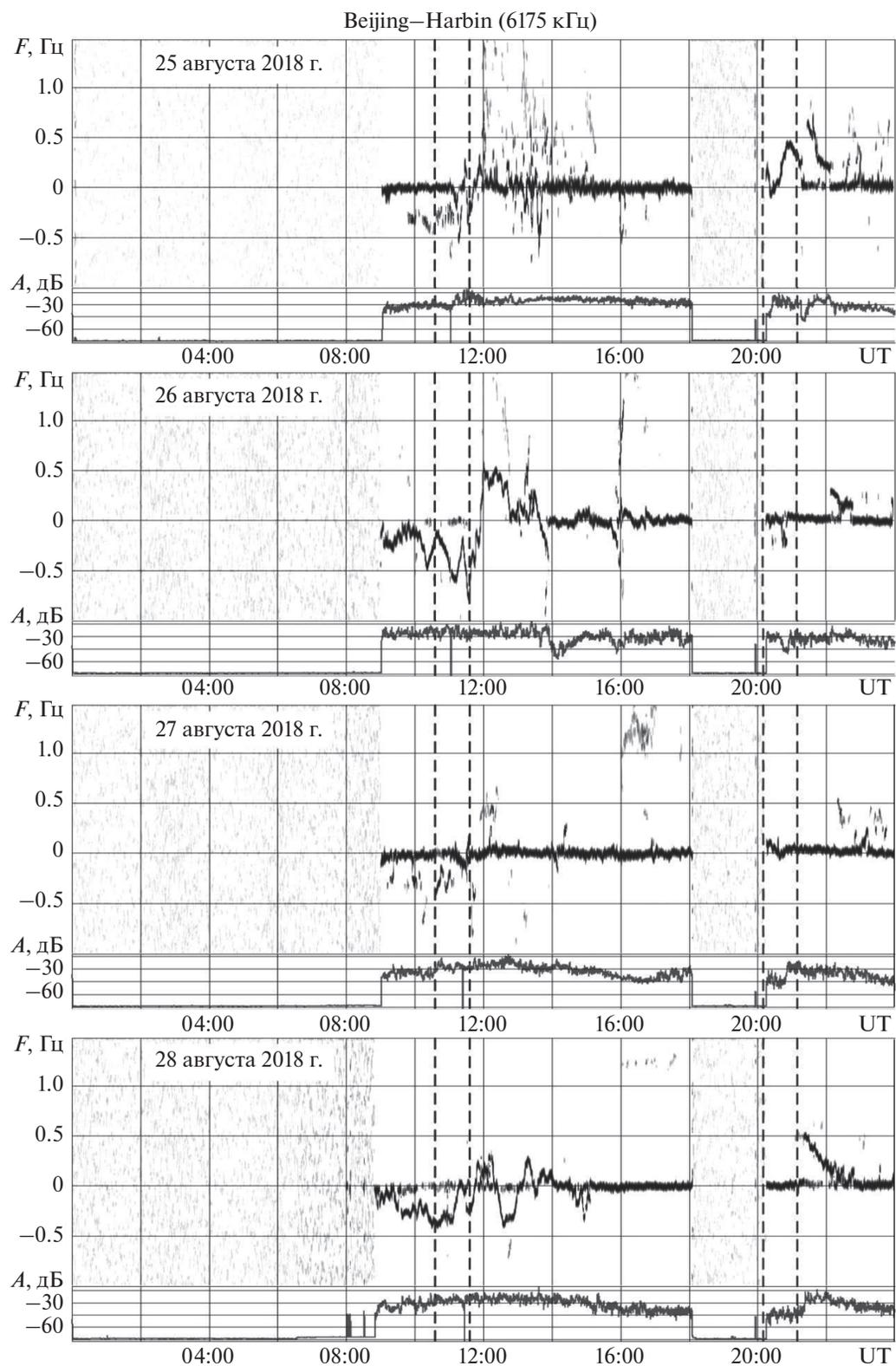


Рис. 7. Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Beijing–Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

5.5. *Trасса Goyang—Harbin*

Радиостанция, вещающая на частоте 6600 кГц, расположена в Республике Корея. При этом $R \approx 907$ км. Излучение прекращается в интервале времени 23:00–05:00.

25 августа 2018 г. почти в течение всего времени измерения ДС были диффузными. В интервалах времени 08:00–13:00 и 21:30–22:20 четко выделялась основная мода (рис. 8). Перед заходом Солнца $\bar{F} < 0$ Гц. С 08:00 и до 13:30 отмечалось квазипериодическое колебание ДСЧ с $T \approx 30$ мин и $F_a \approx 0.1$ –0.2 Гц. Значительное (на порядок) уменьшение амплитуды сигнала наблюдалось с 17:40 и до 19:10.

26 августа 2018 г. квазипериодический процесс с $T \approx 30$ мин и $F_a \approx 0.2$ Гц имел место в интервале времени 05:00–06:00. В течение последующих двух часов наблюдались незначительные (± 0.1 Гц) флуктуации ДСЧ. После 08:00 амплитуда квазипериодических колебаний постепенно увеличивалась от 0.1 до 0.4–0.5 Гц. При этом $T \approx 60$ мин. Около 12:00 произошло резкое увеличение ДСЧ от -0.4 до 0.8 Гц. После этого наблюдалась тенденция уменьшения ДСЧ от 0.8 Гц до 0 Гц. С 14:00 и до 17:30 ДС были диффузными. В то же время амплитуда сигнала уменьшилась примерно в ~ 30 раз. После 17:30 флуктуации ДСЧ были незначительными. С 20:00 и до 20:50 наблюдалось уменьшение амплитуды сигнала примерно в 5–6 раз.

27 августа 2018 г. в течение всего времени измерений флуктуации ДСЧ были незначительными (± 0.1 Гц). Уменьшение амплитуды сигнала примерно на порядок отмечалось с 16:00 и до 21:00.

28 августа 2018 г. с 05:00 до 08:00 и с 14:40 до 21:40 флуктуации ДСЧ были незначительными. Их уровень увеличился в интервалах времени 08:30–09:50 и 13:10–14:50, а также 21:45–22:35. С 09:50 и до 13:10 отраженный от ионосферы сигнал отсутствовал. Очень слабым сигнал был также в интервале времени 18:50–21:45.

5.6. *Trасса Hohhot—Harbin*

Радиостанция, дислоцированная в Китае, излучает на частоте 9520 кГц. Расстояние $R \approx 1343$ км. Радиостанция прекращала вещание в интервале времени 16:00–22:00.

25 августа 2018 г. до 06:00 $F \approx 0$ Гц. С 06:00 до 10:00 ДСЧ постепенно уменьшалось от 0 до -0.3 Гц (рис. 9). В интервале времени 10:00–11:00 амплитуда сигнала уменьшалась в 3–5 раз, $F \approx 0$ Гц. С 11:00 и до 14:00 имело место значительное уширение ДС. В интервале времени 14:00–16:00 флуктуации ДСЧ были незначительными.

26 августа 2018 г. заметные флуктуации ДСЧ отмечались с 05:00 и до 09:00. В интервале времени 09:00–13:30 вариации ДСЧ были очень значи-

тельными (от -1.2 до 0.8 Гц). Амплитуда колебаний достигала 0.5 Гц, а $T \approx 50$ –70 мин. Около 12:00 произошло резкое изменение знака ДСЧ. С 12:00 и до 13:30 величина ДСЧ уменьшалась от 0.8 до 0 Гц. Далее наблюдались незначительные флуктуации ДСЧ. В интервале времени 13:30–14:25 амплитуда сигнала уменьшилась в 30–35 раз.

27 августа 2018 г. за исключением предзаходного и заходного периодов флуктуации ДСЧ и амплитуда сигнала были незначительными. Во время захода Солнца ДСЧ изменялось от -0.5 до 0.2 Гц. Амплитуда сигнала варьировала в пределах порядка величины.

28 августа 2018 г. в интервале времени 06:00–09:40 наблюдалось отключение радиопередающего устройства. Флуктуации F и A были заметными лишь в течение захода Солнца.

5.7. *Trасса Yamata—Harbin*

Радиостанция, которая вещает на частоте 9750 кГц, расположена в Японии, $R \approx 1531$ км. Радиостанция не функционирует с 16:00 до 17:00 и с 18:00 до 22:00.

25 августа 2018 г. примерно с 10:00 и до 16:00 ДС были диффузными (рис. 10). В интервалах времени 00:00–08:00 и 22:00–24:00 наблюдался сигнал от другой радиостанции, для нее $F \approx -0.5$ Гц, а амплитуда сигнала была в 30–35 раз меньше.

26 августа 2018 г. после 08:00 регистрировалось уменьшение ДСЧ от 0 до -1.35 Гц, за которым последовало колебание с $T \approx 60$ мин и $F_a \approx 0.4$ –0.9 Гц. При этом $\bar{F} \approx -0.4$ Гц. Примерно в 12:00 имело место резкое изменение знака ДСЧ. Далее ДСЧ уменьшалось от 0.8 до -0.5 Гц. Примерно в 13:45 радиостанция отключилась.

27 августа 2018 г. значительные вариации ДСЧ наблюдались в интервале времени 11:00–13:00.

28 августа 2018 г. заметные флуктуации ДСЧ отмечались с 11:00 и до 12:40.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

6.1. *Связь вариаций ДС с ионосферной бурей*

Ионосферная буря, следовавшая за уменьшением Dst -индекса около 20:00 25 августа 2018 г., сначала сопровождалась незначительным увеличением N (см. рис. 3). Следующие всплески N имели место 26 августа 2018 г. около 00:23, 02:45, 07:45, 10:23 и 12:45 (см. рис. 3). Всплески N чередовались ее уменьшениями в 1.8–2.3 раза. Таким образом, отличительной особенностью данной бури была ее многофазность: две положительные бури чередовались с тремя отрицательными бурями. Добавим, что природа положительных и отрицательных бурь обсуждалась в ряде работ [Данилов и Морозова, 1975; Bradley et al., 1997; Pröls, 2021].

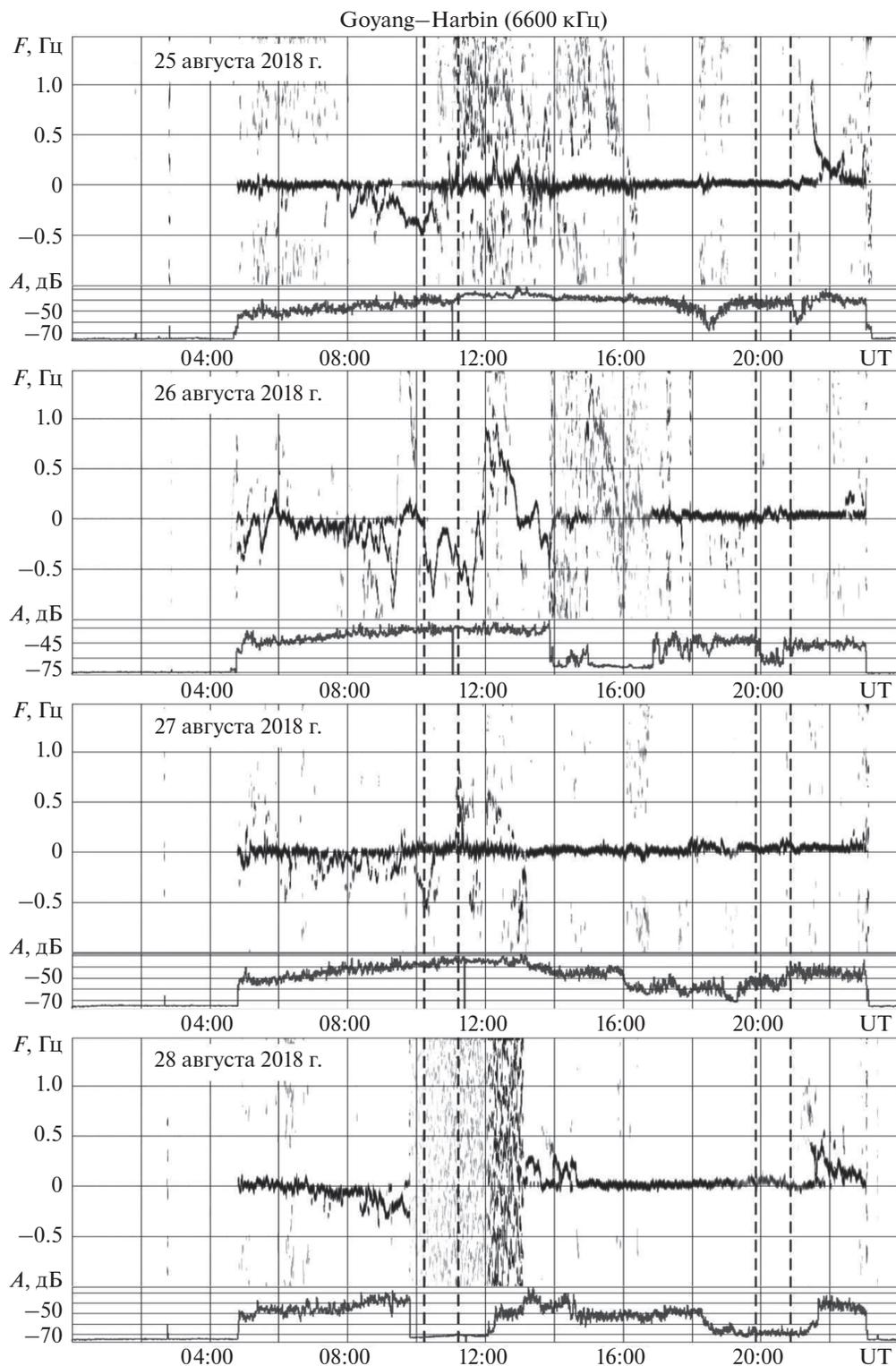


Рис. 8. Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Goyang–Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

1995; Vuonsanto, 1999; Данилов, 2013; Черногор и Домнин, 2014].

Процессы в области отражения радиоволны, например, на частоте 9520 кГц, наблюдались при-

мерно на 25 мин позже перечисленных выше моментов времени. С 09:00 и до 12:00 ДСЧ на всех трассах было отрицательным. Это означает, что область отражения радиоволн сместилась вверх,

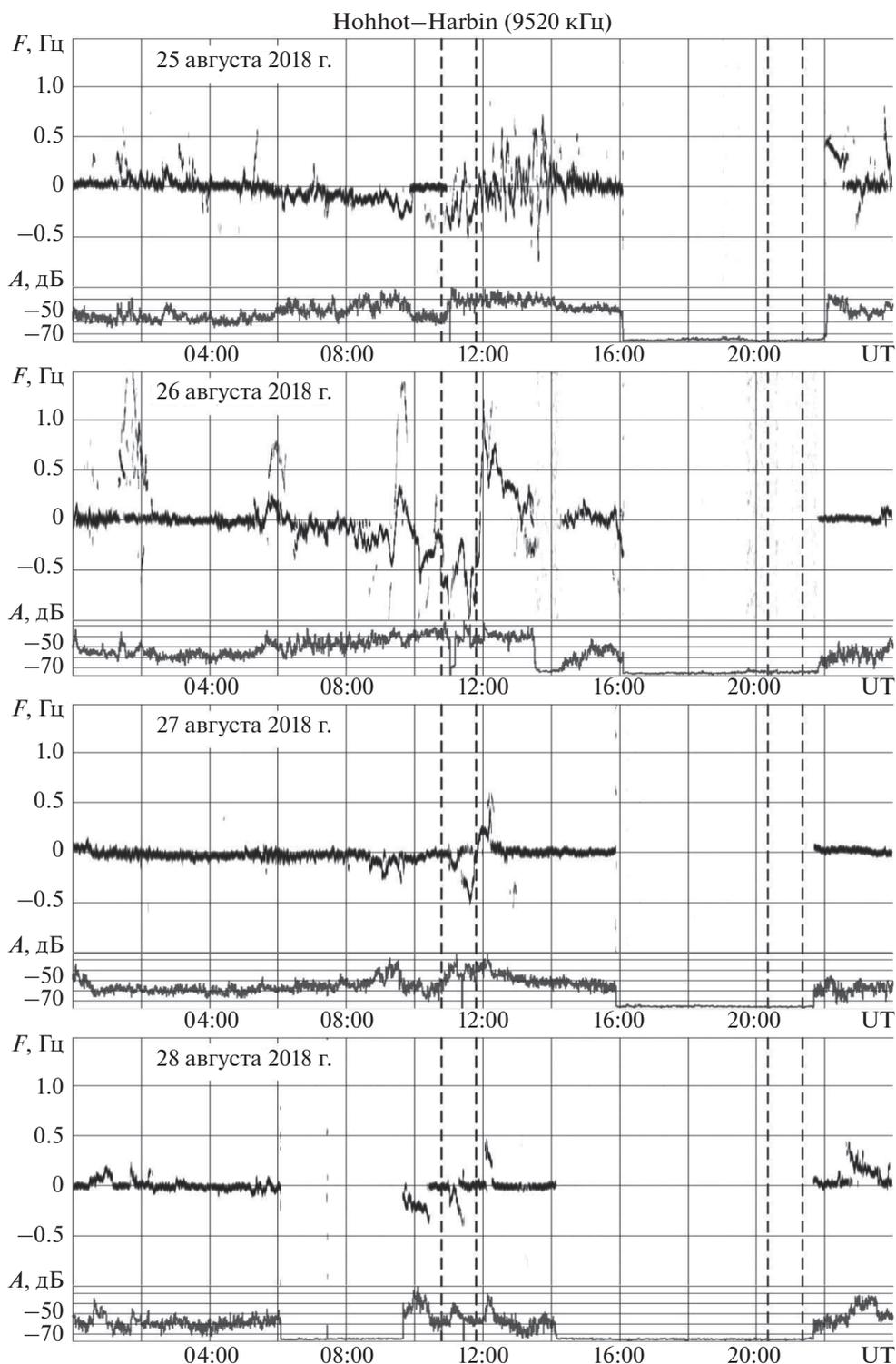


Рис. 9. Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Hohhot–Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

при этом концентрация электронов N в ионосфере уменьшилась. В интервале времени 12:00–13:00 для всех трасс ДСЧ становилось положительным, область отражения радиоволн сместилась

вниз. Это было вызвано увеличением концентрации электронов. На медленные уменьшения и увеличения ДСЧ накладывались его квазипериодические вариации.

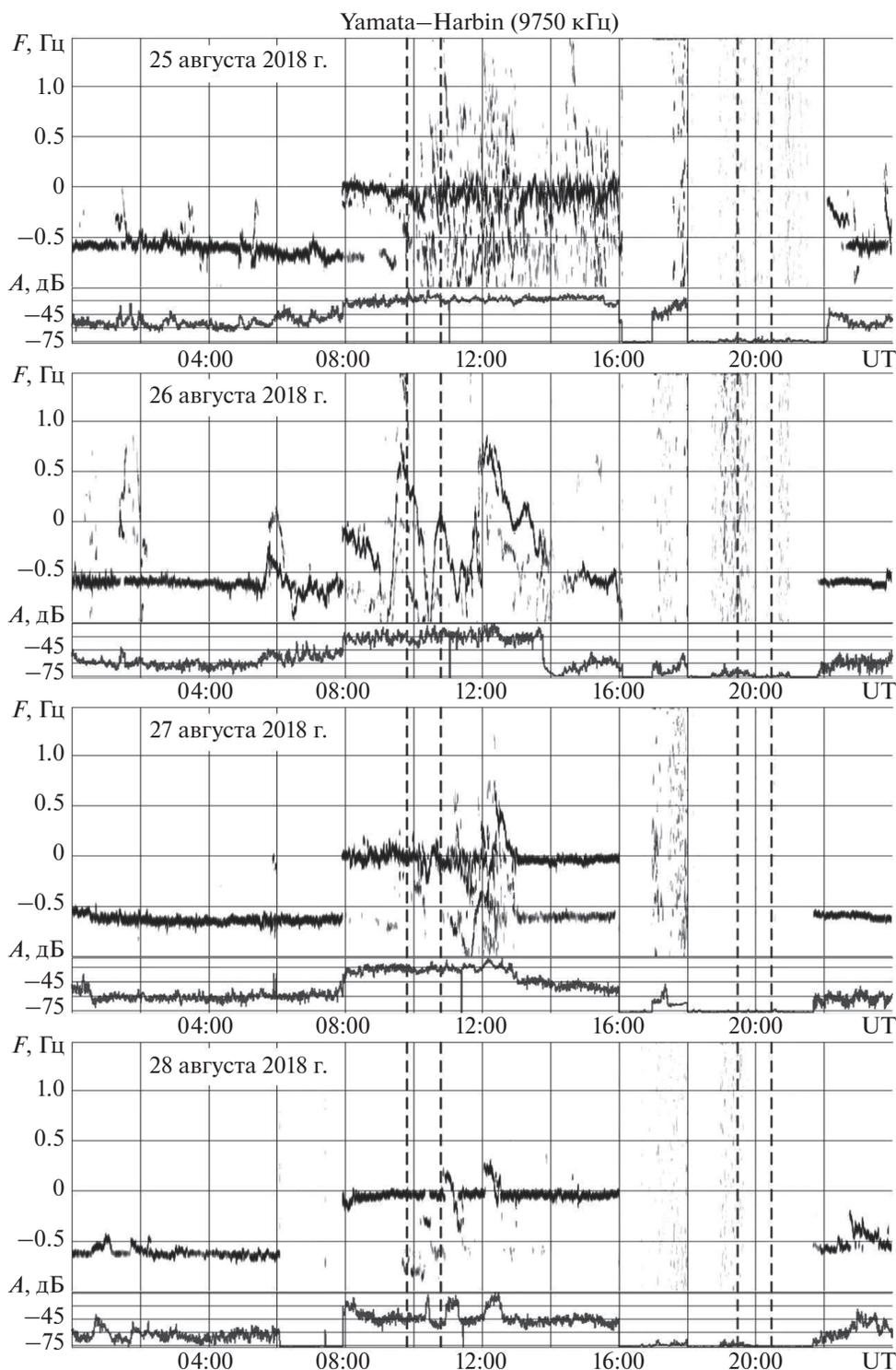


Рис. 10. Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Yamata–Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

Синхронность описанных вариаций для всех трасс свидетельствует о том, что возмущение ионосферы было крупномасштабным, если не глобальным. Масштаб возмущений был не менее

1–2 тыс. км. В контрольные дни подобные вариации параметров ДС отсутствовали. Следовательно, наблюдаемые вариации ДСЧ были вызваны ионосферной бурей.

Добавим, что 27 августа 2018 г. регистрировалась вторая магнитная буря с $Kp_{\max} \approx 5$ и $Dst_{\min} \approx -50$ нТл. Ионосферные возмущения при этом были существенно меньшими, чем 26 августа 2018 г.

6.2. Оценка возмущений в ионосфере

Как уже отмечалось, состояние ионосферы контролировалось при помощи ионозонда DPS-4, расположенного в Республике Корея. Анализируются временные и высотные зависимости плазменной частоты $f_p(t, z)$, однозначно связанные с $N(t, z)$.

Далее получим соотношения, позволяющие по ДСЧ оценить величину увеличения N во время положительных ионосферных бурь либо величину уменьшения N во время отрицательных ионосферных бурь, величину сдвига области отражения радиоволн и параметры квазипериодических вариаций N .

Как известно, при распространении радиоволны с частотой f в сферически слоистой изотропной ионосфере без поглощения условие отражения описывается скорректированным законом секанса (см., например, [Davies, 1990]):

$$f = kf_p(z_r) \sec \theta, \quad (1)$$

где z_r – высота отражения; θ – угол падения на ионосферу, отсчитываемый от вертикали,

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{2r_0 z_r}}} \quad (2)$$

коэффициент, учитывающий сферичность ионосферы. Здесь R – длина радиотрассы; $r_0 \approx 6400$ км – радиус Земли.

Подставляя (2) в (1), получим соотношение для оценки высоты отражения по известной зависимости $f_p(z)$:

$$f = f_p(z_r) \left(\frac{z_0 R^2 + 4z_r^2}{2z_r R^2 + 2z_r r_0} \right)^{1/2}.$$

Зная z_r и R , можно оценить угол θ . Для более точных расчетов z_r и θ необходимо проводить траекторные расчеты.

При оценках использовалось лучевое приближение. “Толщина” радиолуча определялась по радиусу первой зоны Френеля

$$r_F \approx \sqrt{R\lambda/2},$$

где $\lambda = c/f$ – длина радиоволны, c – скорость света в вакууме. При $R \approx 1$ –2 тыс. км и $f \approx 6$ –10 МГц имеем $r_F \approx 5$ –6 км.

ДСЧ вызывается движением области отражения радиоволны со скоростью v . При этом

$$F = -2 \frac{f}{c} v \cos \theta. \quad (3)$$

Из (3) получаем скорость:

$$v = -\frac{c}{2f \cos \theta} F. \quad (4)$$

Поскольку в процессе движения области отражения изменяется угол θ , при оценке v по соотношению (4) необходимо вычислять среднее значение $\cos \theta$.

6.2.1. Подъем и опускание области отражения радиоволн

Зная $v(t)$, можно оценить смещение области отражения радиоволны по высоте:

$$\begin{aligned} \Delta z_r &= \int_0^{\Delta T} v(t) dt = -\frac{c}{2f \cos \theta} \int_0^{\Delta T} F(t) dt \approx \\ &\approx -\frac{c \Delta T}{4 \cos \theta} \frac{F_m}{f}, \end{aligned} \quad (5)$$

где ΔT – продолжительность изменения $F(t)$, F_m – экстремальное значение F на интервале времени ΔT .

Результаты оценки смещения области отражения при движении вверх (Δz_{r1}) и движении вниз (Δz_{r2}) приведены в табл. 2. Из таблицы 2 видно, что для всех трасс эти смещения были значительными (~ 30 –90 км).

Сравнительно медленные (характерное время ~ 1 ч и более) изменения $F(t)$ свидетельствуют об изменении N в ионосфере. При модели $N(z)$ в виде линейного профиля концентрация N изменяется в такое число раз:

$$\frac{N}{N_0} \approx 1 + \frac{\Delta z_r}{L}, \quad (6)$$

где L – характерный высотный масштаб изменения $N(z)$, N_0 – невозмущенное бурей значение N . Например, при $\Delta z_r = 60$ км и $L \approx 30$ км имеем $N/N_0 \approx 3$. Это означает, что в течение положительной ионосферной бури концентрация электронов в F -области ионосферы увеличилась в 3 раза. Во время отрицательных ионосферных бурь N уменьшалась в 1.5–3 раза.

Оценку N/N_0 можно получить и другим способом. Можно показать, что при увеличении ДСЧ от 0 до F_m , а затем при его уменьшении до 0 за время ΔT справедливо следующее приближенное выражение:

$$\frac{N}{N_0} \approx 1 + \frac{c \Delta T k^2 F_m}{4 L_n k_\theta f}, \quad (7)$$

где L_n – характерный масштаб изменения показателя преломления радиоволны в области ее отражения, коэффициент

$$k_\theta = \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta} \quad (8)$$

Таблица 2. Основные параметры ДСЧ и ионосферы

f , кГц	6015	6055	6080	6175	6600	9520	9750
$\overline{F_{\min}}$, Гц	-0.35	—	-0.5	-0.3	-0.3	-0.5	-0.5
ΔT_1 , мин	120	—	120	120	120	120	120
Δz_1 , км	105	—	105	110	90	100	95
$\overline{F_{\max}}$, Гц	0.7	0.4	0.5	0.5	0.6–0.7	0.8	0.7
ΔT_2 , мин	60	60	40	60	60	60	60
Δz_2 , км	105	100	45	90	90–105	78	70
F_a , Гц	0.3–0.35	0.3	0.5	0.25	0.4	0.5	0.4–0.6
T , мин	60	60	60	50	60	50–70	60
Δz_a , км	29–33	28	45	23	33	31	28–42
δ_{Na}	0.67–0.77	0.72	0.93	0.50	0.88	0.63–0.89	0.50–0.75

определяется траекторией радиоволны.

Из рисунка 9 видно, что в интервале времени 05:35–06:48 наблюдались всплески ДСЧ с $F_{m1} \approx 0.25$ Гц и $F_{m2} \approx 0.75$ Гц. Им соответствуют радиолучи, отражающиеся от E - и F -областей соответственно.

При отражении радиоволны от E -области $z_r \approx 130$ км, $\Delta T \approx 2 \times 10^3$ с, $k \approx 0.69$, $\cos \theta \approx 0.19$, $k_\theta \approx 0.095$ и $N/N_0 \approx 1.5$.

При отражении радиоволны от F -области $z_r \approx 160$ км, $\Delta T \approx 2 \times 10^3$ с, $k \approx 0.73$, $\cos \theta \approx 0.23$, $k_\theta \approx 0.11$ и $N/N_0 \approx 2.9$. По данным ионозонда вблизи этого момента времени $N/N_0 \approx 3$. При оценке N/N_0 считалось, что критическая частота $f_oF2 \approx 7.8$ МГц, ее невозмущенное значение составляло 4.5 МГц (см. рис. 3). В течение отрицательных ионосферных бурь $N/N_0 \approx 0.3$ –0.6.

Как видно, результаты оценок по вариациям ДСЧ хорошо согласуются с результатами наблюдений на ионозонде.

Можно утверждать, что сильная магнитная буря сопровождалась достаточно сильной ионосферной бурей.

6.2.2. Волновые возмущения в ионосфере

Ионосферная буря сопровождалась значительным усилением колебаний ДСЧ с периодом $T \approx 60$ мин и амплитудой $F_a \approx 0.3$ –0.5 Гц (см., например, рис. 8–10, табл. 2). Эти колебания, скорее всего, вызваны приходом атмосферных гравитационных волн (АГВ) от места их генерации до пункта регистрации. Обычно АГВ генерируются в период максимальной скорости изменения $dDst/dt$, что имело место примерно около 04:00–06:00 26 августа 2018 г. Интенсивные колебания ДСЧ с периодом ~ 60 мин на всех радиотрассах наблюдались в интервале времени 10:00–12:00

26 августа 2018 г. При этом время распространения АГВ составило $\Delta t \approx 6$ –4 ч. Местом генерации АГВ является область околосредней среды, точнее вечерне-полуночный сектор аврорального овала и полярной шапки, где происходит интенсивное внедрение энергии частиц солнечного происхождения (широта $\varphi \approx 70^\circ$ N). Для трасс над территорией Китая широта составляет $\sim 40^\circ$ – 45° N. Тогда $\Delta \varphi \approx 25^\circ$ – 30° . Этому соответствует кратчайшее расстояние $D_0 \approx 2700$ –3300 км. Однако возмущение, как это видно по времени его запаздывания на различных трассах, перемещалось с северо-востока. Северо-восточное направление является направлением на область наиболее интенсивных высыпаний энергичных электронов в вечерне-полуночном секторе аврорального овала и вполне согласуется с другими экспериментальными результатами и общепринятыми теоретическими моделями [Лазутин, 2015]. При этом $D \approx 6000$ –7000 км. Тогда горизонтальная скорость движения волн

$$w \approx \frac{D}{\Delta t} \approx 275\text{--}480 \text{ м/с.}$$

Такую скорость и такой период (~ 60 мин) действительно имеют АГВ.

Как уже отмечалось, усиление волновых возмущений имело место в интервале времени $\sim 10:00$ – $12:00$. И, хотя этот интервал был близок к интервалу времени действия солнечного терминатора, волновые возмущения, как показывают наблюдения в контрольные дни, связаны все-таки с бурей.

Распространение волн в ионосфере приводит к колебаниям высоты отражения радиоволн. Оценим их амплитуду Δz_a . При

$$F(t) = F_a \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (9)$$

из (9) с учетом (4) получим, что

$$v(t) = -\frac{c}{2f \cos \theta} \frac{F_a}{T} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) = -v_a \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right). \quad (10)$$

Здесь F_a – амплитуда колебаний ДСЧ, v_a – амплитуда колебаний скорости вертикального движения:

$$v_a = \frac{c}{2f \cos \theta} \frac{F_a}{T}. \quad (11)$$

Тогда с учетом (8), (10) и (11) получим, что

$$\Delta z_a = \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{v_a T}{\pi} = \frac{c T}{2\pi f \cos \theta} \frac{F_a}{T}. \quad (12)$$

Результаты оценок Δz_a по соотношению (12) также приведены в табл. 2. Из таблицы 2 видно, что амплитуда Δz_a – значительна.

Полагая, что при колебаниях высоты отражения радиоволн справедливо соотношение, аналогичное (6), получим, что

$$\delta_{Na} = \frac{N}{N_0} - 1 \approx \frac{\Delta z_a}{L}.$$

При $\Delta z_a \approx 30$ км и $L \approx 30$ – 60 км имеем $\delta_{Na} \approx 0.5$ – 1 . Результаты более точных оценок, учитывающих параметры траектории радиоволны, также приведены в табл. 2. Действительно, значения δ_{Na} изменились от 0.5 до 0.9.

Таким образом, обсуждаемая ионосферная буря качественно и количественно отличается от “типичной” (т.е. однофазной) ионосферной бури. Это еще раз подтверждает тезис об отсутствии двух одинаковых ионосферных бурь, об индивидуальности каждой бури.

7. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. При помощи когерентного многотрассового радиотехнического комплекса наклонного зондирования ионосферы проведено наблюдение за характеристиками радиоволн в диапазоне ~ 6 – 10 МГц и возмущениями в ионосфере над территорией Китая в течение сильной ($Kp = 7$) геомагнитной бури 25–26 августа 2018 г.

2. Выявлены апериодические и квазипериодические вариации ДСЧ. Ионосферная буря привела к усилению многолучевости, уширению ДС, существенному смещению траекторий радиоволн. Показано, что величина знакопеременных апериодических вариаций ДСЧ не превышала 0.6–0.7 Гц, а амплитуда ее колебаний – 0.5–0.6 Гц.

3. Установлено, что магнитная буря сопровождалась многофазной ионосферной бурей, длившейся не менее 16 ч (с 22:00 25 августа 2018 г. до 14:00 26 августа 2018 г.). Отличительной особенностью данной ионосферной бури было то, что две положительные бури чередовались с тремя отрицательными бурями. В течение бури на всех

трассах неоднократно наблюдался подъем области отражения радиоволн на ~ 50 – 100 км, а также ее колебания с амплитудой ~ 30 – 40 км. За подъемами следовали опускания области отражения радиоволн на многие десятки километров.

4. Подъемы и опускания области отражения были вызваны уменьшением N в 1.5–2 раза и ее увеличением в несколько раз соответственно. Максимальное увеличение концентрации электронов в E -области ионосферы достигало 1.5 раз, а в F -области – 3 раз.

5. Относительная амплитуда колебаний концентрации электронов достигала многих десятков процентов. В контрольные дни амплитуда колебаний ДСЧ была в несколько раз меньше.

6. Наблюдаемые колебания ДСЧ, по-видимому, были вызваны генерацией в высоких широтах АГВ и последующим их распространением с высоких широт к средним широтам, где располагались средства наблюдения. Скорость волновых возмущений была ~ 275 – 480 м/с, а период был ~ 60 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ИСЗФ. 480 с. 2006.
- *Благовещенский Д.В.* Влияние геомагнитных бурь/суббурь на распространение КВ (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 53. № 4. С. 435–450. 2013.
- *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. М.: Наука. 527 с. 1988.
- *Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Ионосферные возмущения в течение сильнейшей магнитной бури 7–10 ноября 2004 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 47. № 6. С. 761–779. 2007а.
- *Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 // Космічна наука і технологія. Т. 13. № 5. С. 58–76. 2007б. <https://doi.org/10.15407/knit2007.05.058>
- *Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 // Космічна наука і технологія. Т. 13. № 5. С. 77–96. 2007в. <https://doi.org/10.15407/knit2007.05.077>
- *Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Таран В.И., Черногор Л.Ф., Черняев С.В.* Динамические процессы в ионосфере во время сильнейшей магнитной бури 30–31 мая 2003 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 45. № 6. С. 803–823. 2005а.
- *Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Особенности ионосферной бури 20–23 марта 2003 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 45. № 6. С. 789–802. 2005б.
- *Григоренко Е.И., Лысенко В.Н., Таран В.И., Черногор Л.Ф.* Результаты радиофизических исследований процессов в ионосфере, сопровождавших сильнейшую геомагнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Успехи современной радиоэлектроники. № 9. С. 57–94. 2003.

- Гуляева Т.Л. Показатели изменчивости ионосферы во время геомагнитных бурь по наблюдениям GPS // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 2. С. 231–233. 2008.
- Данилов А.Д., Морозова Л.Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 25. № 5. С. 705–721. 1985.
- Данилов А.Д. Реакция области F2 на геомагнитные возмущения (Обзор) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 5. С. 1–33. 2013.
- Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний – прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 1. С. 23–35. 2015.
<https://doi.org/10.12737/5673>
- Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. М.: Мир. 584 с. 1990.
- Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Результаты радиофизических исследований волновых возмущений в нижней ионосфере // Успехи современной радиоэлектроники. № 7. С. 38–56. 2005.
- Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. Физика геокосмических бурь: Монография. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины. 408 с. 2014.
- Черногор Л.Ф., Кацко С.В. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Т. 3. № 19. С. 5–17. 2013.
- Ясюкевич Ю.В., Перевалова Н.П., Едемский И.К., Полякова А.С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография. Иркутск: Изд-во ИГУ. 259 с. 2013.
- Bothmer V., Daglis I. Space weather: Physics and effects. N.Y.: Springer-Verlag. 438 p. 2006. ISBN 3-642-06289-X.
- Bradley P.A., Cander L.R., Kutiev I., Hanbaba R. PRIME (COST 238) studies of Ionospheric storm effects // Adv. Space Res. V. 20. № 9. P. 1669–1678. 1997.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms – a review // Space Sci. Rev. V. 88. P. 563–601. 1999.
- Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., Lysenko V.N., Taran V.I. Dynamic processes in the ionosphere during magnetic storms from the Kharkov incoherent scatter radar observations // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 7. G13001. 2007.
<https://doi.org/10.1029/2005GI000125>
- Danilov A.D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 2. № 3. P. 209–224. 2001.
- Davies K. Ionospheric radio. London: Peter Peregrinus Ltd. 580 p. 1990.
- Galushko V.G., Beley V.S., Koloskov A.V., Yampolski Y.M., Paznukhov V.V., Reinisch B.W., Foster J.C., Erickson P.J. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs // Radio Sci. V. 38. № 6. P. 10-1–10-9. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002RS002861>
- Galushko V.G., Kascheev A.S., Paznukhov V.V., Yampolski Y.M., Reinisch B.W. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves // Radio Sci. V. 43. № 4. P. 1–10. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007RS003735>
- Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., Uryadov V.P., Shumaev V.V. Chirp ionosonde and its application in the ionospheric research // Radiophys. Quant. Electr. V. 46. № 11. P. 821–851. 2003.
<https://doi.org/10.1023/b:raqe.0000028576.51983.9c>
- Laštovička J., Chum J. A review of results of the international ionospheric Doppler sounder network // Adv. Space Res. V. 60. № 8. P. 1629–1643. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.032>
- Mikhailov A.V., Depueva A.H., Depuev V.H. Day-time F2-layer negative storm effect: What is the difference between storm-induced and Q-disturbance events? // Ann. Geophysicae. V. 25. № 7. P. 1531–1541. 2007.
<https://doi.org/10.5194/angeo-25-1531-2007>
- Mlynarczyk J., Koperski P., Kulak A. Multiple-site investigation of the properties of an HF radio channel and the ionosphere using Digital Radio Mondiale broadcasting // Adv. Space Res., V. 49. № 1. P. 83–88. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.09.031>
- Paznukhov V.V., Galushko V.G., Reinisch B.W. Digisonde observation of TIDs with frequency and angular sounding technique // Adv. Space Res. V. 49. № 4. P. 700–710. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.11.012>
- Pictrella M., Perrone L., Fontana G. et al. Oblique-incidence ionospheric soundings over Central Europe and their application for testing now casting and long term prediction models // Adv. Space Res. V. 43. № 11. P. 1611–1620. 2009.
- Pröls G.W. Ionospheric F-region storms / Handbook of atmospheric electrodynamics. 2. Ed. H. Volland. Boca Raton, Fla: CRC Press. P. 195–248. 1995.
- Pröls G.W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere / Magnetic storms. Eds. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Kamide Y., Arballo J.K. // Geoph. Monog. Series. V. 98. Washington, D.C.: AGU. P. 249–290. 1998.
- Rees D. Observation and modeling of ionospheric and thermospheric disturbances during major geomagnetic storms: a review // J. Atmos. Terr. Phys. V. 57. № 12. P. 1433–1457. 1995.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)00142-B](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)00142-B)
- Reinisch B.W., Galkin I.A. Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO). Earth Planets Space. V. 63. № 4. P. 377–381. 2011.
<https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.001>
- Schunk R.W., Sojka J.J. Ionosphere-Thermosphere space weather issues // J. Atmos. Terr. Phys. V. 58. P. 1527–1574. 1996.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(96\)00029-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(96)00029-3)
- Shi S.Z., Chen G., Yang G.B., Li T., Zhao Z.Y., Liu J.N. Wuhan ionospheric oblique-incidence sounding system and its new application in localization of ionospheric irregularities // IEEE T. Geosci. Remote. V. 53. № 4. P. 2185–2194. 2015.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2357443>
- Verhulst T., Altadill D., Mielich J. et al. Vertical and oblique HF sounding with a network of synchronised ionosondes // Adv. Space Res. V. 60. № 8. P. 1644–1656. 2017.
- Vijaya Lekshmi D., Balan N., Vaidyan V.K. et al. Response of the ionosphere to super storms // Adv. Space Res. V. 41. P. 548–555. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.08.029>
- Vijaya Lekshmi D., Balan N., Tulasi Ram S., Liu J.Y. Statistics of geomagnetic storms and ionospheric storms at low and mid latitudes in two solar cycles // J. Geophys. Res. V. 116. A11328. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JA017042>