

Л. Ф. Черногор 

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Украина, г. Харьков
e-mail: leonid.f.chernogor@gmail.com

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ГЕОКОСМИЧЕСКИХ БУРЬ. 2

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 геокосмических бурь. В соответствии с системной парадигмой Л. Ф. Черногора геокосмическая 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 геокосмической бури. Подтверждено большое разнообразие ионосферных и магнитных бурь. Не обязательно 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 аperiодическими вариациями, так и квазипериодическими. Последние вызываются атмосферными гравитационными волнами (периоды ~10–180 мин) и инфразвуком (период менее 5 мин). Из всех составляющих геокосмической 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 аperiодическими 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: геокосмическая буря, магнитная буря, ионосферная буря, магнитометр, ионозонд, многочастотный многотрассовый радиотехнический комплекс, наклонное зондирование ионосферы, доплеровское смещение частоты, доплеровский спектр, амплитуда сигнала, компоненты магнитного поля, концентрация электронов, волновые возмущения

Л. Ф. Черногор

В.Н. Каразин атындағы Харьков ұлттық университеті, Украина, Харьков қ.
e-mail: leonid.f.chernogor@gmail.com

Геоғарыштық дауылдардың физикалық әсері. 2-бөлім

Андатпа. 2018–2019 жылдары болған ең қызықты ионосфералық және магниттік дауылдардың әсерін бақылау нәтижелеріне шолу ұсынылған. Ионосфералық және магниттік дауылдар геоғарыштық дауылдардың құрамдас бөлігі ретінде қарастырылады. Л.Ф.Черногордың жүйелі парадигмасына сәйкес, геоғарыштық дауыл – бұл магнит өрісіндегі (магниттік дауыл), ионосферада (ионосфералық дауыл), атмосферадағы (атмосфералық дауыл) және синергетикалық өзара әрекеттесетін дауылдарға дейін төмендеген күн дауылынан туындаған процестер кешені. электр өрісі атмосфералық-ионосфералық-магнитосфералық шығу тегі (электрлік дауыл). Мысал ретінде нақты магниттік және ионосфералық дауылдарды талдауды пайдалана отырып, жалпы заңдылықтардан басқа, әрбір дауылдың өзіне тән жеке ерекшеліктері бар екендігі көрсетілген. Әрбір жаңа геоғарыштық дауылдың көріністерін жан-жақты зерттеудің мақсатқа сай екендігі расталды. Ионосфералық және магниттік дауылдардың алуан түрлілігі расталды. Әлсіз магниттік

дауыл міндетті түрде әлсіз ионосфералық дауылмен бірге жүрмейді, ал күшті күшті күшті. Фазалар алмасып тұрғанда ионосфералық дауыл бір фазалы (оң немесе теріс) немесе көп фазалы болуы мүмкін. Дауылдар бірнеше сағаттан бірнеше күнге дейін созылуы мүмкін. Дауылдар аперидоттық және квазиперидоттық вариациялармен бірге жүреді. Соңғылары атмосфералық гравитация толқындары (перидоттар ~10–180 мин) және инфрадыбыс (перидот 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 шектейді (телекоммуникациялар, радионавигация, радиолокаторлар, қашықтықтан радиозондылау, радиоастрономия). Ионосфералық дауылдар көп жолдың пайда болуымен, Доплер спектрлерінің кеңеюімен (тіпті олардың құлдырауымен), Доплер жиілігінің ығысуындағы маңызды аперидоттық және квазиперидоттық өзгерістермен, радиосигналдардың амплитудасымен және радио траекторияларымен бірге жүретіні көрсетілген. декаметрлік диапазондағы толқындар. 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 квазиперидоттық 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, көпжиілікті көпжолды радиотехникалық кешен, ионосфераның қиғаш зондтауы, жиіліктің доплерлік ығысуы, доплерлік спектр, сигнал амплитудасы, магнит өрісінің құрамдас бөліктері, электрондардың концентрациясы, толқынның бұзылуы.

L. F. Chernogor
Kharkiv National University., Ukraine, Kharkov
e-mail: leonid.f.chernogor@gmail.com

Physical effects of geocosmic storms. Part 2

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 ~10–180 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, multifrequency multipath radio engineering complex, oblique sounding of the ionosphere, Doppler

frequency shift, Doppler spectrum, signal amplitude, magnetic field components, electron concentration, wave disturbances.

Введение

В части 1 этой работы представлен обзор взаимосвязи солнечно-земных процессов, проявлений геокосмических бурь и вариаций атмосферно-космической погоды [1]. Эффекты геокосмических бурь проанализированы с позиций системной парадигмы. Системой, в которой развиваются геокосмические бури, является объект Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (внутренние оболочки) (СМСМИАЗ). Отмечалось, что исследование физических эффектов геокосмических бурь (ГБ) – важнейшее научное направление в космической геофизике. Обосновано, что проблема взаимодействия подсистем в системе СМСМИАЗ в течение ГБ – междисциплинарная, для ее решения требуется системный подход. Показано, что проблема носит многофакторный характер. Реакция подсистем определяется одновременным (синергетическим) воздействием ряда возмущающих факторов. Важно, что система СМСМИАЗ – открытая, нелинейная и нестационарная. В ней обнаруживаются прямые и обратные, положительные и отрицательные связи. Ввиду многогранности проявлений геокосмических бурь, из-за уникальности каждой бури изучение физических эффектов геокосмических бурь далеко до завершения. Кроме задач всестороннего исследования физических эффектов геокосмических бурь, во весь рост стоят задачи их детального адекватного моделирования и прогнозирования. Их решение будет способствовать выживанию и устойчивому развитию нашей цивилизации, овладевающей все более совершенными и сложными технологиями. Чем больше будет технологическое развитие землян, тем больше будет уязвима инфраструктура цивилизации к воздействиям солнечных и геокосмических бурь. В работах [2, 3] предложена классификация ГБ по величине функции Акасофу. Введено шесть типов и

предложен индекс ГБ. Предложена классификация ионосферных бурь (ИБ) и возмущений по величине изменения концентрации электронов в максимуме слоя F2. Введено пять типов ИБ. Предложен ионосферный индекс, описывающий интенсивность отрицательных и положительных ионосферных бурь. Предложена классификация ионосферных бурь и возмущений по величине изменения концентрации электронов в нижней ионосфере. Введено шесть типов положительных ИБ. Предложен соответствующий ионосферный индекс. Установлена физическая схема развития каждой группы ионосферных бурь и возмущений. Показана взаимосвязь магнитной, ионосферной, атмосферной и электрической бурь.

В части 2 будут детально рассмотрены геокосмические бури, имевшие место в 2018–2019 гг. Приведены результаты наблюдений эффектов этих бурь.

Ввиду большой практической значимости основное внимание в многочисленных работах уделено изучению особенностей ионосферных бурь и меньшее внимание – особенностей магнитных бурь [4–108]. Одни из работ стали классическими [4, 6, 9, 10, 12, 14, 18, 20, 28, 30, 39]. В других работах изучались особенности отдельных ИБ. Значительное внимание уделялось ионосферным супербурям, которые имели место 19–20 ноября 2003 г., 7–8 ноября 2004 г. и 9–11 ноября 2004 г. (см., например, [25–27, 29, 31–36, 41, 109]). В последнее время много публикаций посвящено наиболее сильной буре 24-го цикла солнечной активности, имевшей место 17–18 марта 2015 г. [42–57, 63, 65, 67, 70, 75, 76, 79–81, 96, 97], а также по-своему уникальной буре 7–8 сентября 2017 г. [64, 66, 68, 72–74, 82–84, 93, 94]. Заметно меньшее внимание уделялось более слабым бурям [86–88, 98, 102, 105–109].

Основное внимание мы посвятим не выдающимся бурям, число которых намного больше, чем число уникальных бурь.

Практическая значимость исследования геокосмических и, в частности, ионосферных бурь, заключается в определяющем их влиянии на распространение радиоволн почти всех диапазонов и, в первую очередь, на распространение ВЧ радиоволн, на работу радиолиний и радиосистем различного назначения [58, 59, 68, 72, 74, 78, 80, 89, 92, 96, 105–107, 110].

Ионосферная буря – одна из составляющих геокосмической бури. Обычно ионосферная буря сопровождается магнитной бурей, значительными возмущениями параметров нейтральной атмосферы (атмосферной бурей) и электрического поля атмосферного, ионосферного и магнитосферного происхождения (электрической бурей) [1–3].

Ионосферным бурям посвящено большое количество работ (см., например, [4–108]). Бури сильнее всего проявляются в высоких широтах, меньше – на средних широтах, но эффекты бурь наблюдаются даже в низких широтах. Различают положительные и отрицательные ионосферные бури (см., например, [6]).

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, электрическое поле и т. д.

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.

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

Во время бурь активизируется взаимодействие подсистем в системе Солнце – межпланетная среда – магнитосфера – ионосфера – атмосфера – Земля (СМСМИАЗ) [1–3].

Добавим, что проявления ИБ отличаются большим разнообразием. 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. [1–3]. Можно утверждать, что нет двух подобных ионосферных бурь. Естественно, что сильная магнитная буря сопровождается сильной ИБ, а слабая – слабой бурей. Удивительно, что сильная магнитная буря может сопровождаться слабой ионосферной бурей (или ее отсутствием) и наоборот [1–3]. Поэтому представляет значительный интерес детальное изучение каждой новой ИБ, в том числе достаточно сильной. Ионосферные бури прошлых лет описаны в целом ряде работ автора настоящей статьи [22–24, 29, 31–36, 92, 105–110], а также суммированы в монографии [2].

Эффекты геокосмической бури 26 августа 2018 г.

Общие сведения

Особенность этого раздела 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 ИБ [105]. Этой буре посвящены также работы [86–88, 98, 102].

ИБ существенно возмущают ионосферный радиоканал. Эти возмущения оказывают значительное воздействие на характеристики радиоволн почти всех диапазонов (от мириаметровых до сантиметровых). Больше всего влиянию подвержены декаметровые (ВЧ) радиоволны. Во время отрицательных ИБ 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 поглощения радиоволн различных диапазонов [110]. Радиофизические эффекты ИБ в настоящее время изучены недостаточно [58, 59, 68, 72, 74, 78, 80, 89, 92, 96, 105–107, 110].

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

Для изучения ИБ используются мировая сеть ионозондов [65, 71, 100, 104], радары некогерентного рассеяния [22–24, 29, 31–36, 93], GPS-технология [48, 49, 58, 75, 82, 87], наклонное зондирование ионосферы (НЗИ) [68, 72, 74, 92, 105–110] и другие средства [67, 91, 102]. 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 ИБ 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 настоящего раздела – изложение результатов наблюдения при помощи когерентного многотрассового радиотехнического комплекса радиофизических и геофизических эффектов ИБ, имевшей место 26 августа 2018 г. [105].

Средства наблюдения

В соответствии с Договором о научно-техническом сотрудничестве, заключенном Харьковским национальным университетом имени 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 [92, 105–108].

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

В настоящее время комплекс работает в диапазоне частот $f \approx 5 - 10$ МГц. Количество радиотрасс и их ориентация определяются кругом решаемых задач. Для исследования эффектов данной ионосферной бури

использовались 7 из 14 радиотрасс, схематически изображенных на рис. 1. Основные сведения об этих трассах приведены в табл. 1.

Методика обработки

Для мониторинга быстро протекающих ионосферных процессов для каждой из трасс измерялись доплеровские смещения частоты (ДСЧ) и амплитуда сигнала. Применение авторегрессионного анализа [111] 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.

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 см⁻³)

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 $5 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^5$ 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 K_p – от ~1 до 7, а D_{st} -индекс сначала увеличился от ~0 до ~20 нТл, а после 17:00 25 августа 2018 г. стал уменьшаться примерно до –170 нТл. Отрицательные значения D_{st} -индекса имели место в течении еще нескольких суток. Новый

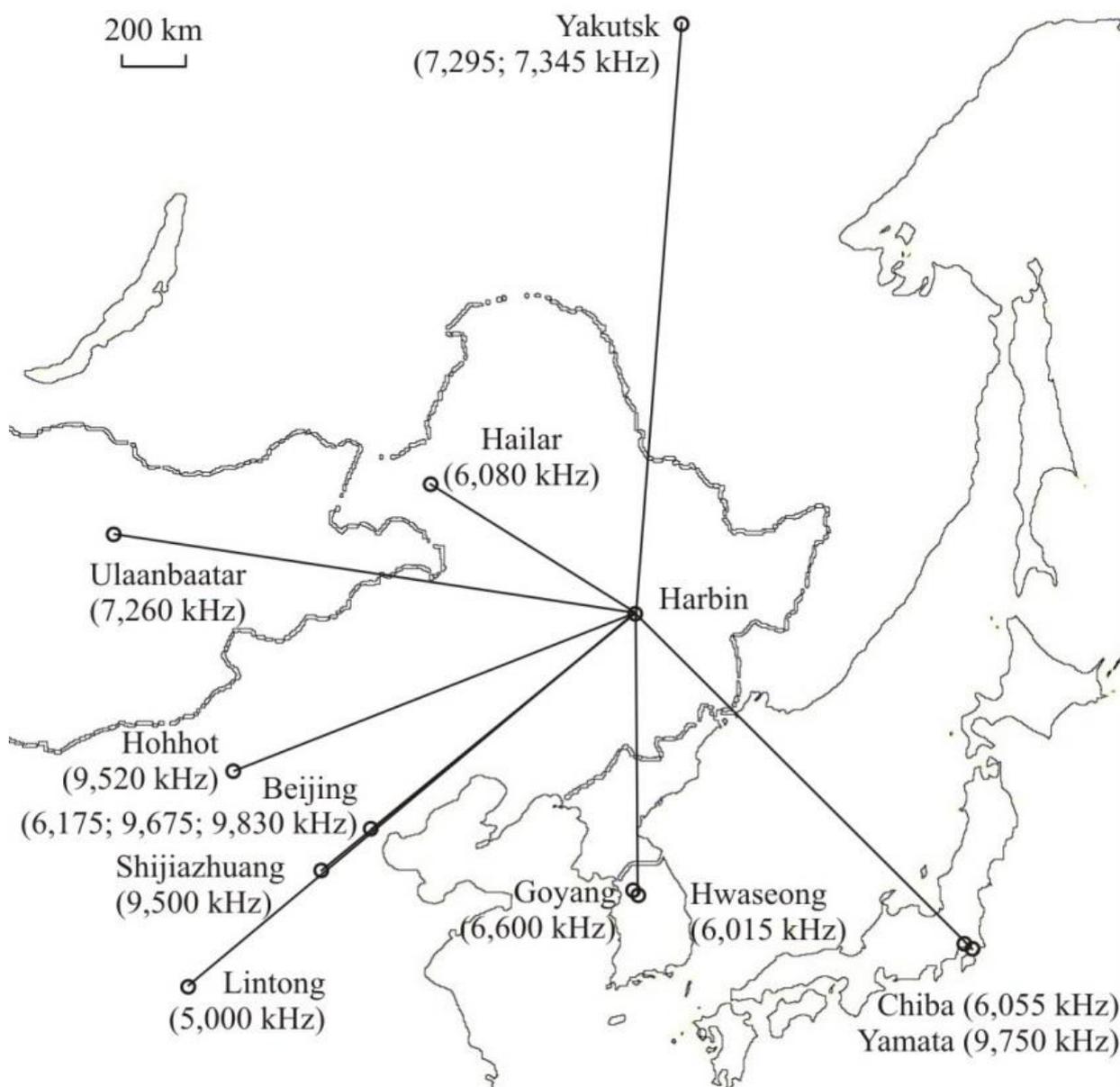


Рисунок 1 – Схема приемника и передатчиков. Схематическое изображение путей распространения между приемной системой в городе Харбин и передатчиками в разных местах, которые использовались для наблюдения эффектов ионосферных бурь.

рост индекса K_p 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) [URL <https://lgdc.uml.edu/common/DIDBYearListForStation?ursiCode=IC437>]. На рис. 3 приведена временная зависимость критической частоты слоя F_2 . Из рис. 3

видно, что примерно с 22:00 25 августа 2018 г. и до 14:00 26 августа 2018 г. значения частоты f_oF_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 ИБ. Более того, она сопровождалась неоднократными уменьшениями на 1.5–2 МГц значений f_oF_2 . Это означает, что ионосферная буря была многофазной: положительные всплески f_oF_2 сменялись отрицательными провалами в зависимости $f_oF_2(t)$.

Таблица 1. Основные сведения о радиотрассах

Частота, кГц	Координаты передатчика, Широта/ Долгота	Месторасположение (страна)	Расстояние до Харбина, км	Координаты середины трассы, Широта/ Долгота
5000	34.95°N/ 109.56°E	Lintong/ Pucheng (China)	1875	40.37°N 118.12°E
6015	37.21°N/ 126.78°E	Hwaseong (Korea)	950	41.50°N 126.73°E
6055	35.47°N/ 140.21°E	Chiba/ Nagara (Japan)	1610	40.63°N 133.45°E
6080	49.18°N/ 119.72°E	Hailar/ Nanmen (China)	645	47.48°N 123.2°E
6175	39.75°N/ 116.81°E	Beijing (China)	1050	42.77°N 121.75°E
6600	37.60°N/ 126.85°E	Goyang (Korea)	910	41.69°N 126.77°E
7260	47.80°N/ 107.17°E	Ulaanbaatar/K hon-khor (Mongolia)	1496	46.79°N 116.93°E
7295	62.24°N/ 129.81°E	Yakutsk (Russia)	1845	54.01°N 128.25°E
7345	62.24°N/ 129.81°E	Yakutsk (Russia)	1845	54.01°N 128.25°E
9500	38.47°N/ 114.13°E	Shijiazhuang (China)	1310	42.13°N 120.41°E
9520	40.72°N/ 111.55°E	Hohhot (China)	1340	43.25°N 119.12°E
9675	39.75°N/ 116.81°E	Beijing (China)	1050	42.77°N 121.75°E
9750	36.17°N/ 139.82°E	Yamata (Japan)	1570	40.98°N 133.25°E
9830	39.75°N/ 116.81°E	Beijing (China)	1050	42.77°N 121.75°E

Результаты зондирования ионосферы наклонного

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.

Рассмотрим радиотрассу Hwaseong – Harbin. Радиостанция, излучающая на частоте 6015 кГц, находится в Республике Корея. Расстояние между радиопередатчиком и радиоприемными 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 $f_D \approx 0$ 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 $f_D \approx 0$ 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 $f_{Da} \approx 0.15 - 0.20$ 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 $f_D < 0$. Сигнал был практически одномодовым. Перед заходом Солнца $f_{Dmin} \approx -0.5$ Гц. В

интервале

времени 10:00 – 12:00 постоянная

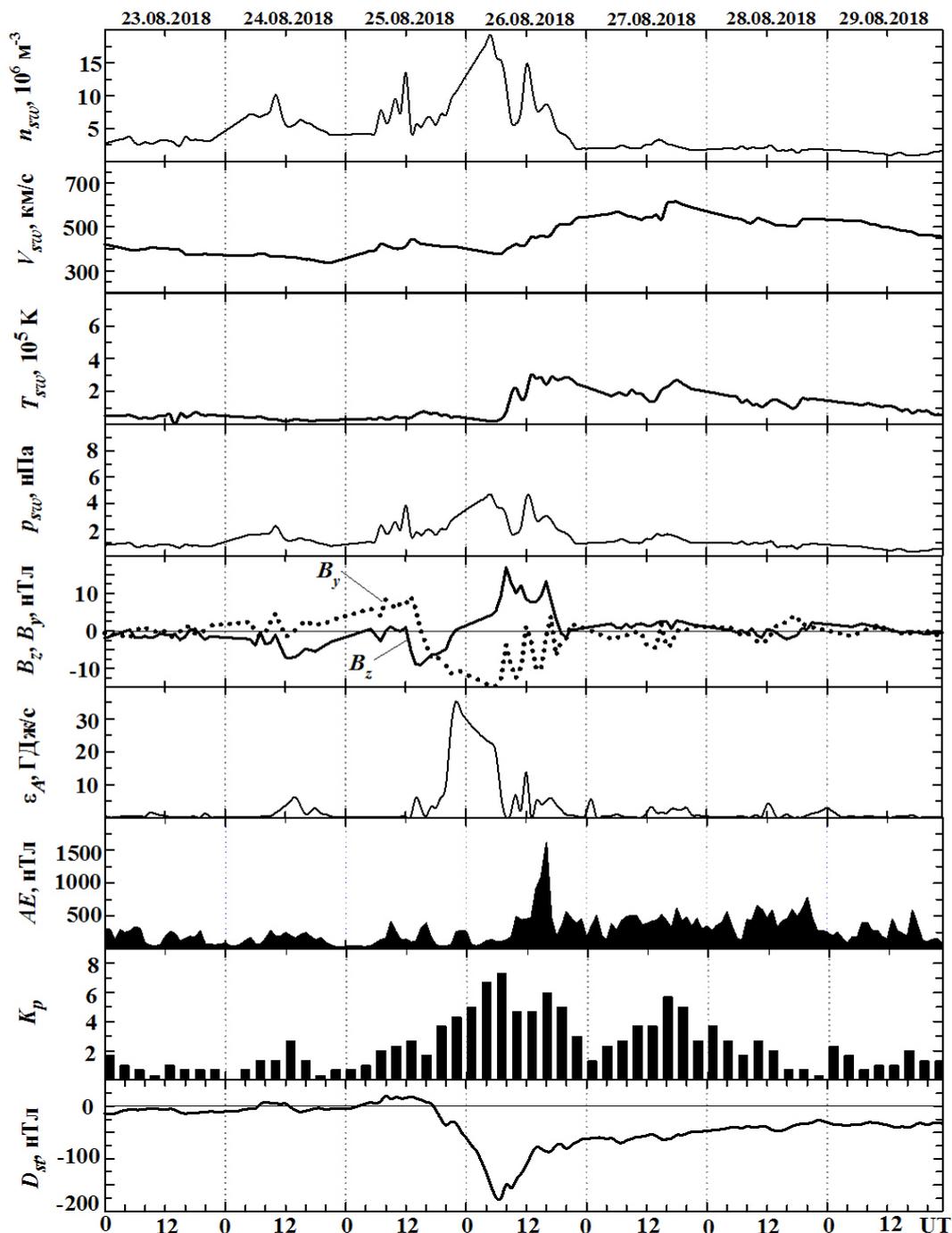


Рисунок 2 – Временные вариации основных параметров, описывающих состояние космической погоды (панели сверху вниз): временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации n_{sw} , радиальной скорости V_{sw} , температуры T_{sw} [Space Weather Prediction Center. National Oceanic and Atmospheric Administration], 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], рассчитанных значений энергии ϵ_A , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, AE -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto.], K_p -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto.], D_{st} -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto] в течение 23 – 29 августа 2018 г.

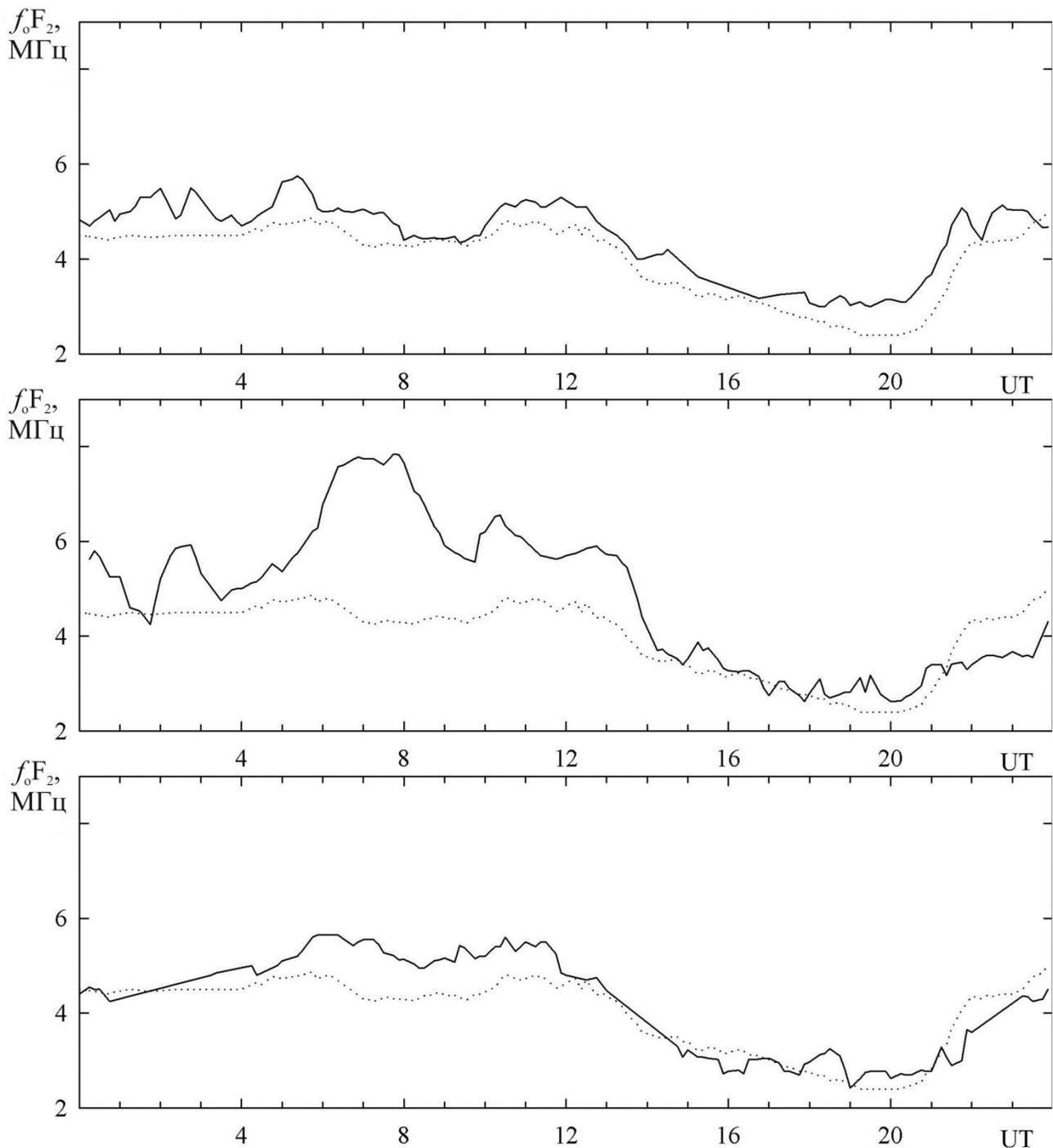


Рисунок 3 – Временные вариации частоты f_oF_2 (панели сверху вниз) 25, 26, и 27 августа 2018 г., измеренные на ионозонде, функционирующей в Республике Корея. Точки соответствуют временным вариациям частоты f_oF_2 28 августа 2018 г. (контрольные сутки).

составляющая ДСЧ $\bar{f}_D \approx -0.35$ Гц.
 Наблюдалось квазипериодическое колебание ДСЧ с $T \approx 60$ мин, $f_{Da} \approx 0.35$ Гц, $\Delta T \approx 160$ мин. В 12:20 ДСЧ резко увеличилось от -0.3 до $f_{Dmax} \approx 0.8$ Гц. Затем наблюдалось постепенное уменьшение f_D до

0 Гц, которое имело место примерно в 14:00. При этом на медленные вариации накладывалось квазипериодическое колебание с $T \approx 60$ мин и $f_{Da} \approx 0.2$ Гц. В интервале времени 14:00 – 16:40 амплитуда сигнала уменьшилась почти на порядок. Примерно через 1 час после

Радиотрасса Hwaseong – Harbin (6015 кГц)

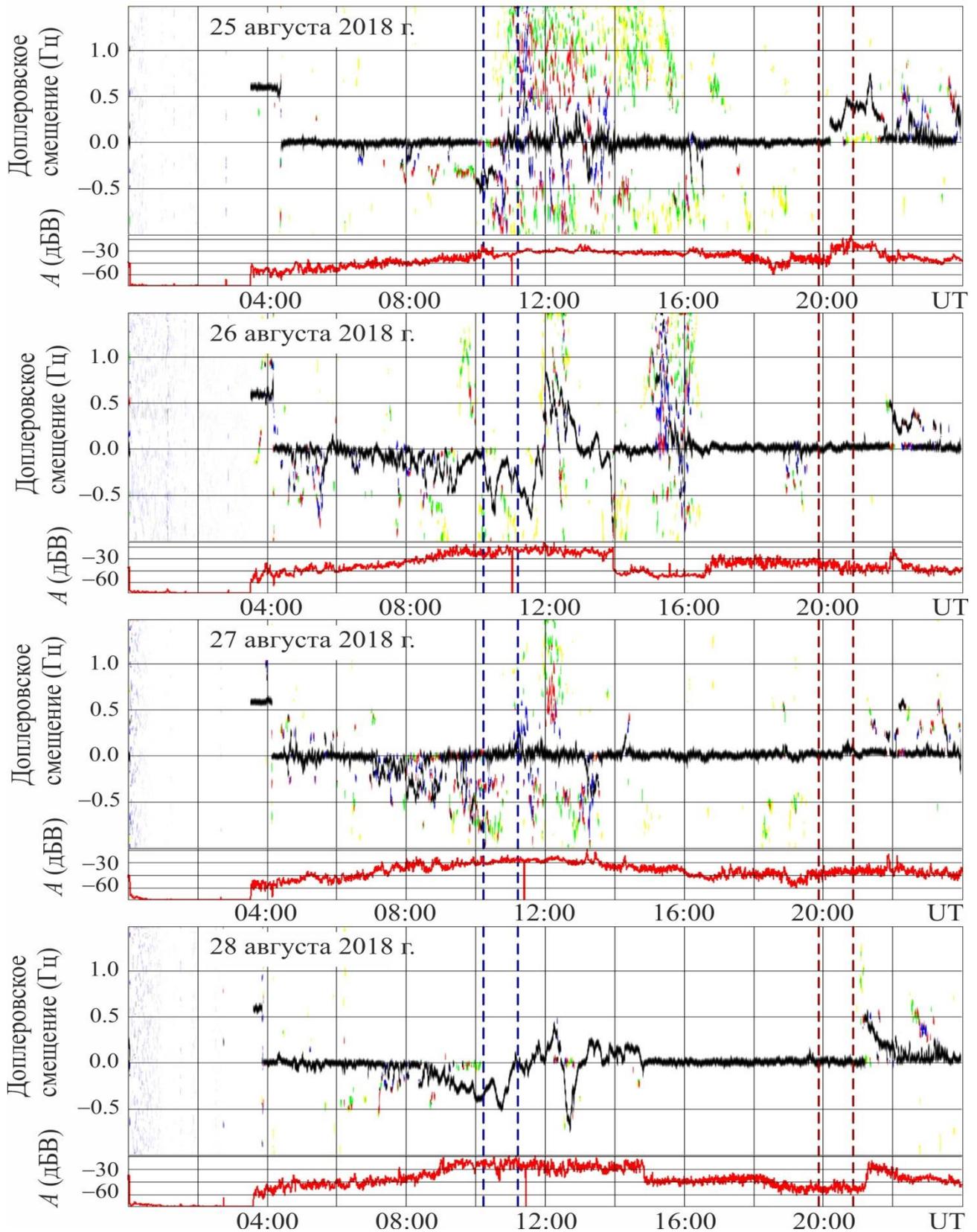


Рисунок 4 – Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Hwaseong – Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г. Вертикальными штриховыми линиями здесь и далее показаны моменты захода и восхода Солнца на высоте 0 и 100 км, а также 100 и 0 км соответственно.

восхода Солнца на уровне Земли наблюдалось увеличение ДСЧ и амплитуды сигнала. Это продолжалось ~50 – 60 мин.

27 августа 2018 г. почти все время $f_D \approx 0$ Гц. С 08:00 и до 13:30 наблюдалась многомодовость сигнала. При этом уровень флуктуаций ДСЧ достигал ± 1.5 Гц. В ночное время $f_D \approx 0$ Гц. Незначительное усиление многомодовости отмечалось после восхода Солнца.

28 августа 2018 г. в дневное и ночное время $f_D \approx 0$ 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 $f_D \approx 0.1$ Гц. С 10:00 и до 15:00 амплитуда квазипериодических колебаний изменялась от 0.1 до 0.5 Гц. В ночное время $f_D \approx 0$ Гц. После восхода Солнца, точнее в интервале времени 21:00 – 22:00, наблюдались скачки как ДСЧ, так и амплитуды.

Опишем эффекты на радиотрассе 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 $\overline{f_D}$ уменьшалось от 0 до -0.6 Гц. На медленное уменьшение ДСЧ накладывались квазипериодические вариации с $T \approx 60$ мин и $f_{Da} \approx 0.2$ Гц. Примерно с 10:00 и до 15:00 наблюдался полный «развал» ДС. 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 $f_{Da} \approx 0.15 – 0.40$ Гц. С 08:00 и до 12:00 отмечался полный развал ДС. С 12:00 и до 15:00 уверенно

регистрировалось колебание ДСЧ основной моды с $T \approx 60$ мин и $f_{Da} \approx 0.3 – 0.4$ Гц.

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

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

Охарактеризуем эффекты на радиотрассе Nailar – 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 ДС 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 наблюдался «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» ДС наблюдался с 16:00 до 20:00.

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

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

«Развал» ДС 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.

Рассмотрим радиотрассу 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. ДС были диффузными (рис. 7). В период восхода Солнца четко выделялась основная мода.

Радиотрасса Chiba – Harbin (6055 кГц)

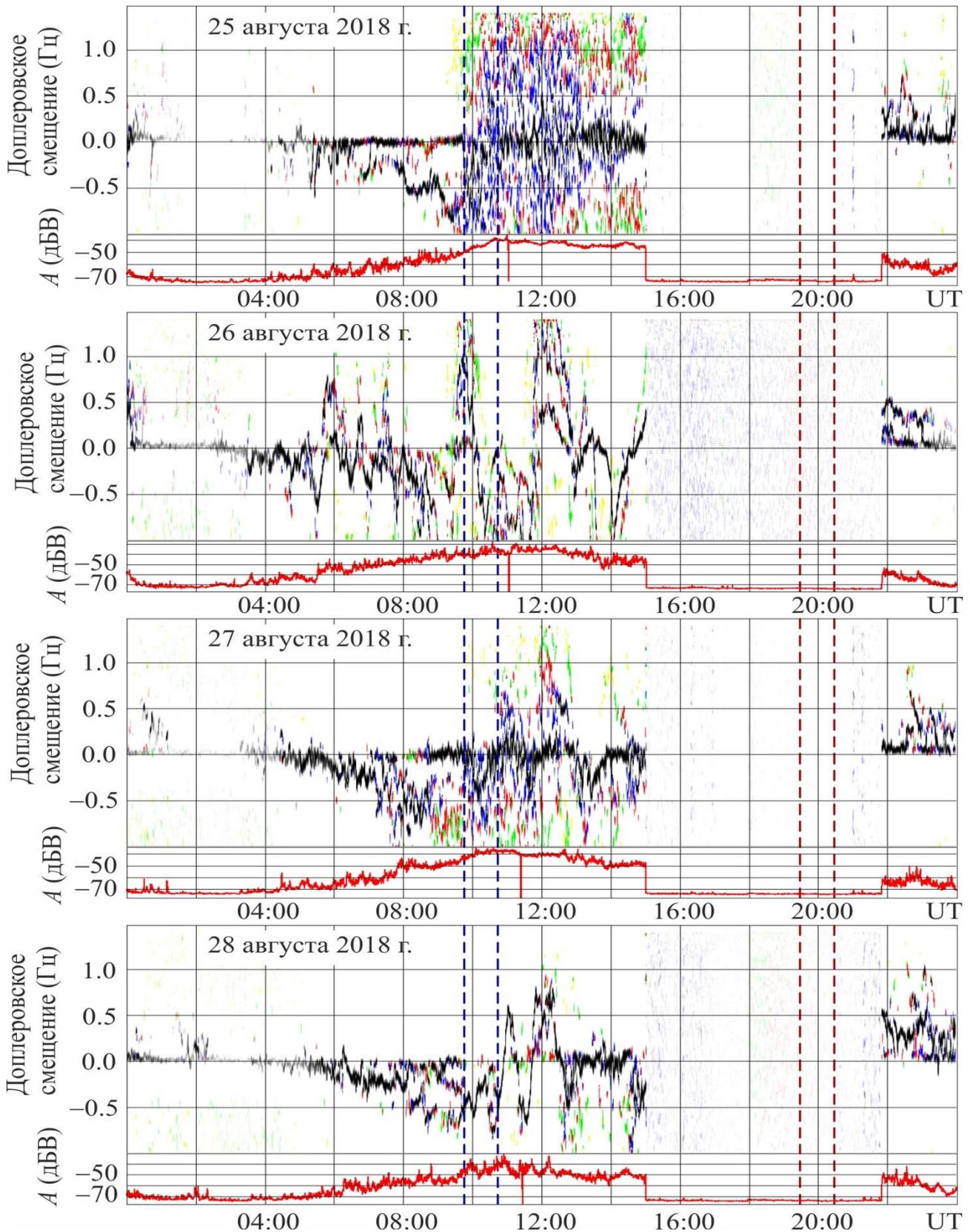


Рисунок 5 – Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Chiba – Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

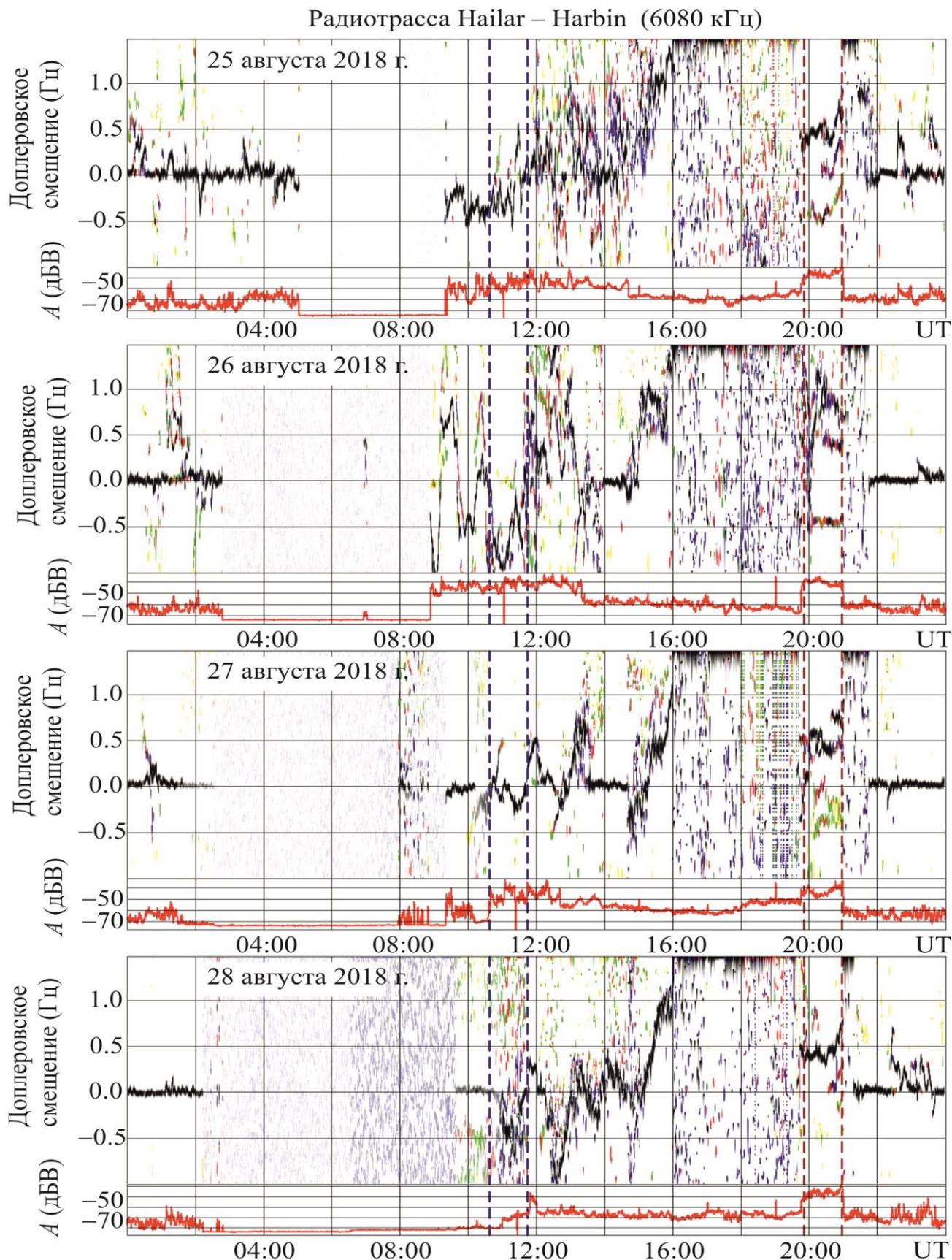


Рисунок 6 – Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Nailar – Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.
Beijing – Harbin (6175 кГц)

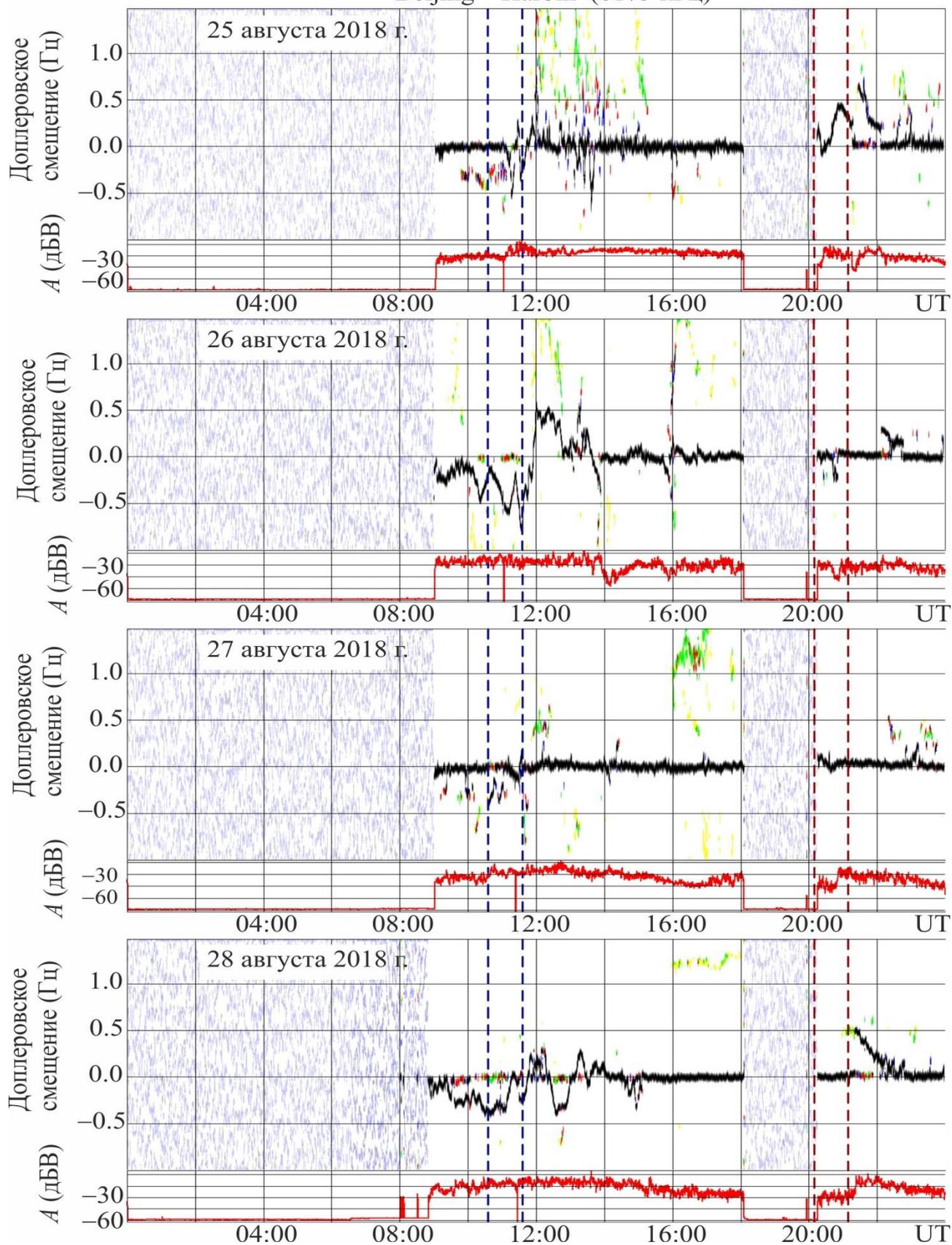


Рисунок 7 – Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Beijing – Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

26 августа 2018 г. ДС были практически однододовыми. С 10:00 и до 12:00 $\overline{f_D} \approx -0.3$ Гц. Период квазипериодического колебания $T \approx 50$ мин, $f_{Da} \approx 0.25$ Гц. В 12:00 имел место резкий скачок ДСЧ от -0.2 до 0.2 Гц. Далее в течение 2 часов значения $\overline{f_D}$ уменьшались от 0.5 до 0 Гц. На медленные вариации $\overline{f_D}(t)$ накладывался квазипериодический процесс с $T \approx 20$ мин и $f_{Da} \approx 0.1 - 0.2$ Гц. В интервалах времени 14:00 – 18:00 и 20:00–24:00 $\overline{f_D} \approx 0$ 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 ДС были практически однододовыми и $\overline{f_D} \approx 0$ 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 ДСЧ накладывалось колебание с $T \approx 20$ мин и $f_{Da} \approx 0.1$ 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_D до 0.5 Гц наблюдалось вскоре после восхода Солнца на уровне Земли.

Опишем эффекты на радиотрассе 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 $\overline{f_D} < 0$ Гц. С 08:00 и до 13:30 отмечалось квазипериодическое колебание ДСЧ с $T \approx 30$ мин и $f_{Da} \approx 0.1-0.2$ 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 $f_{Da} \approx 0.2$ 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 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.

Дадим характеристику эффектов на радиотрассе 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 $f_D \approx 0$ 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, $f_D \approx 0$ 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 значительными (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.

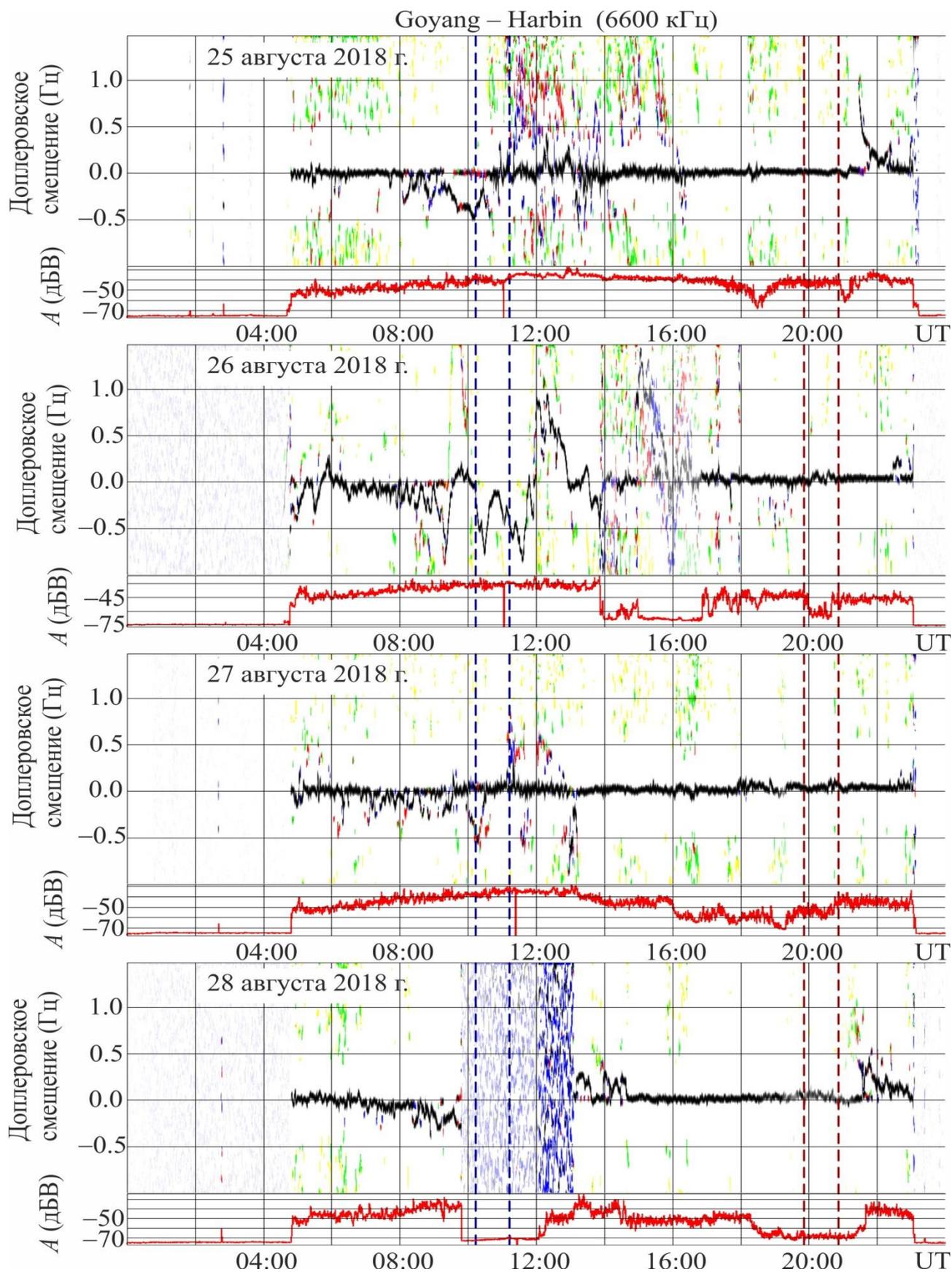


Рисунок 8 – Временные вариации ДС и амплитуды А на радиотрассе Goyang – Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

Радиотрасса Hohhot – Harbin (9520 кГц)

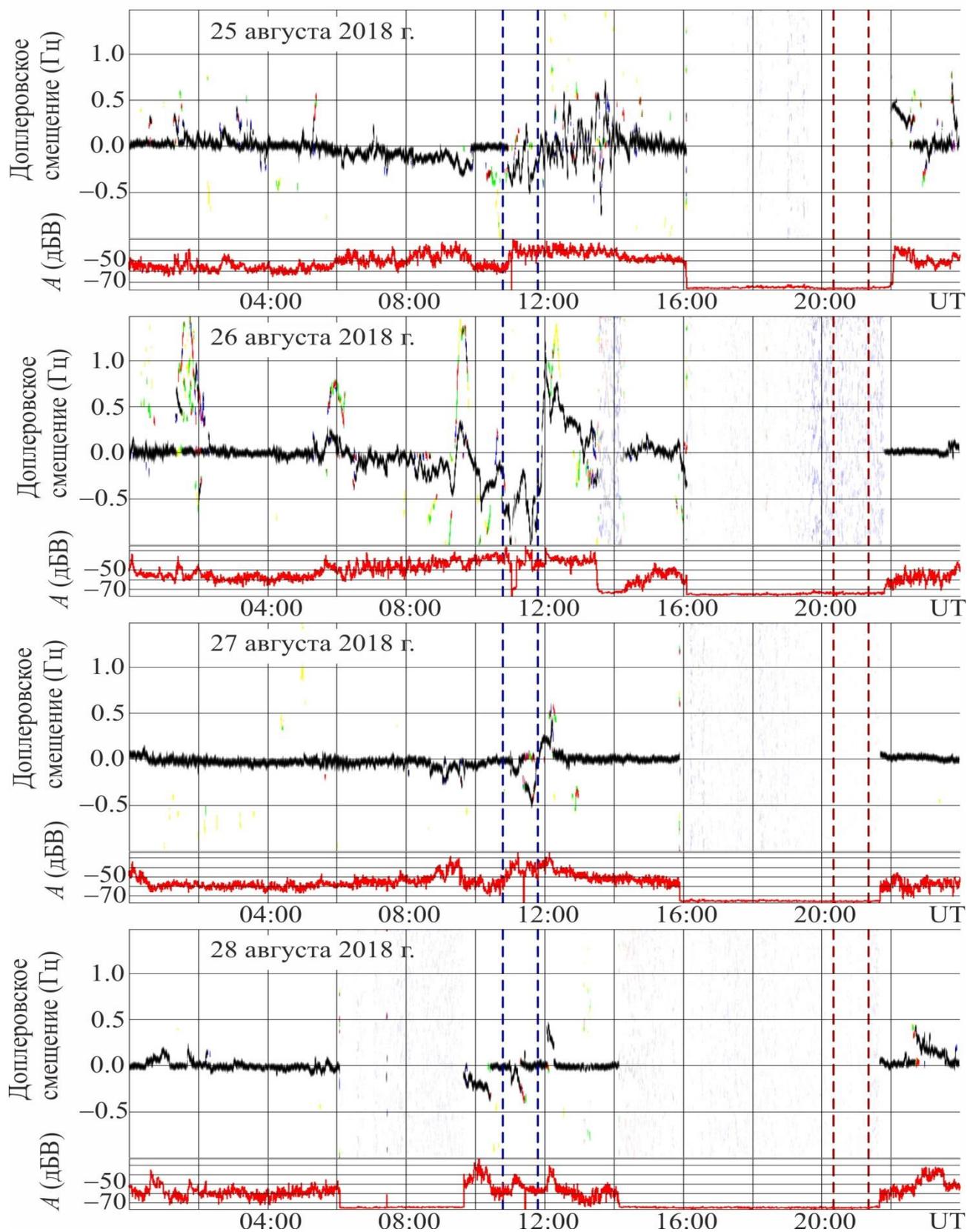


Рисунок 9 – Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Hohhot – Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

С 12:00 и до 13:30 величина ДСЧ уменьшалась от 0.8 до 0 Гц. Далее наблюдались несущественные 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_D и A были заметными лишь в течение захода Солнца.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе 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 $f_D \approx -0.5$ 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 $f_{Da} \approx 0.4 - 0.9$ Гц. При этом $\overline{f_D} \approx -0.4$ 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.

Обсуждение

Рассмотрим связь вариаций ДС с ИБ. ИБ, последовавшая за уменьшением D_{st} -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 [2–6, 20].

Процессы в области отражения радиоволны, например, на частоте 9520 кГц, наблюдались примерно 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, 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.

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 $K_{pmax} \approx 5$ и $D_{stmin} \approx -50$ нТл. Ионосферные возмущения при этом были существенно меньшими, чем 26 августа 2018 г.

Оценим возмущения в ионосфере. Как уже отмечалось, состояние ионосферы контролировалось при помощи ионозонда DPS-4, расположенного в Республике Корея. Анализировались 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 ИБ
либо величину уменьшения N во время
отрицательных ИБ, величину сдвига области

отражения радиоволн и параметры
квазипериодических вариаций N .

Радиотрасса Yamata – Harbin (9750 кГц)

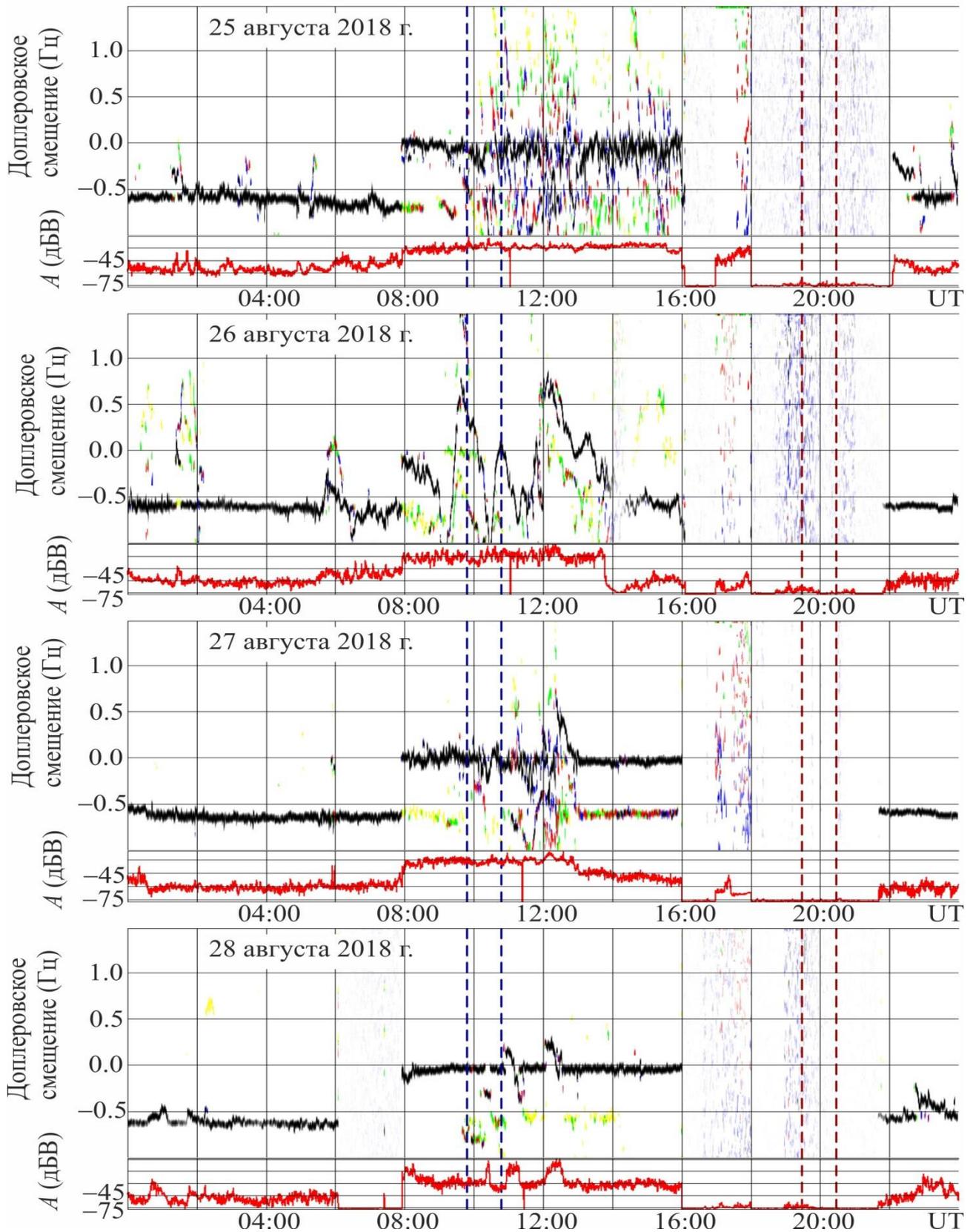


Рисунок 10 – Временные вариации ДС и амплитуды A на радиотрассе Yamata – Harbin (панели сверху вниз): 25, 26, 27 и 28 августа 2018 г.

ДСЧ f_D связано с показателем преломления n ионосферной плазмы следующим образом [112]:

$$f_D = -\frac{f}{c} \frac{d}{dt} \int_s n(s) ds, \quad (1)$$

где f – частота радиоволны, c – скорость света в вакууме, s – траектория радиоволны. Здесь

$$n = 1 - \frac{f_p^2}{f^2}, \quad (2)$$

где

$$f_p^2 = \frac{e^2 N}{4\pi^2 \epsilon_0 m} \quad (3)$$

плазменная частота электронов, e и m – заряд и масса электрона, ϵ_0 – электрическая постоянная.

Как известно, при распространении радиоволны с частотой f в сферически слоистой изотропной ионосфере без поглощения условие отражения описывается скорректированным законом секанса (см., например, [92, 105–108]):

$$f = k f_p(z_r) \sec \theta, \quad (4)$$

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

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2(z_r - z_0)^2}{2r_0 z_r^2}}} \quad (5)$$

коэффициент, учитывающий сферичность ионосферы. Здесь R – длина радиотрассы; $r_0 \approx 6400$ км – радиус Земли, $z_0 \approx 60$ км – высота начала ионосферы.

Подставляя (5) в (4), получим соотношение для оценки высоты отражения по известной зависимости $f_p(z)$:

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

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. 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

$$f_D = -2 \frac{f}{c} v \cos \theta. \quad (6)$$

Из (6) получаем скорость:

$$v = -\frac{c}{2} \frac{f_D}{f \cos \theta}. \quad (7)$$

Поскольку в процессе движения области отражения изменяется угол θ , при оценке v по соотношению (7) необходимо вычислять среднее значение $\cos \theta$.

Подъем и опускание области отражения радиоволн. Зная $v(t)$, можно оценить смещение области отражения радиоволны по высоте:

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

где ΔT – продолжительность изменения $f_D(t)$, f_{Dm} – экстремальное значение f_D на интервале времени ΔT .

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

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

$$\frac{N}{N_0} \approx 1 + \frac{\Delta z_r}{L}, \quad (8)$$

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 ИБ концентрация электронов в F -области ионосферы увеличилась в 3 раза. Во время отрицательных ИБ 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_{Dm} , а затем при его

уменьшении до 0 за время ΔT справедливо следующее приближенное выражение:

Таблица 2. Основные параметры ДСЧ и ионосферы

f , кГц	6015	6055	6080	6175	6600	9520	9750
f_{Dmin} , 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
f_{Dmax} , 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_{Da} , 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

$$\frac{N}{N_0} \approx 1 + \frac{c\Delta T k^2 f_{Dm}}{4L_n k_\theta f},$$

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

$$k_\theta = \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta}$$

определяется траекторией радиоволны.

Из рис. 9 видно, что в интервале времени 05:35 – 06:48 наблюдались всплески ДСЧ с $f_{Dm1} \approx 0.25$ Гц и $f_{Dm2} \approx 0.75$ Гц. Им соответствуют радиолучи, отражающиеся от E - и F -областей соответственно.

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

При отражении радиоволны от F -области $z_r \approx 160$ км, $\Delta T \approx 2 \cdot 10^3$ с, $k \approx 0.73$, $\cos \theta \approx 0.23$, $k_\theta \approx 0.11$ получаем $N/N_0 \approx 2.9$. По данным ионозонда вблизи этого момента времени $N/N_0 \approx 3$. При оценке N/N_0 считалось, что критическая частота $f_oF_2 \approx 7.8$ МГц, ее невозмущенное значение составляло 4.5 МГц (см. рис. 3). В течение отрицательных ИБ $N/N_0 \approx 0.3 – 0.6$.

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

Можно утверждать, что сильная магнитная буря сопровождалась достаточно сильной ИБ.

Волновые возмущения в ионосфере. ИБ сопровождалась значительным усилением колебаний ДСЧ с периодом $T \approx 60$ мин

и амплитудой $f_{Da} \approx 0.3 – 0.5$ Гц (см., например, рис. 6–8, 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 dD_{st}/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 $\Delta t \approx 6 – 4$ часов. 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 $\sim 40–45^\circ N$. Тогда $\Delta \varphi \approx 25–30^\circ$. 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. При этом $D \approx 6000 - 7000$ км. Тогда горизонтальная скорость движения волн

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

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

Как уже отмечалось, усиление волновых возмущений имело место в интервале времени ~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

$$f_D(t) = f_{Da} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \quad (9)$$

из (9) с учетом (7) получим, что

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

Здесь f_{Da} – амплитуда колебаний ДСЧ, v_a – амплитуда колебаний скорости вертикального движения:

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

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

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

Результаты оценок Δz_a по соотношению (12) также приведены в табл. 2. Из табл. 5 видно, что амплитуда Δz_a – значительна.

Полагая, что при колебаниях высоты отражения радиоволн справедливо соотношение, аналогичное (8), 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} изменялись от 0.5 до 0.9.

Таким образом, обсуждаемая ИБ качественно и количественно отличается от «типичной» (т.е. однофазной) ионосферной бури. Это еще раз подтверждает тезис об отсутствии двух одинаковых ИБ, об индивидуальности каждой бури.

Перечислим основные результаты исследований эффектов геокосмической бури 26 августа 2018 г.

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 ($K_p = 7$) геомагнитной бури 25 – 26 августа 2018 г.

2. Выявлены аperiodические и квазипериодические вариации ДСЧ. Ионосферная буря привела к усилению многолучевости, уширению ДС, существенному смещению траекторий радиоволн. Показано, что величина знакопеременных аperiodических 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 часов (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 $\sim 275 - 480$ м/с, а период был ~ 60 мин.

Эффекты геокосмической бури 14 мая 2019 г.

Цель настоящего раздела – изложение результатов наблюдений при помощи многочастотного многотрассового комплекса наклонного зондирования ионосферы Харбинского инженерного университета эффектов ионосферной бури над Китаем, имевшей место 14 мая 2019 г. [92].

Средства наблюдения

Для исследования эффектов геокосмической бури использовался многочастотный многотрассовый программно-аппаратный комплекс наклонного зондирования ионосферы Харбинского инженерного университета, описанный в работах [92, 104–108]. В качестве радиопередающих устройств используются широкоэмиттерные станции, дислоцированные в Китае, Южной Корее, Японии, России и Монголии. Радиоприемная и регистрирующая части комплекса находятся на территории Харбинского инженерного университета (45.78°N , 126.68°E).

Непрерывный мониторинг динамических процессов в ионосфере осуществляется на 14 радиотрассах в

диапазоне частот 5 – 10 МГц (см. рис. 1). Параметры радиопередающих устройств и радиотрасс приведены в табл. 1.

Для мониторинга динамических процессов в ионосфере для каждой радиотрассы вычислялись временные зависимости доплеровских спектров (доплерограммы) и амплитуды сигнала. По доплерограммам строились временные зависимости доплеровского смещения частоты $f_D(t)$ для основной или нескольких мод.

Для спектрального анализа использовалась авторегрессионная техника [111]. Это позволило достичь разрешающей способности по частоте, равной 0.02 Гц при интервале обработки, равном приблизительно 20 с. Разрешающая способность по времени составляла 7.5 с.

Далее по зависимостям $f_D(t)$ вычислялись тренды $\bar{f}_D(t)$, флуктуации $\delta f_D(t) = f_D(t) - \bar{f}_D(t)$, производился спектральный анализ на интервалах времени 60 – 120 мин, выделялись гармоники с периодом $T \leq 5$ мин, а также с $T = 10 - 30$ мин.

Особенностью радиозондирующих сигналов является то, что они излучаются с перерывами, а не полные сутки. По этой причине в настоящем разделе анализ выполнен для 6 из 14 радиотрасс.

Состояние космической погоды

Временные зависимости ряда параметров, характеризующих состояние космической погоды, приведены на рис. 11.

Концентрация частиц в солнечном ветре 12 – 13 мая 2019 г. не превышала $(3 - 5) \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. 14 мая 2019 г. в интервале времени с 04:00 до 09:00 (здесь и далее UT) она увеличивалась до $11.6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

Скорость частиц солнечного ветра V_{sw} 11 – 12 мая 2019 г. была около 360 км/с. 13 – 14 мая 2019 г. она постепенно увеличивалась до 557 км/с (в 08:00 14 мая 2019 г.). Далее она флуктуировала около значения ~ 400 км/с. В ночь с 16 на 17 мая 2019 г. V_{sw} выросла до 600 км/с.

Резкое увеличение температуры частиц солнечного ветра T_{sw} от $\sim 10^4$ до $4.35 \cdot 10^5$ К

имело место в 03:00 14 мая 2019 г. Второй всплеск T_{sw} до $3.2 \cdot 10^5$ К наблюдался около 10:00 17 мая 2019 г.

Рост n_{sw} и V_{sw} привели к росту от 0.2 до 6 нПа динамического давления солнечного ветра.

С 02:00 до 08:00 14 мая 2019 г. наблюдалось резкое уменьшение B_z -компоненты межпланетного магнитного

поля от 0 до -10 нТл. B_y -компонента 11 – 12 мая 2019 г. флуктуировала в пределах от -6 до $+5$ нТл.

Всплески функции Акасофу, описывающей приток энергии солнечного ветра в магнитосферу, имели место с 02:00 до 12:00 11 мая 2019 г., с 00:00 до 10:00 и с 15:00 до 22:00 14 мая 2019 г.

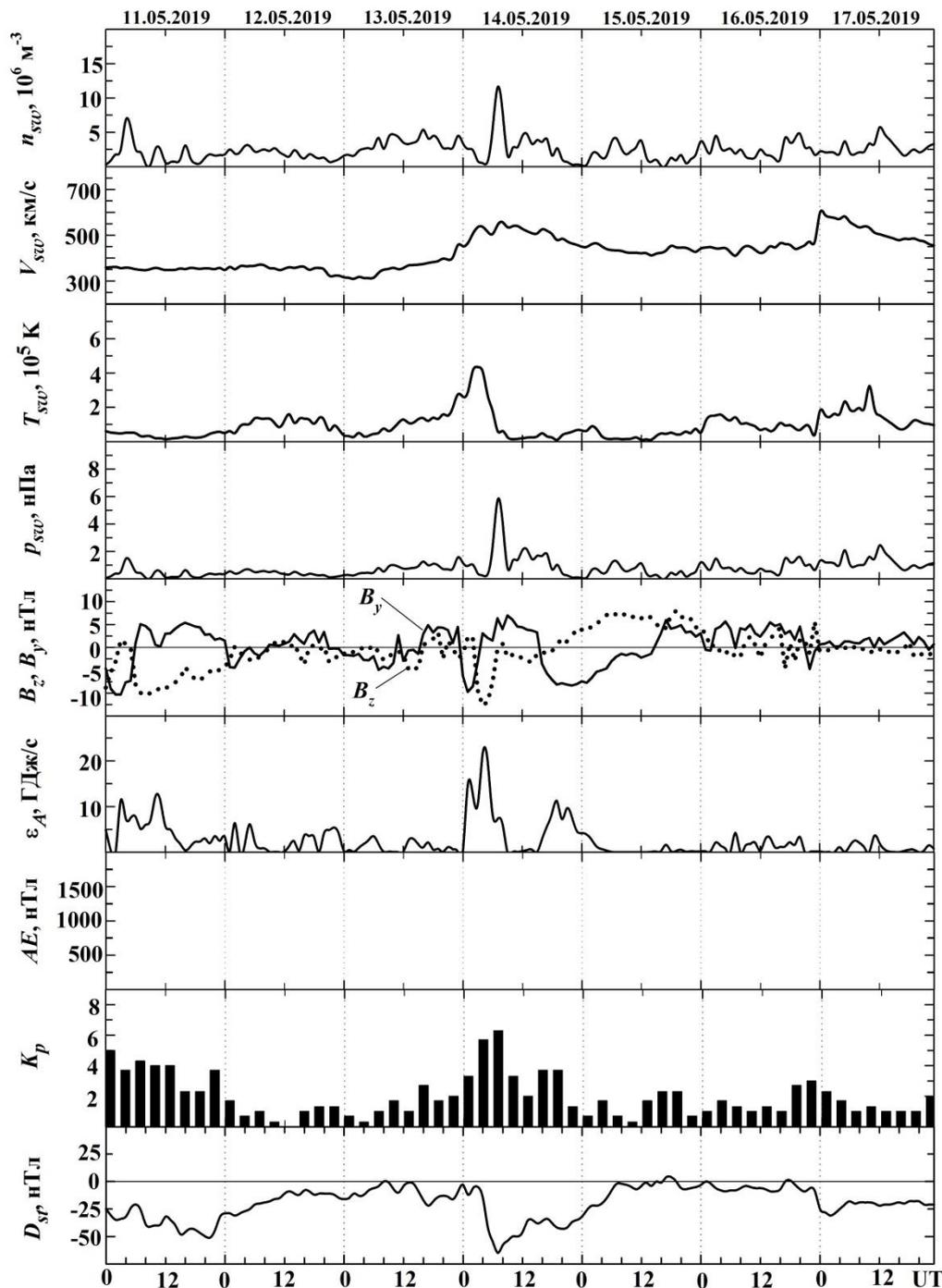


Рисунок 11 – Временные вариации основных параметров, описывающих состояние космической погоды (панели сверху вниз): временные вариации параметров солнечного ветра: концентрации n_{sw} , радиальной скорости V_{sw} , температуры T_{sw} [Space Weather Prediction

Center. National Oceanic and Atmospheric Administration], и рассчитанных значений динамического давления p_{sw} , B_y - (линия) и B_z - (точки) компонент межпланетного магнитного поля [Space Weather Prediction Center. National Oceanic and Atmospheric Administration], рассчитанных значений энергии ε_A , передаваемой солнечным ветром магнитосфере Земли в единицу времени, AE -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto], K_p -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto], D_{st} -индекса [World Data Center for Geomagnetism, Kyoto] в течение 11–17 мая 2019 г.

K_p -индекс увеличивался до 5, 6.3 и 3 11 мая, 14 мая и 16 мая 2019 г. соответственно.

С 03:00 и до 07:00 14 мая 2019 г. наблюдалось резкое падение D_{st} -индекса от -5 нТл до -65 нТл, обозначающее наступление основной фазы магнитной бури. Фаза восстановления продолжалась с 07:00 14 мая 2019 г. до 08:00 15 мая 2019 г.

По временным вариациям функции Акасофу, K_p - и D_{st} -индексам видно, что, кроме магнитной бури с главной фазой в интервале времени 03:00–07:00 UT, с 15:00 до 24:00 имела место суббуря.

Временные вариации H-, D- и Z-компонент геомагнитного поля 13–15 мая 2019 г., зарегистрированные в Низкочастотной обсерватории Радиоастрономического института НАНУ при помощи метеомагнитной станции LEM1-017 (49.93°N , 36.95°E) [http://geospace.com.ua/data/metmag_mf.php], приведены на рис. 12. Резкие изменения уровня компонент наблюдались примерно с 03:00 до 09:00 14 мая 2019 г.

На рис. 13 приведены временные вариации горизонтальных H- и D-компонент, зарегистрированные магнитометром-флюкс-метром в Магнитометрической обсерватории Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (49.65°N , 36.93°E). Видно, что в интервале времени 04:30–09:30 уровень флуктуаций увеличивался от 2–3 до 10 раз.

Подчеркнем, что магнитная буря 14 мая 2019 г. была одной из самых сильных в 2019 г. Ожидалось, что сильная магнитная буря будет сопровождаться достаточно уникальной ионосферной бурей. Этим и объясняется проявленный к ней интерес.

Результаты наклонного зондирования ионосферы

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

Доплерограммы для суток с ионосферной бурей 14 мая 2019 г. и контрольных суток 13 и 15 мая 2019 г. приведены на рис. 14. Из рис. 14 видно, что с 00:00 до 06:00 UT (в дневное время по местному времени) амплитуда сигнала была достаточно мала ($-(70-65)$ дБ), доплеровские спектры были диффузными. Доплеровское смещение основной моды $f_D(t) \approx 0$ Гц. Перед заходом Солнца и после него амплитуда сигнала существенно (на 20–30 дБ) возросла, а доплеровские спектры были в течение всей местной ночи диффузными.

14 мая 2019 г. с 06:00 до 11:00 поведение доплерограмм значительно отличалось от их поведения в контрольные сутки. Примерно около 06:00 имело место резкое падение f_D от 0 до -0.7 Гц. Далее наблюдались квазипериодические вариации $f_D(t)$ с периодом $T \approx 20$ мин и амплитудой $f_{Da} \approx 0.20-0.15$ Гц. Кроме того, около 08:00 и 10:00 отмечались резкие уменьшения доплеровского смещения частоты от 0 до -0.5 Гц. Уширение доплеровских спектров в ночное время было меньшим, чем их уширение в контрольные сутки.

Заметим, что 13 мая 2019 г. с 04:00 до 10:00 также имели место отрицательные вариации ДСЧ. Их природа, однако, не имела ничего общего с ионосферной бурей. Об этом, в частности, свидетельствует спокойная магнитная обстановка.

Опишем эффекты на радиотрассе Hwaseong – Harbin. Передающая станция, функционирующая на частоте 6015 кГц, размещена в Республике Корея. При этом $R \approx 950$ км. С 00:00 и до 03:30 радиостанция не излучала.

В контрольные сутки 13 мая 2019 г. доплеровские спектры почти все время были диффузными, а 15 мая 2019 г. (рис. 15) они были диффузными только в течение захода Солнца в ионосфере и вскоре после него.

14 мая 2019 г. диффузность спектров была незначительной. Около 06:30 $f_D(t)$ резко уменьшилось от 0 до -0.7 Гц.

Повторные уменьшения наблюдались около 07:00 и 09:30. При этом значения f_{Dmin} достигали -0.3 и -0.5 Гц соответственно.

Дадим краткую характеристику эффектов на радиотрассе Chiba/Nagara – Harbin.

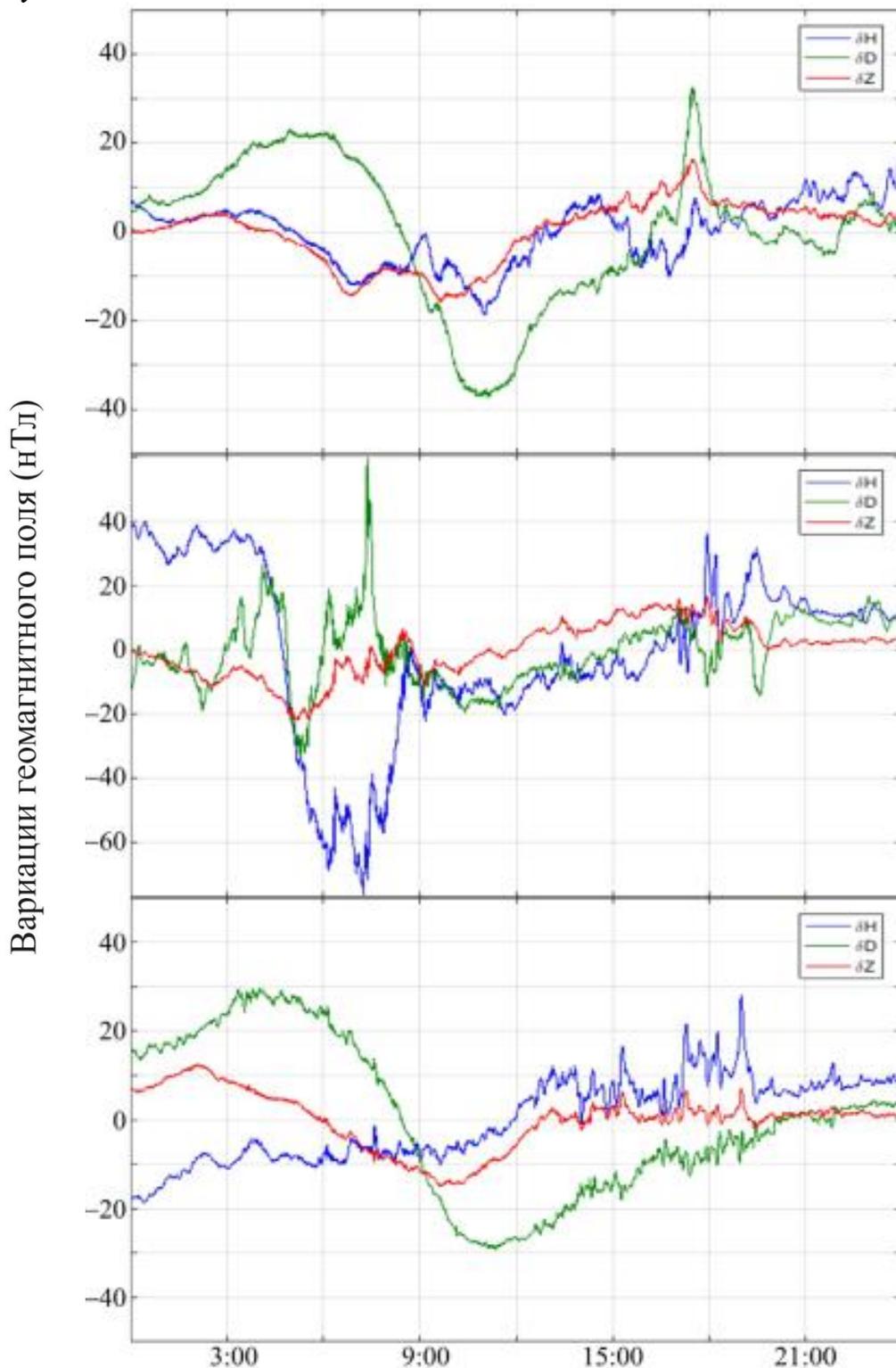


Рисунок 12 – Временные вариации компонент геомагнитного поля за 13, 14 и 15 мая 2019 г., полученные в Низкочастотной обсерватории Радиоастрономического института НАНУ (49.93°N, 36.95°E): компонента Юг–Север (H-компонента, синий цвет), Запад–Восток (D-компонента, зелёный цвет), вертикальная компонента (Z-компонента, красный цвет). Панели сверху вниз: 13, 14, 15 мая 2019 г. соответственно.

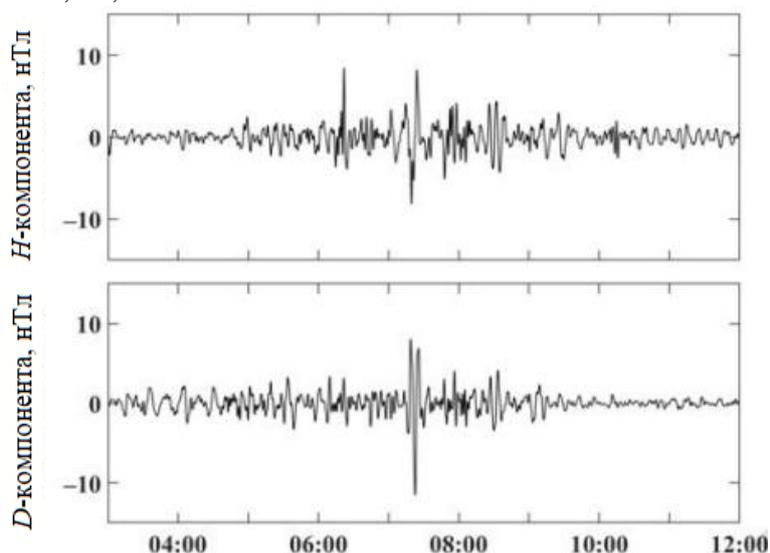


Рисунок 13 – Временные вариации горизонтальных компонент геомагнитного поля в диапазоне периодов 100 – 1000 с 14 мая 2019 г., зарегистрированных в Магнитометрической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина.

Радиостанция, излучающая на частоте 6055 кГц, находится в Японии. При этом $R \approx 1610$ км. Излучение имело место с 00:00 до 15:00.

В отличие от контрольных суток, 14 мая 2019 г. с 05:30 до 06:30 значения $f_D(t)$ резко уменьшались от 0 до -1.2 Гц (рис. 16). Доплеровские спектры испытывали уширение от -1.5 до $+1.5$ Гц. Повторные резкие уменьшения f_D наблюдались около 08:00 и 09:30. Отмечались квазипериодические вариации $f_D(t)$ с $T \approx 20$ мин и $f_{Da} \approx 0.20-0.25$ Гц.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе Goyang – Harbin. Радиостанция, работающая на частоте 6600 кГц, территориально расположена в Республике Корея. Расстояние $R \approx 910$ км. Станция излучала в интервале времени 04:40–23:20.

В отличие от контрольных дней, 14 мая 2019 г. примерно с 06:00 до 06:25 $f_D(t)$ резко уменьшалось от ~ 0 до -0.9 Гц (рис. 17). Далее наблюдались квазипериодические вариации $f_D(t)$ с $T \approx 20$ мин и $f_{Da} \approx 0.15$ Гц. Кроме того, с 07:30 до 09:00 имели место

квазипериодические колебания доплеровского смещения частоты с $T \approx 5$ мин и $f_{Da} \approx 0.1$ Гц.

Повторные резкие уменьшения f_D 14 мая 2019 г. наблюдались примерно в 08:00 и около 10:00.

Следует отметить, что резкое и значительное уменьшение доплеровского смещения частоты наблюдалось также в контрольный день 13 мая 2019 г., в период с 05:00 до 08:00 UT и в 10:00 UT и 13:30 UT. Однако поведение доплеровских спектров 13 мая и 14 мая 2019 г. существенно различалось в период с 05:00 до 18:00 UT.

Опишем эффекты на радиотрассе Ulaanbaatar – Harbin. Радиостанция, функционирующая на частоте 7260 кГц, размещена на территории Монголии. При этом $R \approx 1496$ км. С 05:00 до 07:00 13 и 15 мая 2019 г. радиостанция не излучала.

В отличие от контрольных дней, 14 мая 2019 г. с 07:00 до 09:00 отмечались квазипериодические вариации $f_D(t)$ с периодами 15 и 30 мин (рис. 18). Их амплитуда была около 0.05 и 0.1 Гц соответственно. Подчеркнем, что в контрольный день 15 мая 2019 г.

наблюдались квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты с периодом 15 мин и амплитудами 0.05–0.10 Гц, начало которых регистрировалось в 07:39 UT. Их природа, конечно, не связана с ионосферной бурей.

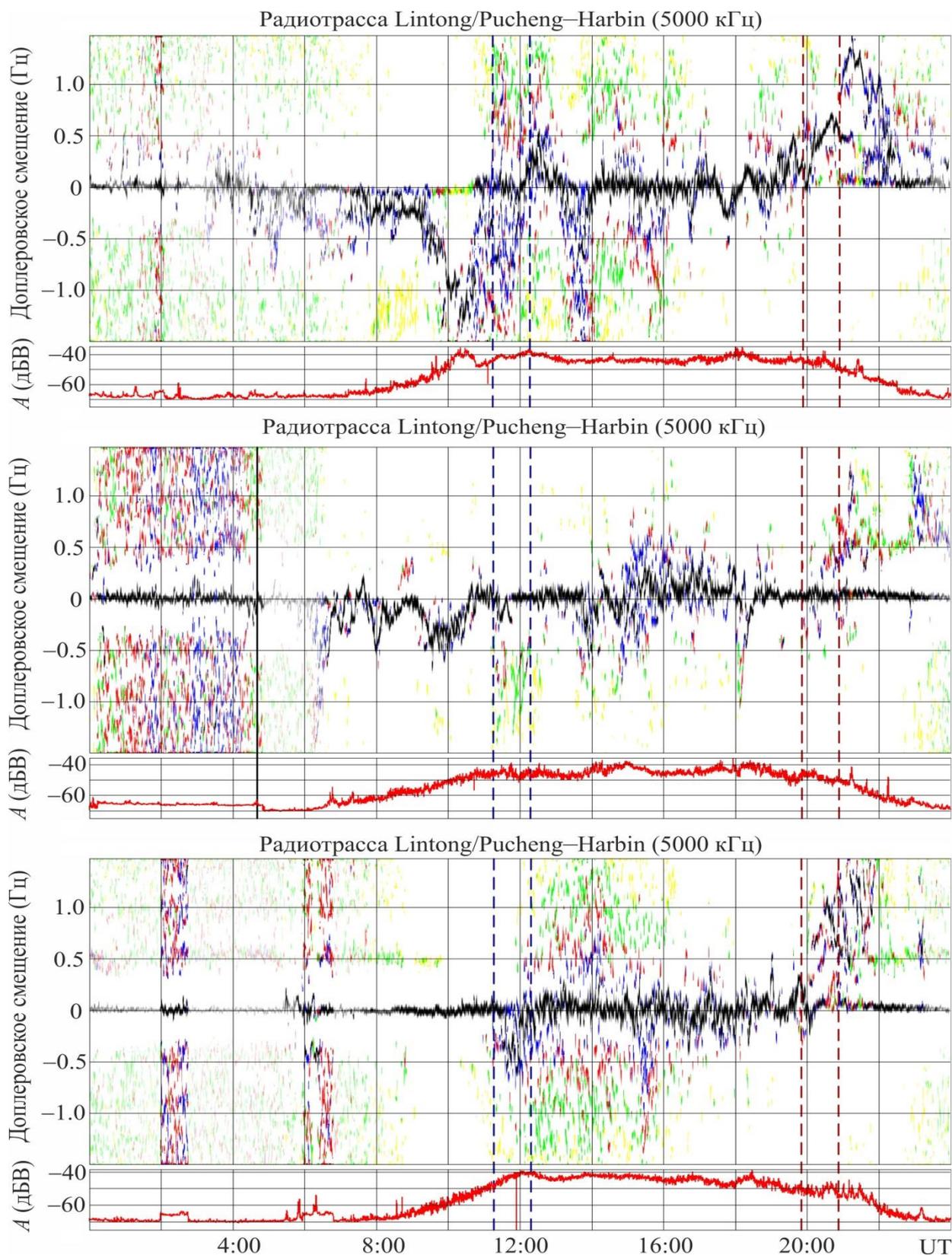


Рисунок 14 – Временные вариации доплеровских спектров и амплитуды сигнала на радиорассе Lintong/Pucheng – Harbin 13, 14 и 15 мая 2019 г. (панели сверху вниз). Пунктирные линии показывают заход Солнца на высоте 0 и 100 км. Под каждой панелью временных зависимостей доплеровских спектров показана амплитуда сигнала на выходе приемника (в дБ) в отношении к 1 В

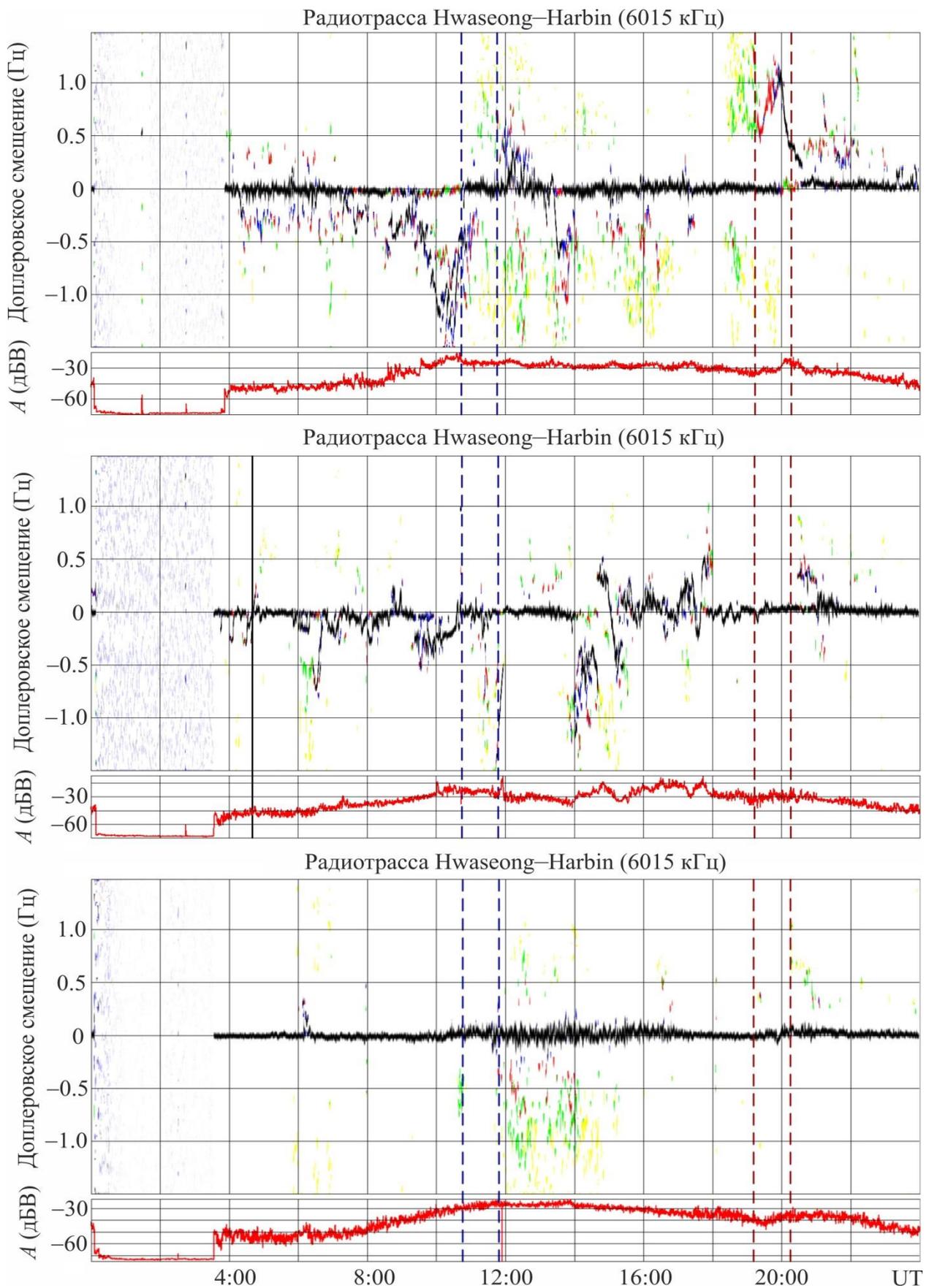


Рисунок 15 – То же, что на рис. 14, для трассы Hwaseong–Harbin

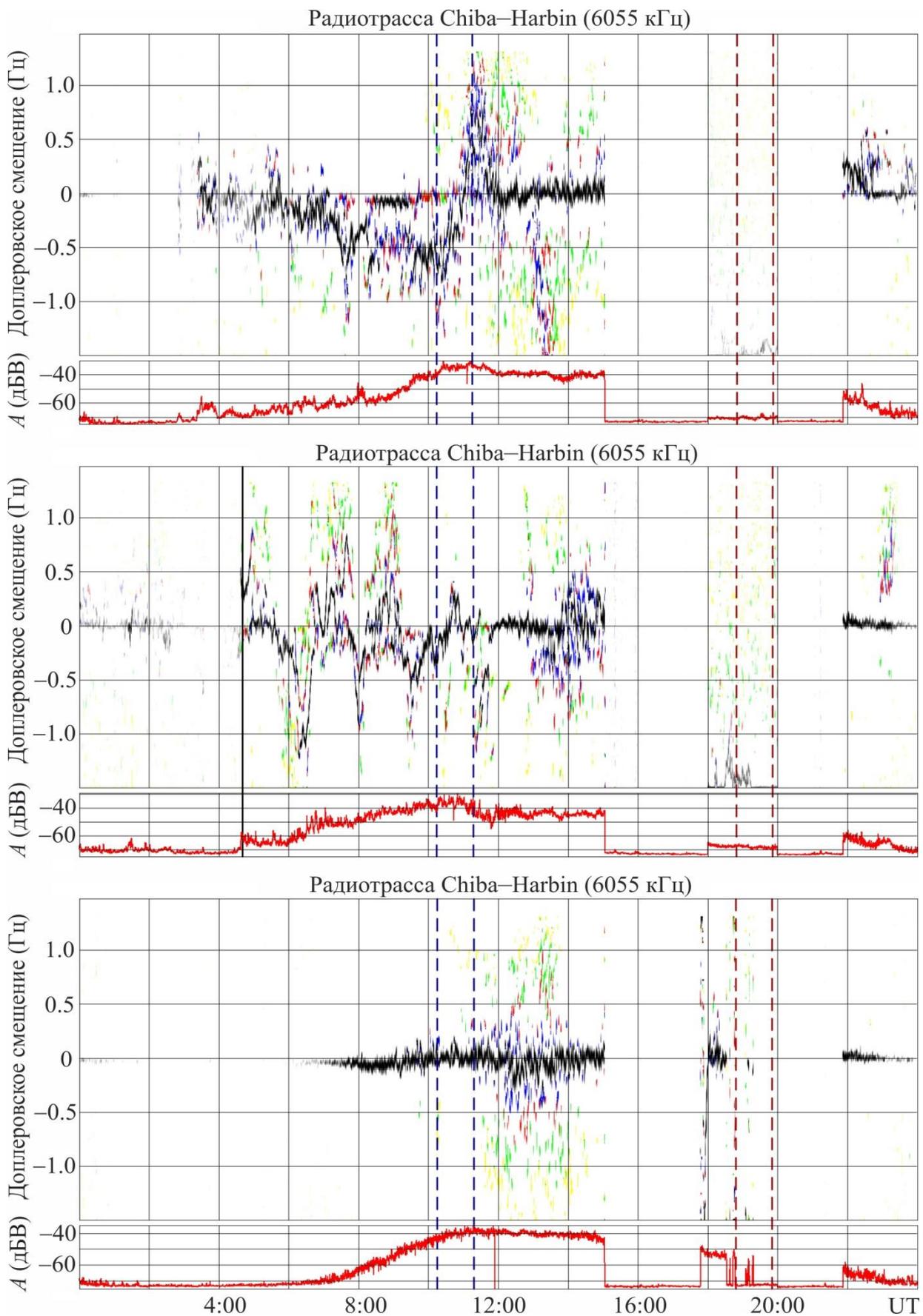
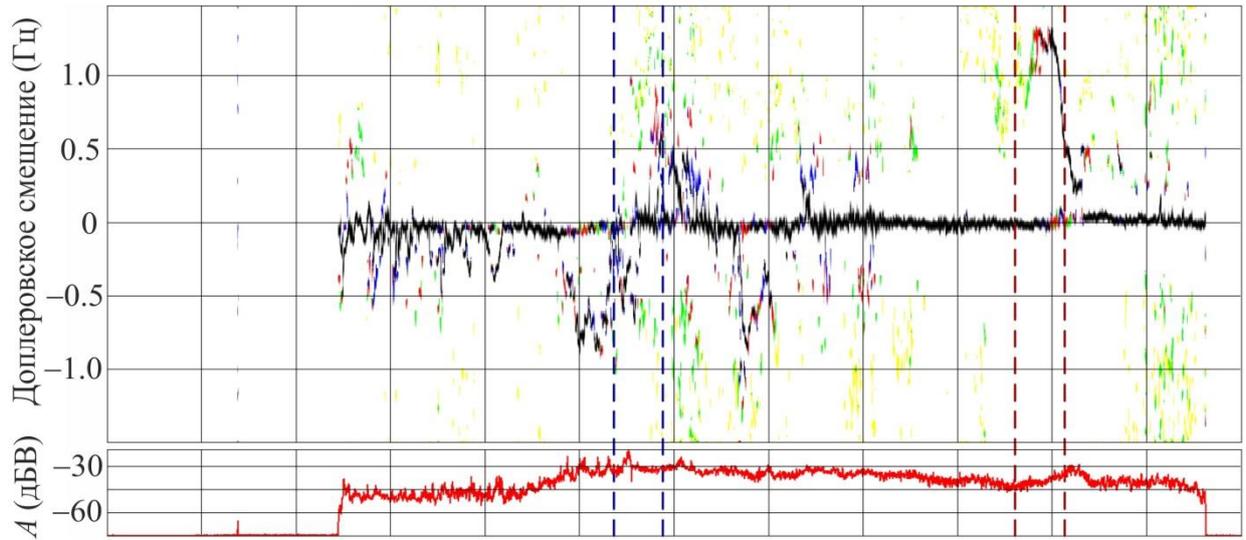
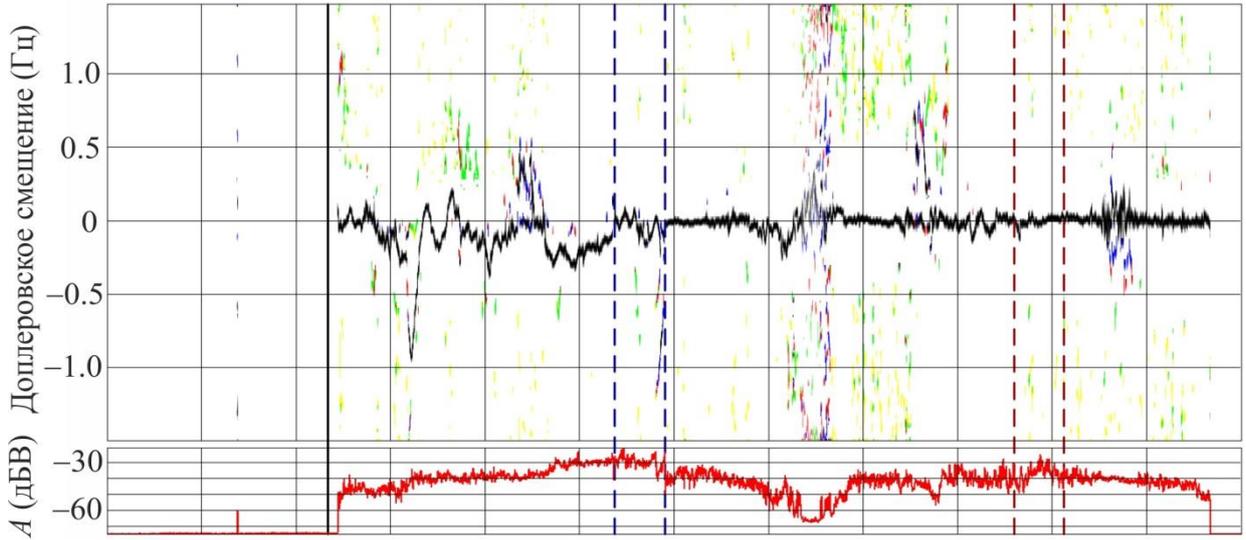


Рисунок 16 – То же, что на рис. 14, для трассы Chiba–Harbin

Радиотрасса Goyang–Harbin (6600 кГц)



Радиотрасса Goyang–Harbin (6600 кГц)



Радиотрасса Goyang–Harbin (6600 кГц)

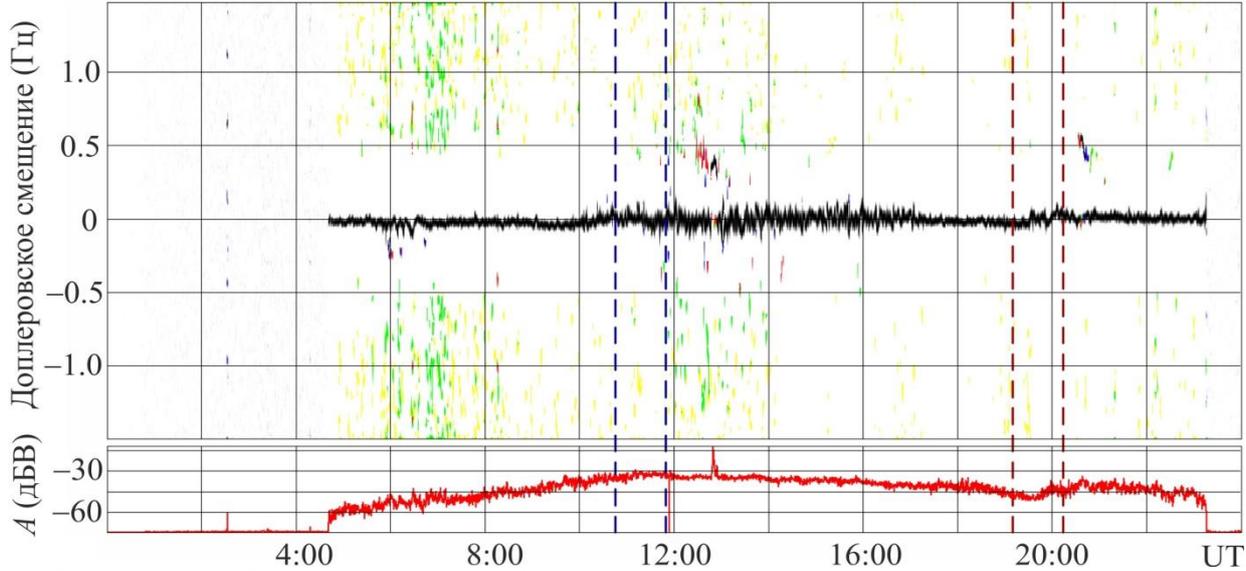


Рисунок 17 – То же, что на рис. 14, для трассы Goyang–Harbin

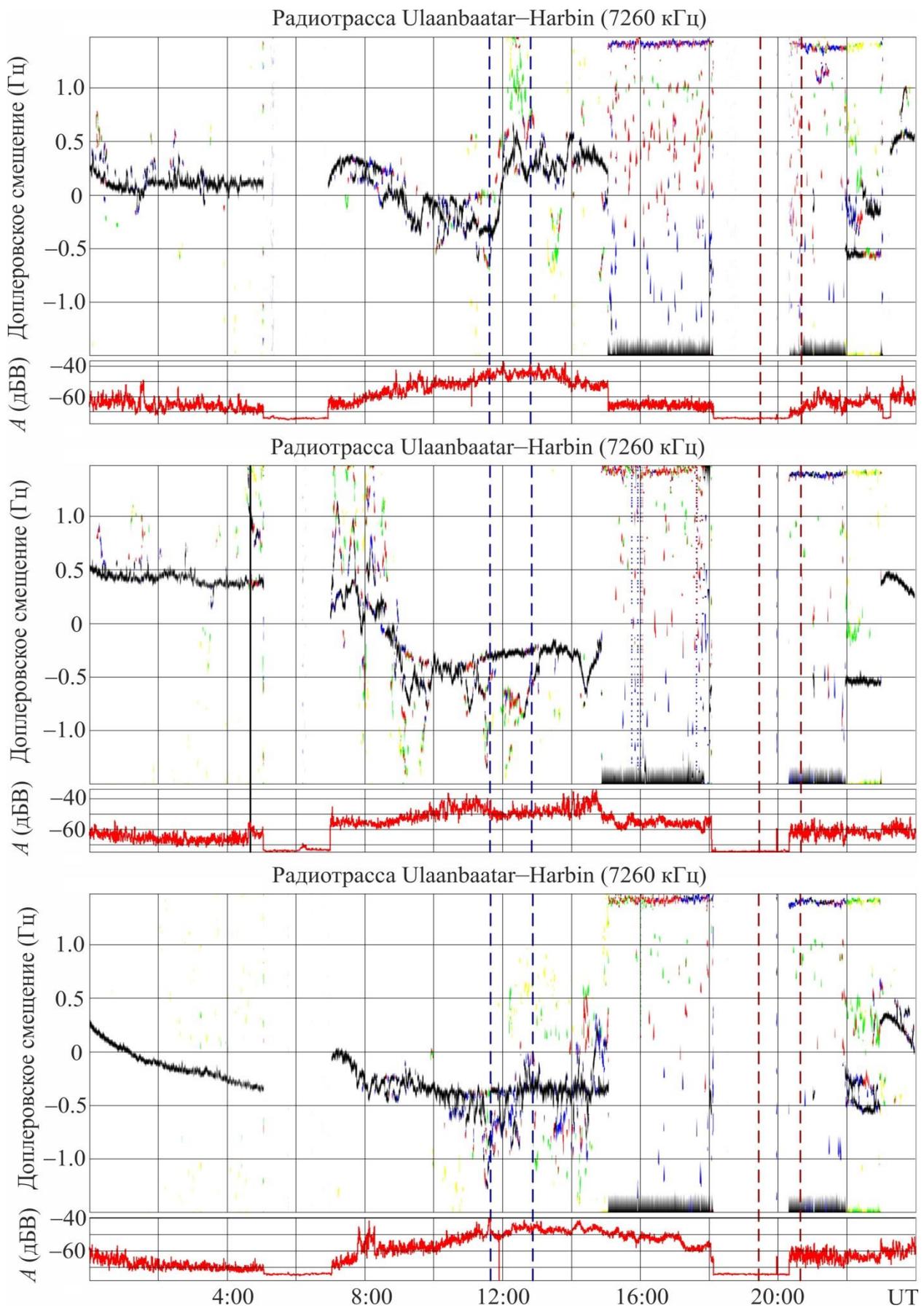


Рисунок 18 – То же, что на рис. 14, для трассы Ulaanbaatar–Harbin

С 07:00 до 10:00 14 мая 2019 г. доплеровские спектры были диффузными и занимали диапазон от 1.5 до -1.4 Гц. 14 мая 2019 г. в интервале времени 07:00 – 11:00 значения $\bar{f}_D(t) = -0.5$ Гц были на 0.2 Гц меньше, чем $\bar{f}_D(t) = -0.3$ Гц 13 мая 2019 г.

Рассмотрим эффекты на радиотрассе Shijiazhuang – Harbin. Радиопередающее устройство, излучающее на частоте 9500 кГц, находится в КНР. При этом $R \approx 1310$ км. В течение суток перерывов в радиоизлучении не было.

В контрольные сутки с 00:00 до 11:00 имели место незначительные вариации $f_D(t)$ (рис. 19). Вблизи вечернего и утреннего терминаторов доплеровские спектры испытывали значительное (до 2 – 3 Гц) уширение. В течение суток наблюдались сильные (до 10 – 15 дБ) вариации амплитуд сигнала.

14 мая 2019 г. с 00:00 до 06:00 доплеровское смещение частоты, флуктуируя в пределах от -0.2 до 0.2 Гц, оставалось почти все время положительным. С 06:00 до 09:00 амплитуда сигнала упала до -71 дБ, т.е. отраженный сигнал практически не наблюдался.

Обсуждение

Обсудим кратко эффекты ионосферной бури. Начало и конец ионосферной бури точно определить трудно. По данным D_{st} -индекса, критической частоты f_oF_2 и действующей высоты слоя F_2 видно, что ионосферная буря началась между 04:00 и 05:00 и продолжалась примерно до 16:00. Эффекты ионосферной бури не просто отделить от возмущений другой природы. Из поведения доплеровских спектров видно, что контрольный день 13 мая 2019 г. был также несколько возмущенным. Поэтому для выделения эффектов ионосферной бури целесообразно сравнивать результаты измерений 14 и 15 мая 2019 г.

Резкое уменьшение доплеровского смещения частоты Δf_D от 0 до $-(0.7 - 1.2)$ Гц, а затем увеличение до 0 Гц для различных радиотрасс, наступившее синхронно после 06:00, свидетельствует о движении области отражения радиоволн вверх.

Продолжительность ΔT_1 резкого падения $f_D(t)$ составляла около 15–25 мин, затем в течение времени $\Delta T_2 \approx 15-25$ мин $f_D(t)$ увеличивалось до 0 Гц. Общая продолжительность ΔT эффекта составляла $\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 \approx 30-50$ мин. Сведения о доплеровском смещении частоты и о параметрах возмущения в ионосфере приведены в табл. 3. Из табл. 3 видно, что смещение вверх области отражения радиоволн достигало 53–183 км.

Рассмотрим далее состояние ионосферы в день бури и в контрольные дни. Для этого воспользуемся данными ближайших ионозондов Wakkanai (Япония, 45.39°N , 141.68°E) (рис. 20, 21) и Хабаровск (Россия, 47.52°N , 134.72°E) (рис. 22).

Из рис. 20 видно, что 13–15 мая 2019 г. минимальная наблюдаемая на ионограмме частота f_{\min} изменялась в пределах 1.2–1.8 МГц, критическая для обыкновенной радиоволны частота E-области f_oE , как и следовало ожидать, испытывала суточные вариации. Критическая для обыкновенной радиоволны частота спорадического слоя E_s f_oE_s в день бури изменялась незначительно (от 3 до 6 МГц). Критическая для обыкновенной радиоволны частота области F_2 f_oF_2 до 06:00 находилась в пределах 4–5 МГц, а в интервале времени 15:00–20:00 14 мая 2019 г. она сначала увеличивалась от 5 до 7.8 МГц, а затем уменьшалась до 5 МГц. Действующая высота области E $h'E$ в течение 13–15 мая 2019 г. находилась в пределах 105–110 км (см. рис. 21). Действующая высота слоя E_s $h'E_s$ существенно увеличилась от 110 до 170 км около 07:00 14 мая 2019 г. Действующая высота области F_2 $h'F_2$ значительно увеличилась (от 270 до 400–410 км) примерно с 00:00 до 08:00 14 мая 2019 г.

Как видно из рис. 22, на ионозонде Хабаровск также отмечался существенный рост f_oF_2 в интервале времени 06:00 – 12:00 14 мая 2019 г. Высота максимума ионизации h_mF_2 с 05:30 до 08:00 увеличивалась от 250 до 300–320 км.

Таким образом, геокосмическая буря слабо повлияла на состояние E-области ионосферы, но существенно отразилась на

состоянии F -области ионосферы. Этим и доплеровских спектров.
 объясняются наблюдаемые вариации
 Радиотрасса Shijiazhuang–Harbin (9500 кГц)

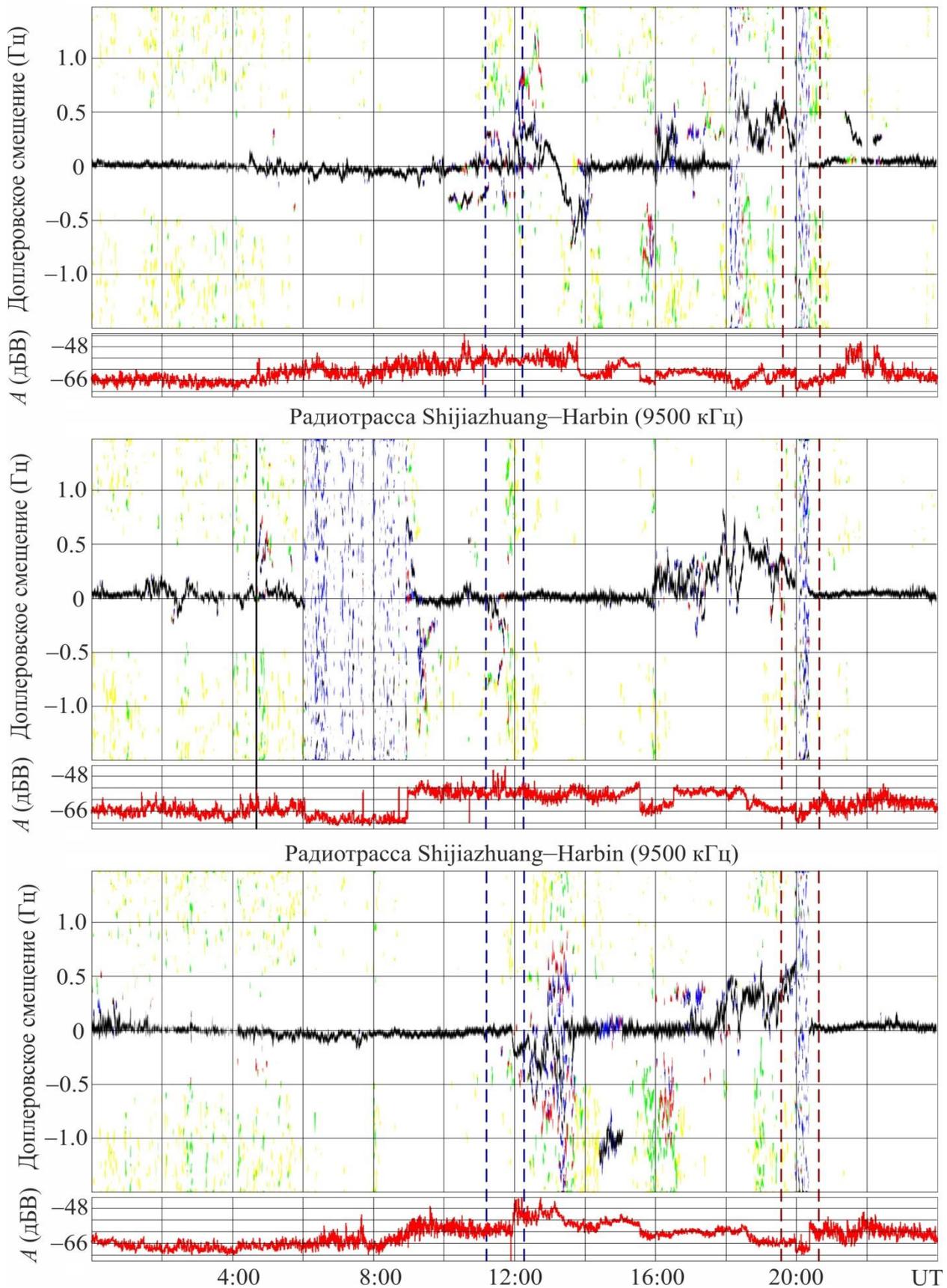


Рисунок 19 – То же, что на рис. 14, для трассы Shijiazhuang–Harbin

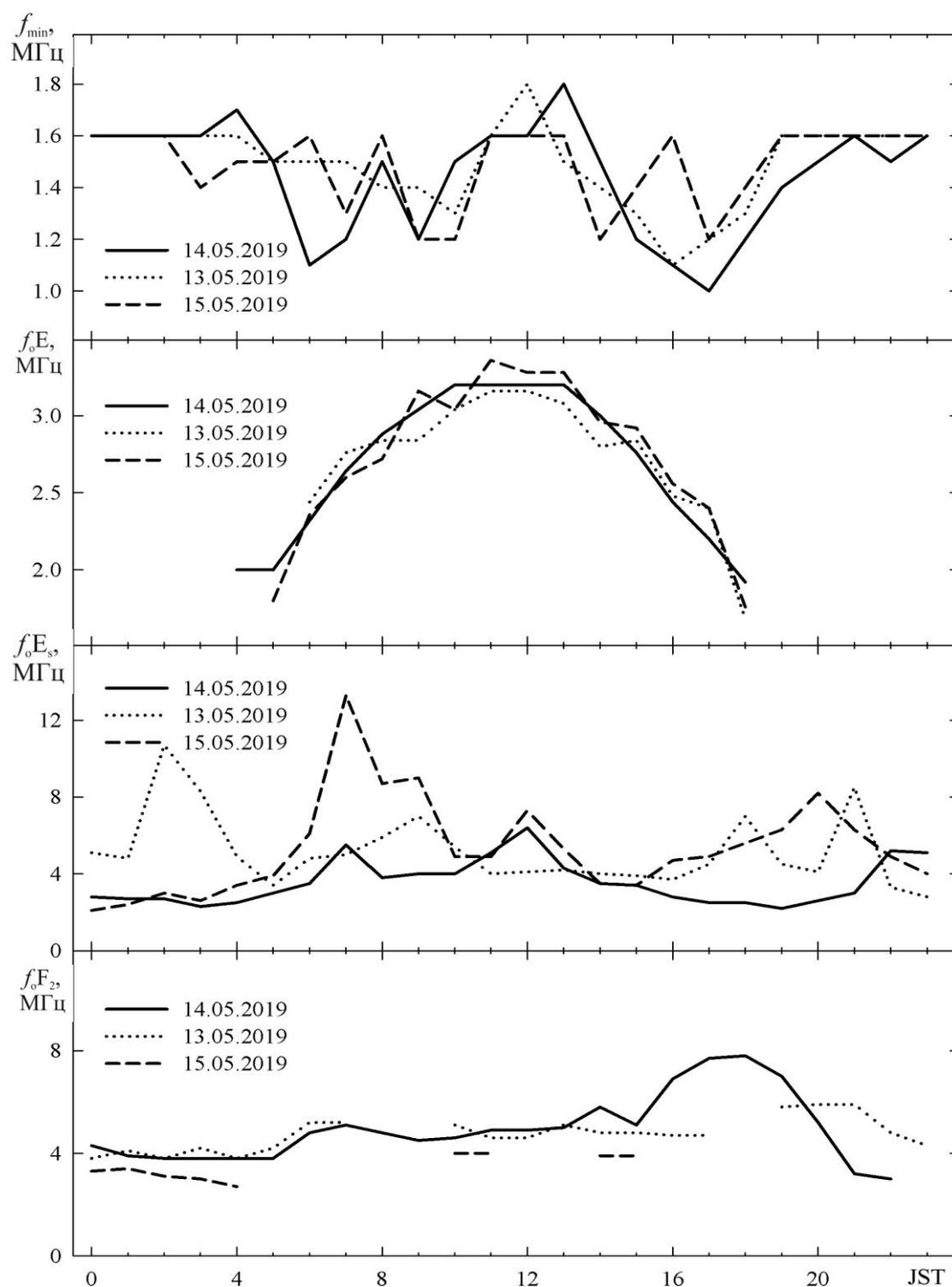


Рисунок 20 – Данные ионозонда Wakkanai (Япония, 45.39°с.ш., 141.68°в.д.). Панели сверху вниз: временные вариации минимальной частоты, f_{\min} , наблюдаемой на ионограммах, критической частоты слоя E ионосферы f_oE , критической частоты спорадического слоя E_s ионосферы f_oE_s , критической частоты слоя F₂ ионосферы f_oF_2 (обыкновенная компонента), за 13–15 мая 2019 г. (точечная линия – 13 мая 2019 г., сплошная – 14 мая 2019 г.; штриховая – 15 мая 2019 г.)

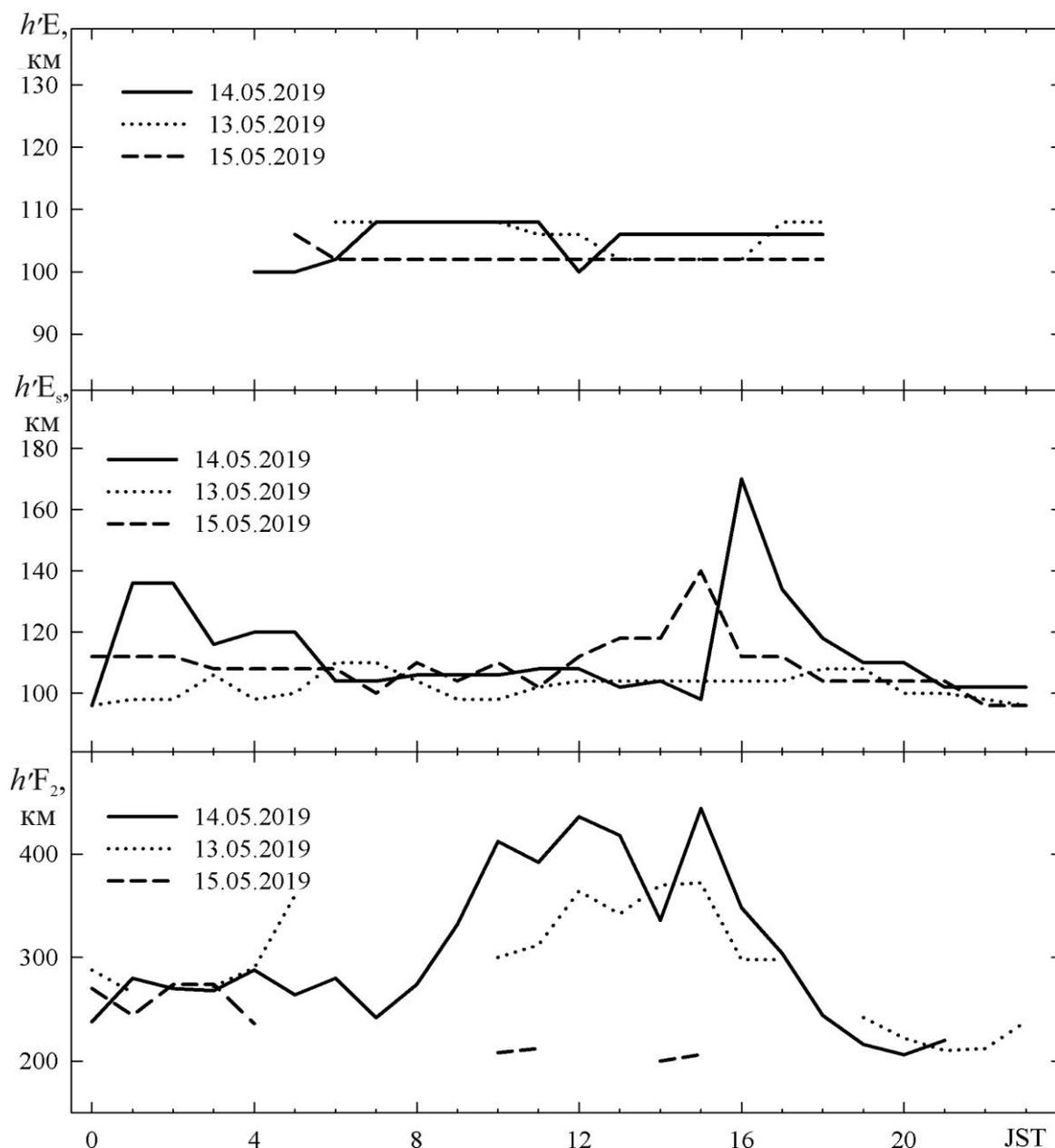


Рисунок 21 – Данные ионозонда Wakkanai (Япония, 45.39°с.ш., 141.68°в.д.). Панели сверху вниз: временные вариации действующей высоты слоя E $h'E$, действующей высоты слоя E_s $h'Es$, действующей высоты слоя F2 $h'F_2$

Заметим, что магнитная буря была достаточно сильной, однако, ионосферная буря оказалась слабой. При этом $N_{\max}/N_0 = (f_{0F2\max}/f_{0F0})^2 \approx 2.5$. Причиной слабости ионосферной бури служит относительно небольшая (~4 – 5 ч) длительность магнитной бури.

Опишем количественно движение области отражения. Резкое уменьшение доплеровского смещения частоты после

наступления ионосферной бури моделируем следующим образом:

$$f_D(t) = \left\{ \begin{array}{l} f_{Dm} \frac{t}{\Delta T_1}, 0 \leq t \leq \Delta T_1, \\ f_{Dm} \frac{\Delta T - t}{\Delta T - \Delta T_1}, \Delta T_1 \leq t \leq \Delta T, \end{array} \right\}. \quad (13)$$

Поскольку скорость v движения области отражения связана с $f_D(t)$ известным соотношением (см., например, [104]),

смещение по высоте области отражения радиоволны

$$\Delta z_r(t) = \int v(t) dt = -\frac{c}{2f} \int_0^{\Delta T} \frac{f_D(t)}{\cos \theta(t)} dt, \quad (14)$$

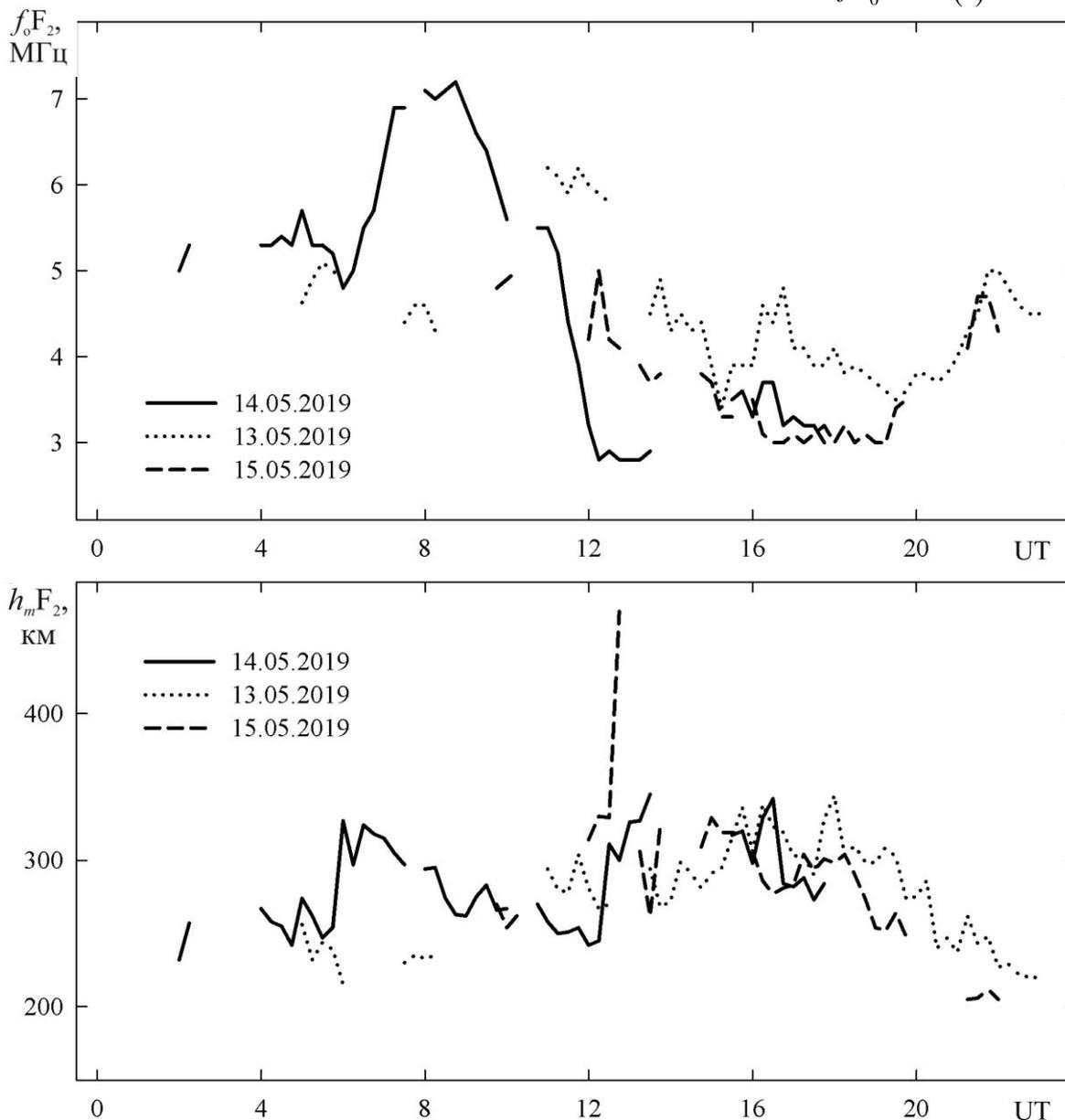


Рисунок 22 – Данные ионозонда Хабаровск (Россия, 47.52°с.ш., 134.77°в.д.). Панели сверху вниз: временные вариации критической частоты слоя F₂ ионосферы f_oF₂ (обыкновенная компонента), максимальной высоты h_mF₂ за 13–15 мая 2019 г.

где $\theta(t)$ – угол наклона траектории радиоволны к вертикали. Подставляя (13) в (14), после интегрирования получим, что

$$\Delta z_r = -\frac{c}{4} \frac{f_{Dm}}{f} \left(\frac{\Delta T_1}{\cos \theta_1} + \frac{\Delta T - \Delta T_1}{\cos \theta_2} \right). \quad (15)$$

Здесь $\overline{\cos \theta_1}$ и $\overline{\cos \theta_2}$ – средние по времени значения за времена ΔT_1 и ΔT_2 соответственно. При $\Delta T_1 = \Delta T/2$

соотношение (15) можно переписать в таком виде

$$\Delta z_r = -\frac{c \Delta T}{8} \frac{f_{Dm}}{f} \left(\frac{1}{\overline{\cos \theta_1}} + \frac{1}{\overline{\cos \theta_2}} \right). \quad (16)$$

Введем эффективный угол θ_{eff} таким образом, что

$$\frac{1}{\overline{\cos \theta_1}} + \frac{1}{\overline{\cos \theta_2}} = \frac{2}{\overline{\cos \theta_{\text{eff}}}}. \quad (17)$$

Тогда из (15) с учетом (17) имеем:

$$\Delta z_r = -\frac{c\Delta T}{4\cos\theta_{\text{eff}}} \frac{f_{Dm}}{f}. \quad (18)$$

Из (15), (16) и (18) следует, что при $f_{Dm} < 0$ параметр $\Delta z_r > 0$ и наоборот. В первом случае область отражения радиоволны сдвигается вверх, а при $f_{Dm} > 0$ – вниз.

Соотношения (15) и (16) использовались при расчете величины Δz_r , приведенной в табл. 3. Значения $\overline{\cos\theta_1}$ и $\overline{\cos\theta_2}$ определяются из траекторных расчетов.

Рассчитаем параметры волновых возмущений. Амплитуду δ_{Na} относительных возмущений концентрации электронов N оценим из следующего соотношения [2]:

$$\delta_{Na} = \frac{K}{4\pi} \frac{cT}{L} \frac{f_{Da}}{f}, \quad (19)$$

где

$$K = \frac{1 + \sin\theta}{(1 + 2\zeta \text{tg}^2\theta) \cos\theta},$$

$$\zeta = \frac{z_r - z_0}{r_0}$$

$$\text{tg}\theta = \frac{R}{2z_r},$$

$$L = \frac{2HL_n}{2H + L_n}.$$

Здесь z_r – высота отражения радиоволны, r_0 – радиус Земли, L_n – характерный масштаб изменения $N(z)$, H – высотный масштаб атмосферы.

При получении соотношений считалось, что

$$\delta_N(t, z) = \delta_{Na}(z_0) e^{(z-z_0)/2H} \cos \frac{2\pi t}{T}. \quad (20)$$

Оценки δ_{Na} по соотношению (19) приведены в табл. 3. Видно, что для разных радиотрасс значения δ_{Na} изменялись от 4% до 8% при $T = 20 - 30$ мин. Такие параметры свойственны атмосферным гравитационным волнам, которые, распространяясь в ионосфере, модулируют концентрацию электронов.

Таблица 3. Основные сведения о параметрах радиоволны и ионосферы

f , кГц	5000	6015	6055	6600	7260
z_{r0} , км	100	120	110	125	125
θ_0 , град	75	71	69	66	64
Δf_D , Гц	-0.7	-0.7	-1.2	-0.9	-
ΔT , мин	40	30	50	45	-
Δz_r , км	148	53	183	81	180
$2H$, км	80	25	100	60	60
T_1 , мин	-	-	-	5	15
f_{Da1} , Гц	-	-	-	0.1	0.05
δ_{Na1} , %	-	-	-	0.7	1
T_2 , мин	20	20	20	20	30
f_{Da2} , Гц	0.20 – 0.25	0.1	0.20 – 0.25	0.15	0.1
δ_{Na2} , %	6 – 7.5	8	4 – 5	4.5	4.1

При радиозондировании проявления атмосферных гравитационных волн воспринимаются как перемещающиеся ионосферные возмущения.

Колебания с периодом $T < 5$ мин связаны с распространением в ионосфере длиннопериодного инфразвука. Его проявления наблюдались, например, на

частоте 6600 кГц (см. рис. 19). При $T \approx 5$ мин, $f_{Da} \approx 0.1$ Гц, а $\delta_{Na} \approx 0.7\%$.

Перечислим основные результаты исследований геокосмической бури 14 мая 2019 г.

Многочастотные многотрассовые наблюдения за динамикой ионосферы во время ИБ позволили установить следующее.

1. В интервале времени с 06:00 до 11:00 имела место положительная ионосферная буря. Установлено, что f_oF_2 при этом увеличивалась от ~ 5 до $7 - 8$ МГц.

2. Ионосферная буря привела к сдвигу вверх области отражения радиоволны в зависимости от радиотрассы на $\sim 50 - 180$ км.

3. В течение бури наблюдались проявления атмосферных гравитационных волн с периодом $15 - 30$ мин. Амплитуда относительных возмущений концентрации электронов составляла $4 - 8\%$.

4. Буря сопровождалась генерацией инфразвука с периодом около 5 мин. При этом амплитуда относительных возмущений концентрации электронов была около 0.7% .

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 сопровождались 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 «развалом» 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.

Литература

1. Черногор Л. Ф. Физические эффекты геокосмических бурь // Журнал проблем эволюции открытых систем. – 2020. (В печати).

2. 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.

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

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

4. Matsushita S. A study of the morphology of ionospheric storms // Journal of Geophysical Research. – 1959. – Vol. 64, №4. – P. 305–321.

5. Prölss G. W., Jung M. J. Traveling atmospheric disturbances as a possible explanation for daytime positive storm effects of moderate duration at middle latitudes // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1978. – Vol. 40, № 12. – P. 1351–1354.

[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(78\)90088-0](https://doi.org/10.1016/0021-9169(78)90088-0)

6. Данилов А. Д., Морозова Л. Д. Ионосферные бури в области F2. Морфология и физика (обзор) //

- Геомагнетизм и аэрномия. – 1985. – Vol. 25, № 5. – С. 705–721.
7. Balan, N., Rao P. B. Dependence of ionospheric response on the local time of sudden commencement and intensity of storms // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1990. – Vol. 52. – P. 269–275.
8. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Moffett R. J., Quegan S. Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1994. – Vol. 99. – P. 3893–3914.
9. 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>
10. Prölss G. W. Ionospheric F-region storms // *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*; Edited by H. Volland. CRC Press, Boca Raton, Fla. – 1995. – Vol. 2. – P. 195–248.
11. Rees D. Observation and modeling of ionospheric and thermospheric disturbances during major geomagnetic storms: a review // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1995. – Vol. 57, № 12. – P. 1433–1457.
12. Laštovička, J.: Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1996. – Vol. 58, no. 7. – Pp. 831–843.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00106-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00106-9)
13. Schunk R. W., Sojka J. J. Ionosphere-Thermosphere Space Weather Issues // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1996. – Vol. 58. – Pp. 1527–1574.
14. Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V., Roble R. G., Richmond A. D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? *Magnetic Storms*. Washington, 1997. – P. 203–226. (AGU Monograph. vol. 98).
<https://doi.org/10.1029/GM098>.
15. Buonsanto M. J., Codrescu M., Emery B. A., Fesen C. G., Fuller-Rowell T. J., Melendez-Alvira D. J., Sipler D. P. Recent Results of the CEDAR Storm Study // *Advances in Space Research*. – 1997. – Vol. 20, № 9. – Pp. 1655–1664.
16. Bradley P. A., Cander L. R., Kutiev I., Hanbaba R. PRIME (COST 238) Studies of Ionospheric Storm Effects // *Advances in Space Research*. – 1997. – Vol. 20, № 9. – Pp. 1669–1678.
17. Bradley P. A., Cander L. R., Kutiev I., Hanbaba R. PRIME (COST 238) Studies of Ionospheric Storm Effects // *Advances in Space Research*. – 1997. – Vol. 20, № 9. – P. 1669–1678.
18. Prölss G. W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere // In ed. Tsurutani B. T., Gonzalez W. D., Kamide Y., Arballo J. K. *Magnetic storms*. – Geophysical monograph series. – 1998. – Vol. 98. – American Geophysical Union, Washington, D.C. – P. 249–290.
19. Richards P. G., Torr D. G., Buonsanto M. J., Sipler D. P. Ionospheric Effects of the March 1990 Magnetic Storm: Comparison of Theory and Measurement // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 1994. – Vol. 99, №. A12. – P. 23,359–23,365.
20. Buonsanto M. J. Ionospheric Storms – A Review // *Space Science Reviews*. – 1999. – Vol. 88. – P. 563–601.
21. Danilov A. D., Lastovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. – 2001. – 2, № 3. – P. 209–224.
22. 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*. – 2003. – № 9. – С. 57–94.
23. 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 аэрномия*. – 2005. – Т. 45, № 6. – С. 803–823.
24. Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Особенности ионосферной бури 20–23 марта 2003 г. //

Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 6. – С. 789–802.

25. Mannucci, A. J.; Tsurutani, B. T.; Iijima, B. A.; Komjathy, A.; Saito, A.; Gonzalez, W. D.; Guarnieri, F. L.; Kozyra, J. U.; Skoug, R. Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29–30, 2003 “Halloween storms” // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – Vol. 32. – id. L12S02.

<https://doi.org/10.1029/2004GL021467>

26. Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н., Петрукович А. А., Митрофанов И. Г., Литвак М. Л., Веселовский И. С., Панасюк М. И., Лазутин Л. Л., Дмитриев А. В., Жуков А. Н., Кузнецов С. Н., Мягкова И. Н., Юшков Б. Ю., Курт В. Г., Гнездилов А. А., Горгуца Р. В., Маркеев А. К., Соболев Д. Е., Фомичев В. В., Кузнецов В. Д., Болдырев С. И., Черток И. М., Боярчук К. А., Крашенинников И. В., Коломийцев О. П., Лещенко Л. Н., Белов А. В., Гайдаш С. П., Канониди Х. Д., Богачев С. А., Житник И. А., Игнатъев А. П., Кузин С. В., Опарин С. Н., Перцов А. А., Селемзин В. А., Суходрев Н. К., Шестов С. В., Власов В. И., Чашей И. В., Вашенюк Э. В., Сахаров Я. А., Данилин А. Н., Богод В. М., Тохчукова С. Х., Михалев А. В., Белецкий А. Б., Костылева Н. В., Черниговская М. А., Гречнев В. В., Кудела К. Солнечные и гелиосферные возмущения, приведшие к сильной магнитной буре 20 ноября 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45, № 1. – С. 23–50.

27. Ермолаев Ю. И., Зеленый Л. М., Застенкер Г. Н., Петрукович А. А., Ермолаев М. Ю., Николаева Н. С., Панасюк М. И., Кузнецов С. Н., Мягкова И. Н., Муравьева Е. А., Юшков Б. Ю., Веселовский И. С., Дмитриев А. В., Жуков А. Н., Яковчук О. С., Кузнецов В. Д., Черток И. М., Ишков В. Н., Белов А. В., Ерошенко Е. А., Янке В. Г., Кузин С. В., Житник И. А., Игнатъев А. П., Селемзин В. А., Суходрев Н. К., Шестов С. А., Еселевич М. В., Еселевич В. Г., Руденко Г. В., Дворников В. М., Сдобнов В. Е., Кравцова М. В., Богод В. М.,

Котельников В. С., Першаков Л. А., Белоглазов М. И., Власов В. И., Чашей И. В., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Козлов В. И., Пархомов В. А., Кугаенко Ю. А., Хисамов Р. З., Янчуковский В. Л., Кудела К. Год спустя: Солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45, № 6. – С. 723–763.

28. Bothmer, V., Daglis, I. *Space Weather: Physics and Effects*. – Springer-Verlag New York. – 2006. ISBN 3-642-06289-X.

29. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. 1. Результаты наблюдений // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 62–76.

30. Vijaya Lekshmi D., Balan N., Vaidyan V. K., Alleyne H., Bailey G. J. Response of the ionosphere to super storms // *Adv. Space Res.* – 2007. – Vol. 41, № 4. – P. 548–555. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.08.029>

31. 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 аэрономия*. – 2007. – Т. 47, № 6. – С. 761–779.

32. Григоренко Е. И., Емельянов Л. Я., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Ионосферные процессы в течение сильнейшей геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. 2. Результаты расчетов и обсуждение // *Космічна наука і технологія*. – 2007. – Т. 13, № 4. – С. 77–90.

33. Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. Проявления геокосмической бури 7–10 ноября 2004 г. в нижней ионосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 646–658.

34. 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 // *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*. – 2007. – Vol. 7. – id. GI3001.

<https://doi.org/10.1029/2005GI000125>

35. 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. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 58–76.
36. 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. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 77–96.
37. Гуляева Т. Л. Показатели изменчивости ионосферы во время геомагнитных бурь по наблюдениям GPS // Солнечно-земная физика. – 2008. – Вып. 12, Т. 2. – С. 231 – 233.
38. 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, 2013. 259 с.
39. Данилов А. Д. Реакция области F2 на геомагнитные возмущения (Обзор) // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – Vol. 5. – С. 1–33.
40. Liu W., Xu L., Xiong C., Xu J. The ionospheric storms in the American sector and their longitudinal dependence at the northern middle latitudes // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 59, Is. 2. – P. 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.10.032>
41. Verkhoglyadova O. P., Komjathy A., Mannucci A. J., Mlynczak M. G., Hunt L. A., Paxton L. J. Revisiting ionosphere-thermosphere responses to solar wind driving in superstorms of November 2003 and 2004 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 10. – P. 10,824–10,850. <https://doi.org/10.1002/2017JA024542>
42. Jin S., Jin R., Kutoglu H. Positive and Negative Ionospheric Responses to the March 2015 Geomagnetic Storm from BDS Observations // *Journal of Geodesy*. – 2017. – Vol. 91, № 6. – P. 613–626. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0988-4>
43. Dmitriev A. V., Suvorova A. V., Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G., Rakhmatulin R. A., Parkhomov V. A. Predictable and unpredictable ionospheric disturbances during St. Patrick's Day magnetic storms of 2013 and 2015 and on 8–9 March 2008 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 2. – P. 2398–2423. <https://doi.org/10.1002/2016JA023260>
44. Venkatesh K., Tulasi Ram S., Fagundes P. R., Seemala G. K., Batista I. S. Electrodynamics disturbances in the Brazilian equatorial and low-latitude ionosphere on St. Patrick's Day storm of 17 March 2015 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 4. – P. 4553–4570. <https://doi.org/10.1002/2017JA024009>
45. Zhang S.-R., Erickson P. J., Zhang Y., Wang W., Huang C., Coster A. J., Holt J. M., Foster J. F., Sulzer M., Kerr R. Observations of ion-neutral coupling associated with strong electrodynamic disturbances during the 2015 St. Patrick's Day storm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 1. – P. 1314–1337. <https://doi.org/10.1002/2016JA023307>
46. Nykiel G., Zanimonskiy Y. M., Yampolski Yu. M., Figurski M. Efficient usage of dense GNSS networks in central Europe for the visualization and investigation of ionospheric TEC variations // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17, № 10. – Article no. 2298. <https://doi.org/10.3390/s17102298>
47. Zolotukhina N., Polekh N., Kurkin V., Rogov D., Romanova E., Chelpanov M. Ionospheric effects of St. Patrick's storm over Asian Russia: 17–19 March 2015 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 2. – P. 2484–2504. <https://doi.org/10.1002/2016JA023180>
48. Ray S., Roy B., Paul K. S., Goswami S., Oikonomou C., Haralambous H., Chandel B., Paul A. Study of the effect of 17–18 March 2015 geomagnetic storm on the Indian longitudes using GPS and C/NOFS // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 2. – P. 2551–2563. <https://doi.org/10.1002/2016JA023127>
49. Piersanti M., Cesaroni C., Spogli L., Alberti T. Does TEC react to a sudden impulse as a whole? The 2015 Saint Patrick's day storm event // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 60, № 8. – P. 1807–1816. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.01.021>
50. Olwendo O. J., Cesaroni C., Yamazaki Y., Cilliers P. Equatorial ionospheric disturbances over the East African sector during

the 2015 St. Patrick's day storm // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 60, № 8. – P. 1817–1826.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.06.037>

51. Polekh N., Zolotukhina N., Kurkin V., Zherebtsov G., Shi J., Wang G., Wang Z. Dynamics of ionospheric disturbances during the 17–19 March 2015 geomagnetic storm over East Asia // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 60, № 11. – P. 2464–2476.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.09.030>

52. Sun W.-J., Ning B.-Q., Zhao B.-Q., Li G.-Z., Hu L.-H., Chang S.-M. Analysis of ionospheric features in middle and low latitude region of China during the geomagnetic storm in March 2015 // *Acta Geophysica Sinica*. – 2017. – Vol. 60, № 1. – P. 1–10.

53. Xu Z., Hartinger M., Clauer C., Peek T., Behlke R. A comparison of the ground magnetic responses during the 2013 and 2015 St Patrick's Day geomagnetic storms // *Journal of Geophysical Research Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 4. – P. 4023–4036.

<https://doi.org/10.1002/2016JA023338>

54. Jiang C., Yang G., Liu J., Yokoyama T., Liu T., Lan T., Zhou C., Zhang Y., Zhao Z., Komolmis T., Supnithi P., Yatini C. Y. Equatorial and low-latitude ionospheric response to the 17-18 March 2015 great storm over South East Asia longitude sector // *Journal of Geophysical Research Space Physics*. – 2017. – Vol. 122, № 5. – P. 5756–5767. <https://doi.org/10.1002/2017JA024134>

55. Liu G., Shen H. A severe negative response of the ionosphere to the intense geomagnetic storm on March 17, 2015 observed at mid- and low-latitude stations in the China zone // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 59, № 9. – P. 2301–2312.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.02.021>

56. Kumar V. V., Parkinson M. L. A Global Scale Picture of Ionospheric Peak Electron Density Changes during Geomagnetic Storms // *Space Weather*. – 2017. – Vol. 15, № 4. – P. 637–652.

<https://doi.org/10.1002/2016SW001573>

57. Paul B., De B. K., Guha A. Latitudinal variation of F-region ionospheric response during three strongest geomagnetic storms of 2015 // *Acta Geodaetica et Geophysica*. – 2018. – Vol. 53, № 4. – P. 579–606.

<https://doi.org/10.1007/s40328-018-0221-4>

58. Crowley, G., Azeem, I. Extreme ionospheric storms and their effects on GPS systems // *Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences*. – 2018. – P. 555–586. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812700-1.00023-6>

59. Blagoveshchensky D. V. Comparison of Ionospheric Parameters during Similar Geomagnetic Storms // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2018. – Vol. 58, № 2. – P. 207–213. <https://doi.org/10.1134/S0016793218020032>

60. Mannucci A. J., Tsurutani B. T. Ionosphere and thermosphere responses to extreme geomagnetic storms // *Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences*. – 2018. – P. 493–511.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812700-1.00020-0>

61. Dmitriev A. Spatial characteristics of recurrent ionospheric storms at low latitudes during solar minimum // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2018. – Vol. 179. – P. 553–561.

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.013>

62. Deminov M. G., Belov A. V., Nepomnyashchaya E. V., Obridko V. N. Parameters of the Geomagnetic Activity, Thermosphere, and Ionosphere for the Ultimately Intense Magnetic Storm // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2018. – Vol. 58, № 4. – P. 501–508.

<https://doi.org/10.1134/S0016793218040059>

63. Ghodpage R. N., Patil P. T., Gurav O. B., Gurubaran S., Sharma A. K. Ionospheric response to major storm of 17th March 2015 using multi-instrument data over low latitude station Kolhapur (16.8°N, 74.2°E, 10.6°dip. Lat.) // *Advances in Space Research*. – 2018. – Vol. 62, № 3. – P. 624–637.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.003>

64. Lei J., Huang F., Chen X., Zhong J., Ren D., Wang W., Yue X., Luan X., Jia M., Dou X., Hu L., Ning B., Owolabi C., Chen J., Li G., Xue X. Was magnetic storm the only driver of the long-duration enhancements of daytime total electron content in the Asian-Australian sector between 7 and 12 September 2017? // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2018. – Vol. 123, № 4. – P. 3217–3232. <https://doi.org/10.1029/2017JA025166>

65. Shpynev B. G., Zolotukhina N. A., Polekh N. M., Ratovsky K. G.,

- Chernigovskaya M. A., Belinskaya A. Y., Stepanov A. E., Bychkov V. V., Grigorieva S. A., Panchenko V. A., Korenkova N. A., Mielich J. The ionosphere response to severe geomagnetic storm in March 2015 on the base of the data from Eurasian high-middle latitudes ionosonde chain // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2018. – Vol. 180. – P. 93–105. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.10.014>
66. Jonah O. F., Coster A., Zhang S., Goncharenko L., Erickson P. J., de Paula E. R., Kherani E. A. TID Observations and Source Analysis During the 2017 Memorial Day Weekend Geomagnetic Storm Over North America // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2018. – Vol. 123, № 10. – P. 8749–8765. <https://doi.org/10.1029/2018JA025367>
67. D'Angelo G., Piersanti M., Alfonsi L., Spogli L., Clausen L. B. N., Coco I., Li G., Baiqi N. The response of high latitude ionosphere to the 2015 St. Patrick's day storm from in situ and ground based observations // *Advances in Space Research*. – 2018. – Vol. 62, № 3. – P. 638–650. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.005>
68. Blagoveshchensky D. V., Sergeeva M. A. Impact of geomagnetic storm of September 7–8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study // *Advances in Space Research*. – 2019. – Vol. 63, № 1. – P. 239–256. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
69. Ngwira C. M., Habarulema J.-B., Astafyeva E., Yizengaw E., Jonah O. F., Crowley G., Gisler A., Coffey V. Dynamic Response of Ionospheric Plasma Density to the Geomagnetic Storm of 22-23 June 2015 // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Vol. 124, № 8. – P. 7123–7139. <https://doi.org/10.1029/2018JA026172>
70. Kumar S., Kumar V. V. Ionospheric Response to the St. Patrick's Day Space Weather Events in March 2012, 2013, and 2015 at Southern Low and Middle Latitudes // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Vol. 124, № 1. – P. 584–602. <https://doi.org/10.1029/2018JA025674>
71. Peddi Naidu P., Latha T. M., Devi M. I. Influence of Geomagnetic Storms on Ionospheric F_2 -Layer at Low and Mid Latitudes in 300° E Meridian // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2019. – Vol. 59, № 8. – P. 995–1002. <https://doi.org/10.1134/S0016793219080152>
72. Uryadov V. P., Vybornov F. I., Pershin A. V. Features of the HF Signal Propagation on Oblique Sounding Paths During Solar and Magnetic Activity in September 2017 // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 62, № 2. – P. 85–98. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09956-z>
73. Jimoh O., Lei J., Zhong J., Owolabi C., Luan X., Dou X. Topside Ionospheric Conditions During the 7–8 September 2017 Geomagnetic Storm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Vol. 124, № 11. – P. 9381–9404. <https://doi.org/10.1029/2019JA026590>
74. Blagoveshchensky D. V., Zhbakov G. A., Maltseva O. A. Observed and Calculated Ionograms of Oblique Ionospheric Sounding on HF Radio Paths During a Magnetic Storm of September 7–8, 2017 // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 61, № 12. – P. 881–892. <https://doi.org/10.1007/s11141-019-09944-3>
75. Zakharenkova I., Cherniak I., Krankowski A. Features of Storm-Induced Ionospheric Irregularities From Ground-Based and Spaceborne GPS Observations During the 2015 St. Patrick's Day Storm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Vol. 124, № 12. – P. 10728–10748. <https://doi.org/10.1029/2019JA026782>
76. Liu J., Zhang D.-H., Coster A. J., Zhang S.-R., Ma G.-Y., Hao Y.-Q., Xiao Z. A case study of the large-scale traveling ionospheric disturbances in the eastern Asian sector during the 2015 St. Patrick's Day geomagnetic storm // *Annales Geophysicae*. – 2019. – Vol. 37, № 4. – P. 673–687. <https://doi.org/10.5194/angeo-37-673-2019>
77. Lai P. C., Burke W. J. Morphologies of the topside ionosphere observed by COSMIC at high-latitudes during the 17 March 2013 magnetic storm // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2019. – Vol. 193. – Paper № 105084. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105084>
78. Denardini C. M., Picanço G. A. S., Barbosa Neto P. F., Nogueira P. A. B., Carmo C. S., Resende L. C. A., Moro J., Chen S. S., Romero-Hernandez E., Silva R. P., Bilibio A. V. Ionospheric Scale Index Map

Based on TEC Data for Space Weather Studies and Applications // Space Weather. – 2020. – Vol. 18, № 9. – Paper № e2019SW002328.

<https://doi.org/10.1029/2019SW002328>

79. Shreedevi P. R., Choudhary R. K., Thampi, Smitha V., Yadav Sneha, Pant T. K., Yu Yiqun, McGranaghan Ryan, Thomas Evan G., Bhardwaj Anil, Sinha A. K. Geomagnetic Storm-Induced Plasma Density Enhancements in the Southern Polar Ionospheric Region: A Comparative Study Using St. Patrick's Day Storms of 2013 and 2015 // Space Weather. – 2020. – Vol. 18, № 8. – Paper № e2019SW002383.

<https://doi.org/10.1029/2019SW002383>

80. Yang Z., Morton Y. T. J., Zakharenkova I., Cherniak I., Song S., Li W. Global View of Ionospheric Disturbance Impacts on Kinematic GPS Positioning Solutions During the 2015 St. Patrick's Day Storm // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2020. – Vol. 125, № 7. – Paper № e2019JA027681.

<https://doi.org/10.1029/2019JA027681>

81. Li S. Temporal evolution analysis of storm-enhanced density during an intense magnetic storm on March 2015 // Advances in Space Research. – 2020. – Vol. 67, № 5. – P. 1570–1579.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.004>

82. Wen D., Mei D. Ionospheric TEC disturbances over China during the strong geomagnetic storm in September 2017 // Advances in Space Research. – 2020. – Vol. 65, № 11. – P. 2529–2539.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.03.002>

83. Despirak I. V., Kleimenova N. G., Gromova L. I., Gromov S. V., Malysheva L. M. Supersubstorms during Storms of September 7–8, 2017 // Geomagnetism and Aeronomy. – 2020. – Vol. 60, № 3. – P. 292–300.

<https://doi.org/10.1134/S0016793220030044>

84. Intiaz N., Younas W., Khan M. Response of the low-to mid-latitude ionosphere to the geomagnetic storm of September 2017 // Annales Geophysicae. – 2020. – Vol. 38, № 2. – P. 359–372. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-359-2020>

85. Qian L., Wang W., Burns A. G., Chamberlin P. C., Solomon S. C. Responses of the Thermosphere and Ionosphere System to Concurrent Solar Flares and Geomagnetic Storms // Journal of Geophysical Research:

Space Physics. – 2020. – Vol. 125, № 3. – Paper № e2019JA027431.

<https://doi.org/10.1029/2019JA027431>

86. Mansilla G. A., Zossi M. M. Longitudinal Variation of the Ionospheric Response to the 26 August 2018 Geomagnetic Storm at Equatorial/Low Latitudes // Pure and Applied Geophysics. – 2020. – Vol. 177, № 12. – P. 5833–5844. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02601-1>

87. Lissa D., Srinivasu V.K.D., Prasad D.S.V.V.D., Niranjana K. Ionospheric response to the 26 August 2018 geomagnetic storm using GPS-TEC observations along 80°E and 120°E longitudes in the Asian sector // Advances in Space Research. – 2020. – Vol. 66, № 6. – P. 1427–1440.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.025>

88. Younas W., Amory-Mazaudier C., Khan M., Fleury R. Ionospheric and Magnetic Signatures of a Space Weather Event on 25–29 August 2018: CME and HSSWs // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2020. – Vol. 125, № 8. – Paper № e2020JA027981. <https://doi.org/10.1029/2020JA027981>

89. Blagoveshchensky D. V. Effects of Geomagnetic Storms in the Low-Latitude Ionosphere // Cosmic Research. – 2020. – Vol. 58, № 4. – P. 234–241.

<https://doi.org/10.1134/s0010952520040024>

90. Şentürk E. Investigation of global ionospheric response of the severe geomagnetic storm on June 22–23, 2015 by GNSS-based TEC observations // Astrophysics and Space Science. – 2020. – Vol. 365, № 7. – Paper № 110.

<https://doi.org/10.1007/s10509-020-03828-z>

91. Rubtsov A. V., Maletckii B. M., Danilchuk E. I., Smotrova E. E., Shelkov A. D., Yasyukevich A. S. Ionospheric disturbances over eastern Siberia during April 12–15, 2016 geomagnetic storms // Solar-Terrestrial Physics. – 2020. – Vol. 6, № 1. – P. 60–68. <https://doi.org/10.12737/STP-61202007>

92. 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>

93. Fejer B. G., Navarro L. A., Sazykin S., Newheart A., Milla M. A., Condor P., Prompt Penetration and Substorm Effects Over Jicamarca During the September 2017 Geomagnetic Storm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126, № 8. – Paper № e2021JA029651. <https://doi.org/10.1029/2021JA029651>
94. Wang Z., Zou S., Liu L., Ren J., Aa E. Hemispheric Asymmetries in the Mid-latitude Ionosphere During the September 7–8, 2017 Storm: Multi-instrument Observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126, № 4. – Paper № e2020JA028829 <https://doi.org/10.1029/2020JA028829>
95. Cheng N., Song S., Li W. Multi-scale ionospheric anomalies monitoring and spatio-temporal analysis during intense storm // *Atmosphere*. – 2021. – Vol. 12, № 2. – Paper № 215. <https://doi.org/10.3390/atmos12020215>
96. Данильчук Е. И., Ясюкевич Ю. В., Ясюкевич А. С., Затолокин Д. А. Влияние геомагнитной бури 17 марта 2015 г. на точность GPS-позиционирования в одночастотном режиме // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2021. – Т. 18, № 1. – P. 31–39. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-1-31-39>
97. Feng J., Zhou Y., Zhou Y., Gao S., Zhou C., Tang Q., Liu Y. Ionospheric response to the 17 March and 22 June 2015 geomagnetic storms over Wuhan region using GNSS-based tomographic technique // *Advances in Space Research*. – 2021. – Vol. 67, № 1. – P. 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.008>
98. Bolaji O. S., Fashae J. B., Adebisi S. J., Owolabi C., Adebisin B. O., Kaka R. O., Jewel Ibanga, Abass M., Akinola O. O., Adekoya B. J., Younas W. Storm Time Effects on Latitudinal Distribution of Ionospheric TEC in the American and Asian-Australian Sectors: August 25–26, 2018 Geomagnetic Storm // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126, № 8. – Paper no. e2020JA029068 <https://doi.org/10.1029/2020JA029068>
99. Sur D., Ray S., Paul A. Impact of CME and HSSW driven geomagnetic storms on thermosphere and ionosphere as observed from midlatitudes // *Advances in Space Research*. – 2021. – Vol. 68, № 3. – P. 1441–1460. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.03.027>
100. Danilov A. D., Konstantinova A. V. Behavior of foF2 prior to geomagnetic storms according to Slough and Juliusruh data // *Advances in Space Research*. – 2021. – Vol. 67, № 12. – P. 4066–4077. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.02.016>
101. Konstantinova A. V., Danilov A. D. Ionospheric Precursors of Magnetic Storms. 3. Analysis of Juliusruh Station Data // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2021. – Vol. 61, № 3. – P. 341–348. <https://doi.org/10.1134/S0016793221030087>
102. Spogli L., Sabbagh D., Regi M., Cesaroni C., Perrone L., Alfonsi L., Mauro D. Di, Lepidi S., Campuzano S. A., Marchetti D., Santis A. De., Malagnini A., Scotto C., Cianchini G., Shen X., Piscini A., Ippolito A. Ionospheric Response Over Brazil to the August 2018 Geomagnetic Storm as Probed by CSES-01 and Swarm Satellites and by Local Ground-Based Observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2021. – Vol. 126, № 2. – Paper no. e2020JA028368. <https://doi.org/10.1029/2020JA028368>
103. 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>
104. 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>
105. 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>

106. Luo Y., Guo Q., Zheng Y., Гармаш К. П., Черногор Л. Ф., Шульга С. М. Ефекти геокосмічної 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>

107. 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>

108. Черногор Л. Ф., Гармаш К. П., Guo Q., Zheng Yu. Эффекты сильной ионосферной бури 26 августа 2018 г.: результаты многотрассового радиофизического мониторинга // Геомагнетизм и аэрономия. – 2021. – Т. 61, №1. – С. 66–84.

109. Птицына Н. Г., Данилова О. А., Тясто М. И., Сдобнов В. Е. Динамика жесткости обрезания космических лучей и параметров магнитосферы во время разных фаз бури 20 ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2021. – Т. 61, № 2. – С. 160–171.

110. Черногор Л. Ф., Кацко С. В. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – 2013. – Т. 3, № 19. – С. 5–17.

111. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.

112. Davies K. Ionospheric radio. London. Peter Peregrinus Ltd. 580 p. 1990.

Принято в печать 15.02.2022 г.

