

УДК 550.388.2

## ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ-РАДИОВОЛН

© 2022 г. В. И. Куркин<sup>1</sup>, \*, Н. М. Полех<sup>1</sup>, \*\*, Н. А. Золотухина<sup>1</sup>, \*\*\*

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ), г. Иркутск, Россия

\*e-mail: vikurkin@yandex.ru

\*\*e-mail: polekh@iszf.irk.ru

\*\*\*e-mail: zolot@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 14.08.2021 г.

После доработки 19.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

По данным вертикального и наклонного зондирования, полученным в северо-восточном регионе России исследованы условия распространения радиоволн во время слабых геомагнитных бурь, наблюдавшихся в осенний период 2018–2020 гг. в минимуме солнечной активности. Обнаружено, что даже во время слабых бурь уменьшение максимальных наблюдаемых частот в дневные часы достигало 25–35%, а ночью – 40–50%. Вариации параметров распространения КВ-радиоволн во время возмущений зависят от пространственно-временной динамики крупномасштабных структур высокоширотной ионосферы, которая в свою очередь определяется процессами магнитосферно-ионосферного взаимодействия. При этом глубина и продолжительность отрицательного возмущения больше в тех случаях, когда геомагнитная буря возникает на возмущенном фоне.

DOI: 10.31857/S0016794022020110

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для периодов геомагнитных бурь характерно нарушение условий распространения радиоволн, проявляющееся в изменениях их параметров, наблюдаемых в точке приема, или отсутствии прохождения [Goodman et al., 2006; Кузнецов, 2014]. Причина нарушений – ионосферные возмущения (ионосферные бури), возникающие при увеличении потока энергии, поступающей из межпланетного пространства в высокоширотную магнитосферу, а затем в другие области внешних геосфер, в том числе в ионосферу и термосферу [Prölss, 2006]. Пространственно-временные масштабы и интенсивность ионосферных возмущений увеличиваются с усилением геомагнитной активности, уровень которой зависит как от количества энергии, поступающей в систему термосфера–ионосфера–магнитосфера, так и от текущего состояния этой системы [Aruliah and Muller-Wodarg, 1999; Danilov and Laštovička, 2001]. Обзоры механизмов, которые могут вносить вклад в развитие положительных и отрицательных фаз ионосферных бурь, даны, например, в [Prölss, 1995; Vuonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Данилов, 2013].

В ионосфере возмущения проявляются в нарушении ее регулярной структуры и динамического режима, появлении дополнительных градиентов

ионизации и образовании мелкомасштабных неоднородностей, генерации волновых возмущений различных масштабов,  $F$ -рассеяния и т.д. Все эти процессы существенным образом влияют на характеристики ионосферного радиоканала, вызывая значительные изменения максимальных наблюдаемых частот (МНЧ), искажение траектории распространения КВ-радиоволн, появление дополнительных мод распространения, сокращение диапазона рабочих частот, рассеяние и ослабление радиосигналов вплоть до их полного исчезновения (black-out). Результаты исследования этих эффектов приведены в обзорных работах и в многочисленных оригинальных статьях, например, [Rogers et al., 2003; Uryadov et al., 2005; Благовещенский, 2011; Kurkin et al., 2006; Warrington et al., 2006; Zolotukhina et al., 2017, 2018; Uryadov et al., 2018; Урядов и др., 2021].

Сильные и экстремальные геомагнитные бури (см. классификацию в работе [Данилов, 2013]) характерны для максимумов солнечной активности и связаны, в основном, с межпланетными выбросами корональной массы (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME). На спаде и в минимуме солнечной активности наиболее часто наблюдаются слабые и умеренные бури, связанные преимущественно с высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр (Coronal

Hole High Speed Stream, CH HSS) и созданными ими вращающимися областями взаимодействия (Corotating Interaction Region, CIR) [Turner et al., 2009].

Нарушения условий распространения КВ-радиоволн в эпоху минимума солнечной активности вызывают особый интерес. Статистический анализ многолетних наблюдений показывает, что около 35% вариабельности ионосферных параметров обусловлены не магнитосферно-ионосферным взаимодействием, а инжекцией энергии в ионосферу снизу [Liu, 2016; Yigit et al., 2016]. Проведенный мониторинг условий распространения КВ-радиоволн в минимуме 23 цикла солнечной активности на сети радиотрасс северо-восточного региона России с 5-ти минутным временным разрешением показал, что даже в спокойных геомагнитных условиях регистрируются существенные вариации МНЧ [Kurkin et al., 2008]. На фоне низкой электронной концентрации эти вариации могут быть вызваны перемещающимися ионосферными возмущениями (ПИВ) и внутренними гравитационными волнами [Fujiwara and Miyoshi, 2006; Tsugawa et al., 2004].

Как уже упоминалось, геомагнитные и ионосферные возмущения в минимуме солнечной активности преимущественно связаны с высокоскоростными потоками солнечного ветра, при этом они могут регистрироваться в течение длительного времени и обычно не сопровождаются значительным ростом  $Kp$  и уменьшением  $Dst$ -индексов. Влияние высокоскоростных потоков на параметры ионосферы и характеристики распространения радиоволн рассмотрено в [Sheiner et al., 2020]. Авторы показали, что отклик ионосферы на воздействие высокоскоростных потоков довольно сложен и неоднозначен.

Данная работа посвящена дальнейшему изучению особенностей распространения КВ радиоволн в минимуме 24 цикла солнечной активности на трассах северо-восточного региона России, характеризующегося максимальным превышением географической широты над геомагнитной. Рассмотрены три магнито-возмущенных периода, включающие слабые геомагнитные бури: 21–24 сентября 2018 г. (одна буря), 27 сентября–02 октября 2019 г. (три бури) и 24–30 сентября 2020 г. (множественные понижения  $Dst$ -индекса до значений  $<-30$  нТл продолжительностью от 2 до 32 ч). В указанные периоды поток солнечного радиоизлучения  $F10.7$  менялся от 66 до 73  $sfu$  (в единицах  $10^{-22}$  Вт  $m^{-2}$  Гц $^{-1}$ ). Выбор экспериментальных данных, относящихся к одному месяцу, позволил исключить влияние сезонных эффектов на ионосферные параметры.

Были проанализированы данные наклонного зондирования многофункционального ЛЧМ-ионозонда “Ионозонд-МС” [Подлесный и др., 2013],

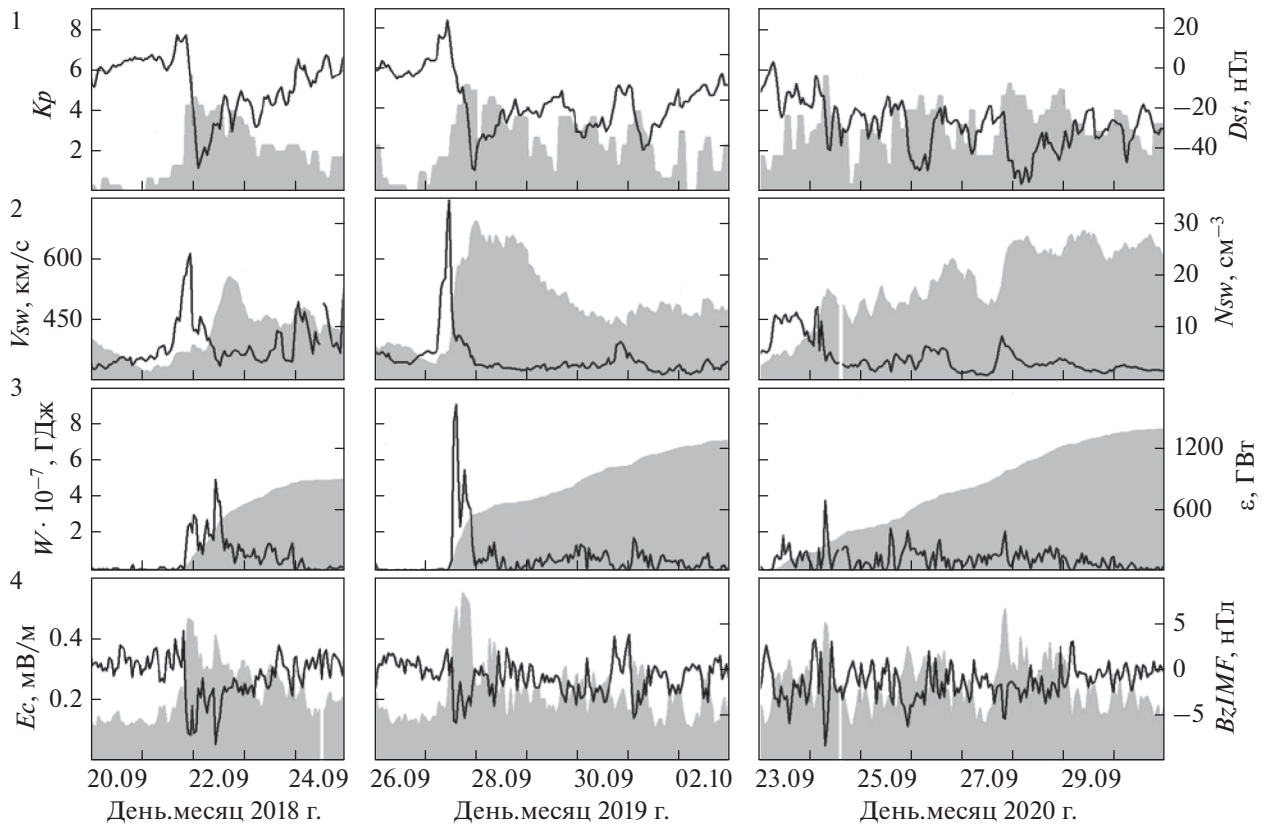
полученные на радиотрассах Норильск–Иркутск (протяженность  $l = 2030$  км, географические координаты средней точки  $\varphi = 60.9^\circ$  N,  $\lambda = 98^\circ$  E, исправленная геомагнитная широта  $\varphi' = 57^\circ$ ) и Магадан–Иркутск ( $l = 3034$  км,  $\varphi = 58.5^\circ$  N,  $\lambda = 125.8^\circ$  E,  $\varphi' = 53.7^\circ$ ), а также данные вертикального зондирования, полученные в Норильске ( $69.4^\circ$  N,  $88.1^\circ$  E,  $\varphi' = 65.3^\circ$ ) и Иркутске ( $52.5^\circ$  N,  $104.0^\circ$  E,  $\varphi' = 48.2^\circ$ ) с использованием дигизондов DPS-4. Северный участок первой трассы расположен в субавроральных широтах. Трасса Магадан–Иркутск относится к среднеширотным трассам, но во время сильных магнитных возмущений северный участок трассы, включая среднюю точку, может находиться в области главного ионосферного провала (ГИП) [Pirog et al., 2009; Полев и др., 2016]. Изменения критических частот  $F2$  слоя ( $foF2$ ) и максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) оценивались относительно их фоновых значений, полученных путем осреднения и последующего сглаживания по трем точкам указанных параметров, измеренных в течение двух магнитоспокойных дней, наиболее близких к началам рассматриваемых возмущений. Это 19 и 20 сентября 2018 г., 25 и 26 сентября 2019 г., 19 и 21 сентября 2020 г.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕЛИОСФЕРНЫХ И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

На рисунке 1 в верхнем ряду на трех панелях показана динамика  $Dst$ - и  $Kp$ -индексов [URL nasa] во время анализируемых ионосферных возмущений. В рядах 2–4 приведены графики изменений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (interplanetary magnetic field, IMF), которые демонстрируют сложную структуру межпланетных источников, воздействовавших на магнитосферу Земли во время рассматриваемых событий [URL NASA]. Для удобства сравнения графики в каждом ряду имеют общие левую и правую оси ординат.

Для определения типов солнечного ветра, сформировавших межпланетные источники возмущений, мы воспользовались результатами их идентификации, размещенными на [URL catalog, URL solar и URL warehouse]. По данным трех сайтов, ионосферно-магнитосферные возмущения 27 сентября–02 октября 2019 г. и 24–30 сентября 2020 г. были вызваны высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр  $CH938$  и  $CH973$  соответственно и вращающимися областями взаимодействия. Последние образуются при взаимодействии  $CH$  HSS с медленным солнечным ветром и характеризуются повышенными значениями плотности ветра и модуля  $IMF$  [Echer et al., 2013].

Идентификация типов солнечного ветра для бури сентября 2018 г. не столь однозначна. Со-



**Рис. 1.** В 1–4 рядах соответственно серые фигуры показывают вариации  $Kp$ -индекса, скорости солнечного ветра ( $V_{sw}$ ), поступившей энергии и поля конвекции; черные линии — изменения  $Dst$ , плотности ( $N_{sw}$ ) солнечного ветра, параметра Акасофу и  $B_z IMF$ .

гласно [URL catalog], главная фаза и первые 7 ч восстановительной фазы этой бури были вызваны структурой типа Sheath. Так обозначают область сжатого солнечного ветра и  $IMF$ , образующуюся перед  $ICME$  [Takahashi and Shibata, 2017]. На [URL catalog] вместо  $ICME$  использован термин Ejecta. Последующие 40 ч восстановительной фазы развивались, в соответствии с [URL catalog], под комбинированным воздействием 4-х типов солнечного ветра: Sheath, Ejecta,  $CIR$  и Fast ( $CH HSS$ ). Отметим, однако, что на двух других сайтах структуры Sheath и Ejecta идентифицированы как  $CIR$  и  $CH HSS$  соответственно. В пользу такой идентификации свидетельствует отсутствие в дни, предшествующие началу бури, геоэффективных выбросов корональной массы (см. сайты [URL solar; URL CME]). Основываясь на этом, мы полагаем, что главными драйверами всех рассматриваемых геомагнитных возмущений были  $CH HSS$  и/или  $CIR$ , что характерно для бурь, развивающихся на спаде солнечной активности [Echer et al., 2013].

Для количественной оценки потока энергии, поступавшей в магнитосферно-ионосферную систему в течение бурь, использован параметр Акасофу  $\epsilon$  [Akasofu, 1981], динамика которого, а так-

же вычисленной по нему поступавшей в систему суммарной энергии ( $W$ ), приведены в третьем ряду панелей рис. 1. Величина  $\epsilon$  определялась по параметрам солнечного ветра и  $IMF$ , размещенным на [URL NASA]. На панелях ряда 4 показаны, также, вариации напряженности поля магнитосферной конвекции ( $E_c$ ), вычисленной с учетом динамического давления солнечного ветра ( $P_{sw}$ ) по формулам, приведенным в [Burke et al., 2007]. Более подробно динамика рассматриваемых взаимосвязанных магнитосферно-ионосферных возмущений будет представлена в следующем разделе.

### 3. АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ДАННЫХ

**3.1.** Как следует из рис. 1 (левые панели), слабая магнитная буря 21–24 сентября 2018 г. (максимум  $Kp = 5$  — в 00:00–03:00 UT и минимум  $Dst = -48$  нТл в 03:00–04:00 UT 22 сентября) началась после 15:00 UT 21 сентября [URL NASA]. Она имела четко выраженные 6-часовую начальную фазу с максимумами  $Dst$ -индекса 18 нТл в 17:00–18:00 и 21:00–22:00 UT 21 сентября, 6-часовую главную фазу и длившуюся около 2 суток фа-

зу восстановления, во время которой наблюдались множественные усиления поля кольцевого тока. Начало главной фазы совпало по времени с переходом вертикальной компоненты  $IMF$  ( $B_z IMF$ ) от  $B_z IMF > 0$  к  $B_z IMF < 0$ , усилением азимутальной компоненты  $IMF$  ( $B_y IMF$ , на рисунке не показана) и поля конвекции, а также с увеличением параметра Акасофу.

На рис. 2 данные вертикального и наклонного зондирования, полученные во время этой бури в Норильске, Иркутске и на трассе Норильск–Иркутск, сопоставлены с изменениями  $SYM-H$ -индекса [URL Kyoto], давления солнечного ветра и исправленной геомагнитной широты дна ГИП, рассчитанной по модели [Демин и Шубин, 2018] для меридиана  $90^\circ$  Е. Горизонтальные штриховые линии показывают исправленные геомагнитные широты Норильска и средней точки трассы Норильск–Иркутск. На рис. 2а–2д, 4б–4г и 5б–5г черные/серые линии соответствуют текущим/фоновым значениям  $MNCH1F2$  – максимальных наблюдаемых частот однокачкового мода ( $1F2$ ) и  $foF2$ . Кружками показаны значения  $MNCH2Es$  – максимальных наблюдаемых частот двухкачкового мода ( $2Es$ ) и предельных частот спорадического слоя ( $foEs$ ).

Видно, что в магнитоспокойный день 20 сентября ( $\Sigma Kp < 2$ ) текущие значения всех ионосферных параметров близки к фоновым. В 02:00–10:00 UT 21 сентября  $foF2$  в Норильске и  $MNCH1F2$  на трассе Норильск–Иркутск были на  $\sim 10\%$  и  $\sim 15\%$  соответственно выше фоновых значений. Возможно, что это слабое повышение является проявлением эффекта предбурового увеличения электронной концентрации [Благовещенский, 2011; Danilov and Konstantinova, 2019].

По данным вертикального зондирования в начальную фазу бури во время первого увеличения  $P_{sw}$  (15:15–18:40 UT, максимум  $\sim 3.5$  нПа) в Норильске появились диффузные отражения от  $F2$  слоя с критическими частотами, превышающими фоновые значения на 0.5–1.0 МГц и спорадические слои с  $foEs$ , близкими к наблюдаемому  $foF2$ . Около 20:00 UT во время следующего увеличения  $P_{sw}$  появились экранирующие спорадические слои,  $foEs$  которых достигла  $\sim 8.5$  МГц во время максимума  $P_{sw}$  ( $\sim 8.5$  нПа в 23:20 UT), а затем резко упала до  $\sim 4$  МГц одновременно с падением давления до 2.1 нПа в 00:00 UT 22 сентября. Значения  $MNCH$  на трассе Норильск–Иркутск и  $foF2$  в Иркутске, полученные во время указанных повышений  $P_{sw}$ , были по-прежнему близки к фоновым.

Отражения от спорадических слоев появлялись на ионограммах Норильска до конца 24 сентября. При этом ночью при повышениях  $P_{sw}$  они были экранирующими с  $foEs$ , значительно превышающими фоновые значения  $foF2$ . Появление

экранирующих спорадических слоев и увеличение их предельных частот при повышении  $P_{sw}$  указывают на то, что в ночные часы 21–24 сентября станция Норильск находилась в зоне диффузных высыпаний. Ночью 21 сентября (в начальную фазу и первые часы главной фазы) граница диффузных высыпаний располагалась севернее средней точки трассы Норильск–Иркутск. Поэтому значительных различий между фоновыми и текущими значениями  $MNCH1F2$ , а также  $foF2$  в Иркутске в это время не было.

Заметные изменения условий распространения радиоволн начались около 02:30 UT 22 сентября, через  $\sim 4.5$  ч после начала главной фазы. К этому времени в магнитосферно-ионосферно-термосферную систему из межпланетного пространства с начала геомагнитной бури поступило  $\sim 1.13 \times 10^7$  ГДж энергии (рис. 1, ряд 3, левая панель). На трассе Норильск–Иркутск  $MNCH1F2$  снизились на  $\sim 2.5$  МГц (на  $\sim 15\%$ ) относительно фона, и в течение дневных часов они оставались пониженными на 15–20%. В это время в Норильске наблюдалось отрицательное ионосферное возмущение, во время которого  $foF2$  снизилась до  $\sim 4$  МГц. На стилизованных ионограммах наклонного зондирования, очищенных от шумовых помех, наблюдались искажения треков, обусловленные прохождением ПИВов (рис. 3а, 3б). Рис. 3в иллюстрирует изменения амплитуды колебаний, выделенных с помощью полосового фильтра Марме [Marmet, 1979] из исходных данных. Видно, что даже в спокойных геомагнитных условиях 20 сентября в вариациях всех приведенных параметров присутствуют колебания. Возможной причиной появления колебаний  $MNCH$  могут быть акустико-гравитационные волны [Yigit et al., 2016]. Амплитуда колебаний возросла в вариациях  $B_z IMF$  и  $B_y IMF$  в начальную фазу бури, в вариациях  $MNCH$  – в ее главную фазу.

В вечерние часы 22 сентября в Норильске низкие значения  $foF2$  сменились после 11:30 UT экранирующими спорадическими слоями, которые регистрировались до 05:15 UT 23 сентября. На трассе Норильск–Иркутск в 13:08–15:35 UT наблюдалось превышение текущих значений  $MNCH1F2$  над фоновыми на 25–35%. Превышение критических частот было зарегистрировано над Иркутском в течение более длительного времени (с 09:45 до 16:25 UT). На трассе Норильск–Иркутск с 17:35 UT 22 сентября до 00:50 UT 23 сентября прохождение радиосигналов отсутствовало. Можно предположить, что в этом интервале северный участок трассы, включая среднюю точку, находился в области ГИП. Такое смещение ГИП может быть объяснено длительным существованием усиленной магнитосферной конвекции ( $E_c = 0.13$ – $0.37$  мВ/м до 05:00 UT 24 сентября) и медленным восстановлением структуры магнитосферы после геомагнитных возмущений

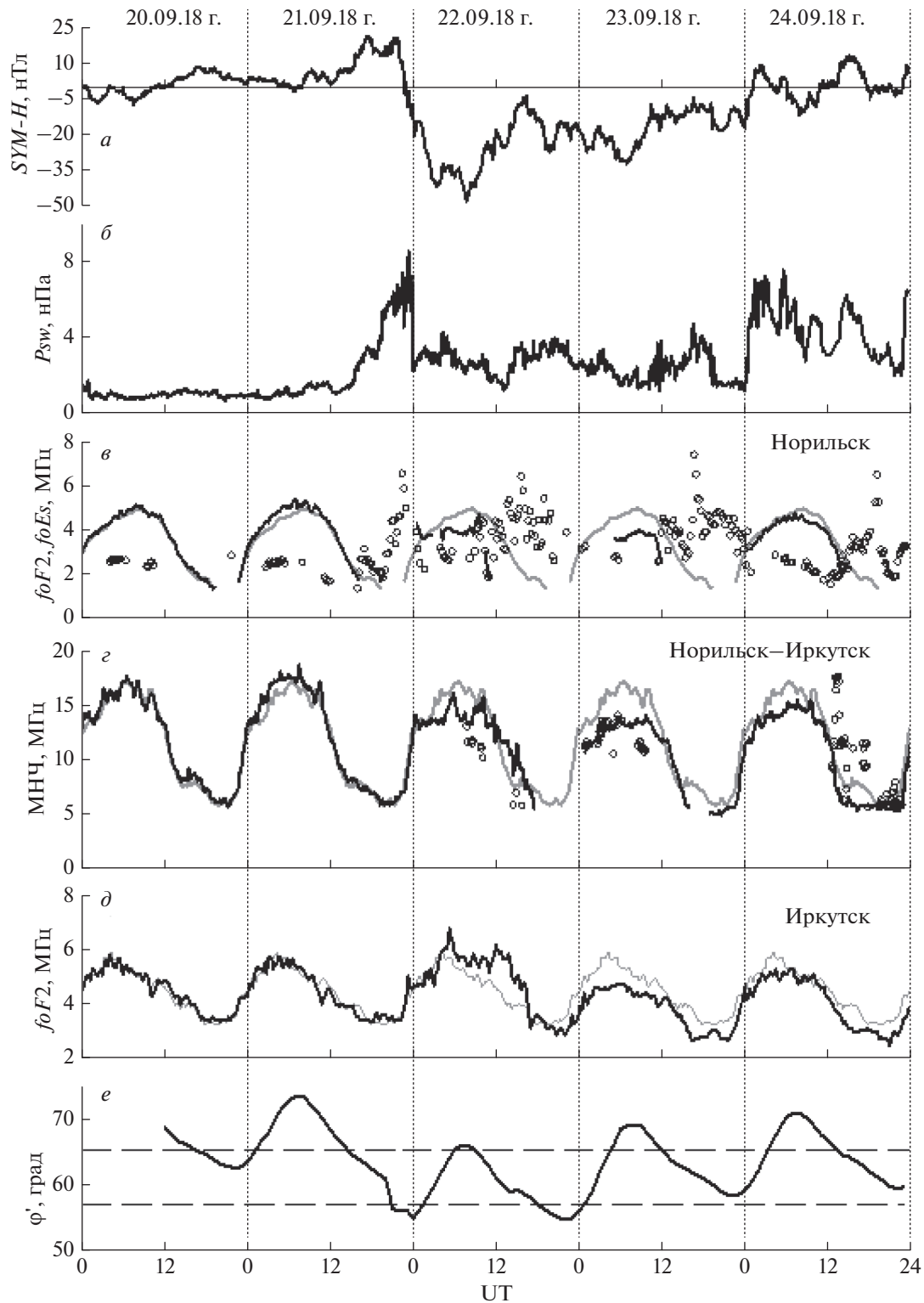
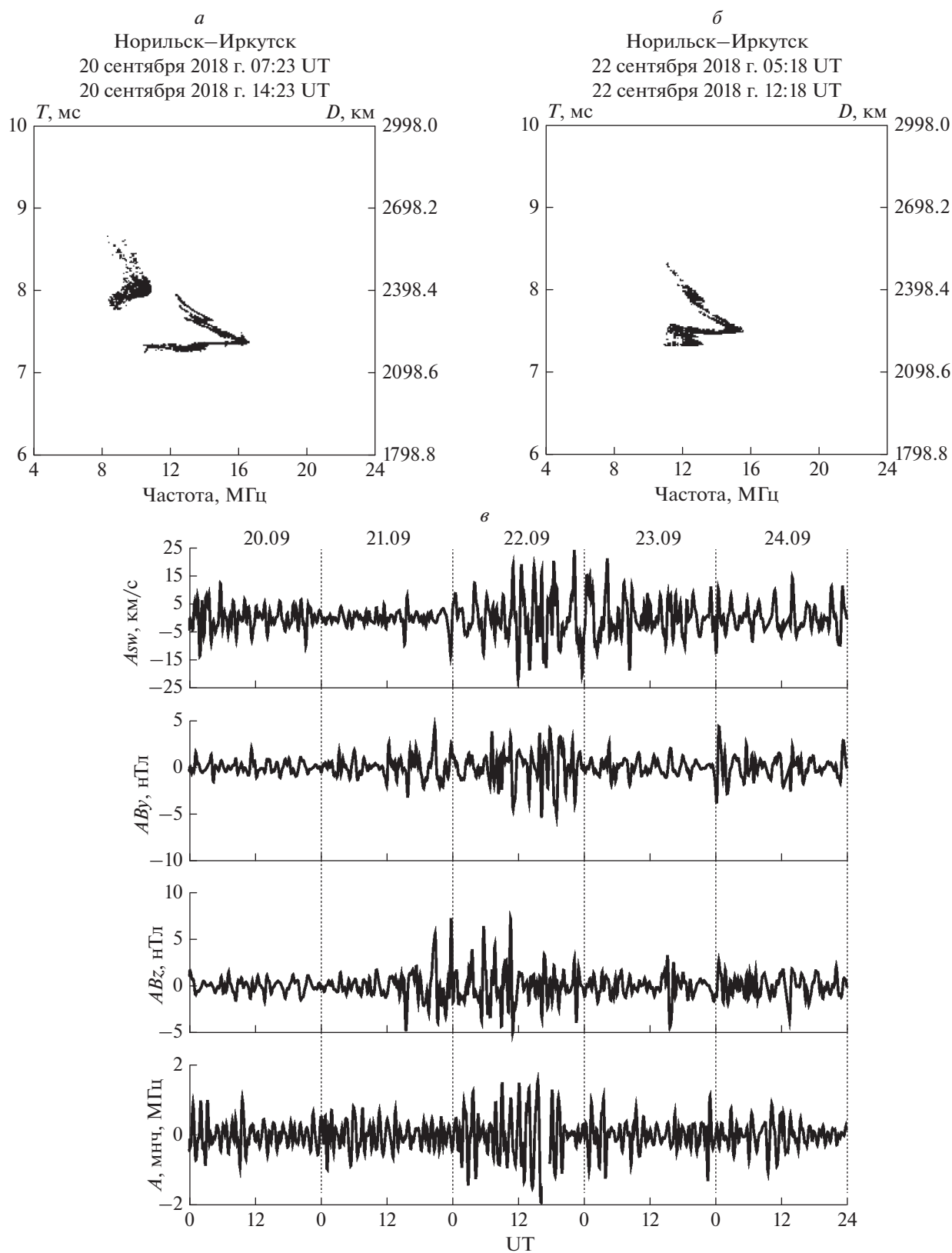


Рис. 2. Вариации  $SYM-H$ -индекса (а);  $P_{sw}$  (б);  $foF2$  и  $foEs$  в Норильске (в);  $MUF2$  и  $MUF2Es$  на трассе Норильск–Иркутск (г);  $foF2$  в Иркутске (д) и широты дна ГИП (е).

[Кринберг и Ташилин, 1984]. Расчеты, приведенные на рис. 2е, подтверждают предположение о том, что после 18:00 UT 22 сентября ГИП мог сместиться на меридиане  $90^\circ$  E до  $\phi' = 57^\circ$ .

Наибольший спад  $foF2$  и  $MUF2$  (~30–35%) наблюдался в дневные часы 23 сентября. Такое уменьшение всех параметров вызвано развитием длительного отрицательного ионосферного воз-



**Рис. 3.** Ионограммы наклонного зондирования, полученные на трассе Норильск–Иркутск в спокойных (*а*) и возмущенных (*б*) условиях; вариации амплитуды колебаний  $V_{sw}$  ( $A_{sw}$ ),  $BuIMF$  ( $ABu$ ),  $BzIMF$  ( $ABz$ ) и  $MHC1F2$  ( $A_{mnc}$ ) на этой трассе в течение магнитных возмущений 20–24 сентября 2018 г. (*в*).

мушения, связанного с изменением состава термосферы [URL guvi]. Оно обусловлено тем, что к началу 23 сентября количество поступившей во внешние геосферы энергии возросло до  $\sim 3.6 \times 10^7$  ГДж.

В последующие сутки 24 сентября в утренние и дневные часы значения  $MNCH1F2$  и  $foF2$  в Иркутске были на  $\sim 10$ – $15\%$  меньше фоновых, а критические частоты в Норильске близки к ним. В это время на трассе Норильск–Иркутск прохождения радиосигналов осуществлялось односкачковым модом. После 17:05 UT наблюдалось распространение двумя модами ( $1F2$  и  $2Es$ ), при этом  $MNCH2Es$  значительно превышала  $MNCH1F2$ .

**3.2. Магнитовозмущенный период 27 сентября–02 октября 2019 г.** содержит три понижения  $Dst$  индекса до уровня ниже  $-30$  нТл. На графике, представленном на средней панели в 1-м ряду рис. 1, видны понижения  $Dst$  до  $-49$  нТл в 23:00–24:00 UT 27 сентября,  $-33$  нТл в 02:00–04:00 UT 30 сентября и  $-38$  нТл в 07:00–08:00 UT 1 октября. Согласно приведенной в [Gonzalez et al., 1994] классификации, эти понижения могут быть идентифицированы как слабые магнитные бури. Для краткости изложения будем называть возмущения с минимумами  $Dst$ , наблюдавшимися 27, 30 сентября и 1 октября первой, второй и третьей бурей. В указанные дни  $Kp$ -индекс повышался соответственно до  $5+$ ,  $4-$  и  $4$ .

Первая магнитная буря имеет, аналогично рассмотренной выше буре сентября 2018 г., ярко выраженные начальную и главную фазы. Буря началась с резкого роста  $Dst$ -индекса от 6 до 18 нТл в интервале 05:00–06:00 UT и затем до 25 нТл в 10:00–11:00 UT 27 сентября. После этого  $Dst$ -индекс почти монотонно уменьшался в течение 13 часов до минимального значения. Этой буре соответствовал длительный ( $\sim 24$  ч) период с  $Bz/IMF < 0$  за исключением кратковременных интервалов, когда она была положительной.

На рис. 4 приведены вариации  $MNCH1F2$  и  $MNCH2Es$ , зарегистрированных на трассах Магадан–Иркутск и Норильск–Иркутск. Перед бурей и в ее начальную фазу в дневные часы 27 сентября на обеих трассах регистрировался слабый рост МНЧ на 10–12%. После 14:00 UT 27 сентября отраженные сигналы на ионограммах обеих трасс исчезли почти одновременно. Расчеты положения дна главного ионосферного провала, выполненные по модели [Демин и Шубин, 2018] на меридианах  $90/135^\circ E$  (сплошная/штриховая линия) показали, что в это время значительные участки обеих радиотрасс, включая их средние точки (горизонтальные штриховые линии отмечают широты средних точек трасс Норильск–Иркутск и Магадан–Иркутск), могли находиться в области ГИП (рис. 4д).

Поле конвекции было усиленным ( $E_s = 0.2$ – $0.4$  мВ/м) до 11:00 UT 28 сентября, что способствовало формированию ГИП на средних участках трасс в ночные часы. Поэтому в интервалах 14:30–20:15 UT на трассе Магадан–Иркутск и 12:30–23:00 UT на трассе Норильск–Иркутск 28 сентября прохождения радиосигналов, как и 27 сентября, не было.

Отличительной особенностью отклика ионосферы на бурю 27–28 сентября 2019 г. являются крупномасштабные колебания  $MNCH1F2$ , которые появились практически одновременно на обеих трассах после 02:00 UT в дневные часы 28 сентября (восстановительная фаза 1-й бури). К началу этого дня из межпланетной среды во внешние геосферы поступило с момента начала бури  $\sim 3.1 \times 10^7$  ГДж энергии, часть которой была потрачена на изменение состава атмосферы, вызвавшего отрицательное дневное ионосферное возмущение. Основная часть энергии  $\sim 2.5 \times 10^7$  ГДж была внесена в течение 11 часов главной фазы (в 13:00–24:00 UT 27 сентября) при максимальных для данного события значениях  $E_s = 0.32$ – $0.56$  мВ/м. Следует отметить, что подобные колебания регистрировались также на следующий день 29 сентября в дневные часы на фоне крупномасштабного положительного возмущения.

Вторая геомагнитная буря началась на возмущенном геомагнитном фоне ( $Dst = -13$  нТл,  $Kp = 4-$  после 16:00 UT 29 сентября с незначительного роста  $Dst$  на 3 нТл. В течение главной фазы  $Dst$ -индекс трижды резко уменьшался за час на 7, 9 и 3 нТл и достиг через 10 ч минимального значения  $Dst = -33$  нТл.

На трассе Магадан–Иркутск 30 сентября значения  $MNCH1F2$  были на 20–25% ниже фоновых, в то время как на трассе Норильск–Иркутск почти не отличались от них, за исключением ночных часов, когда распространение радиосигналов в основном отсутствовало. К началу суток 30 сентября сумма поступившей во внешние геосферы энергии выросла до  $4.8 \times 10^7$  ГДж, из которых только  $0.5 \times 10^7$  ГДж поступили в течение главной фазы второй бури. Во время главной и восстановительной фаз поле магнитосферной конвекции менялось в пределах 0.12–0.31 мВ/м со средним значением  $E_s$ , равным 0.23 мВ/м.

Третья слабая буря началась после 00:00 UT 1 октября. Подобно второй буре, она развивалась на возмущенном фоне при  $Dst = -13$  нТл и  $Kp = 4-$ . В главную фазу суммарная энергия, поступившая во внешние геосферы, увеличилась на  $0.5 \times 10^7$  ГДж, а поле магнитосферной конвекции усилилось до  $\sim 0.3$  мВ/м. Во время бури наблюдалось уменьшение МНЧ односкачкового мода на обеих трассах в дневные часы и появление экраняющих спорадических слоев ночью, в результате чего распространение радиосигналов осу-



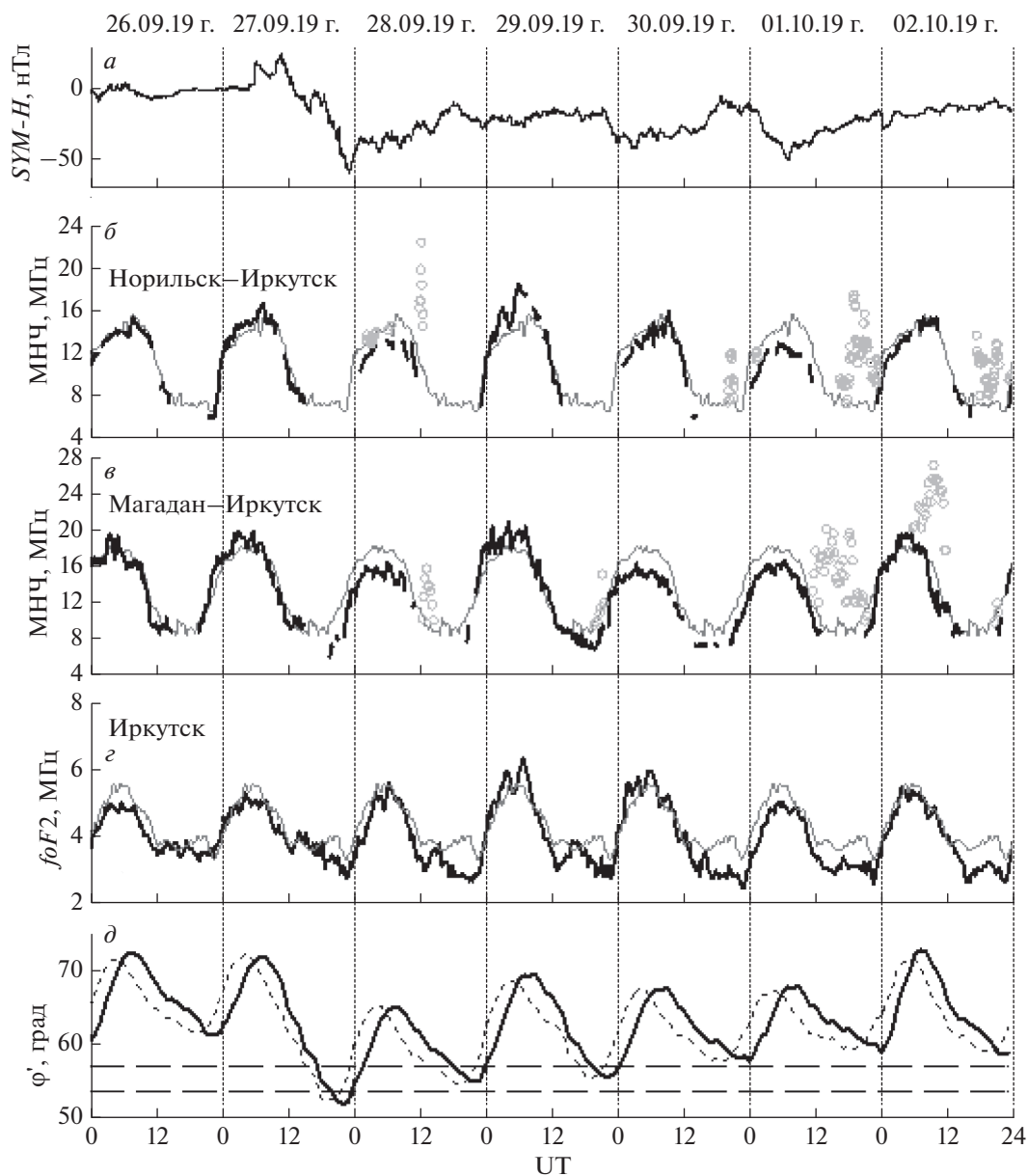


Рис. 4. Вариации:  $SYM-H$ -индекса (а);  $MUF_{3000}$  и  $MUF_{3000}Es$  на трассах Норильск–Иркутск (б) и Магадан–Иркутск (е);  $foF2$  в Иркутске (з); широты дна ГИП (д).

шествялось только модом  $2Es$ , максимальные наблюдаемые частоты которого заметно превышали фоновые значения  $MUF_{3000}1F2$ . Судя по картам полного электронного содержания (URL-pasa), можно предположить, что средние точки обеих трасс могли находиться в области ГИП, хотя приведенные модельные расчеты не подтверждают это. Расхождение можно объяснить тем, что ко времени начала третьей бури ионосфера над исследуемым регионом находилась в возмущенном состоянии. Состав термосферы и границы ГИП не были окончательно восстановлены, что объяс-

няет отсутствие регулярных отражений от  $F2$  слоя и появление высоких значений  $MUF_{3000}2Es$ .

К началу суток 2 октября значения  $MUF_{3000}1F2$  на трассе Магадан–Иркутск и дневные  $foF2$  в Иркутске практически восстановились. С 05:40 до 11:55 UT в позднюю восстановительную фазу третьей бури на трассе Магадан–Иркутск одновременно с модом  $1F2$  регистрировались отражения от спорадического слоя. На трассе Норильск–Иркутск ночью наблюдалось распространение КВ радиосигнала только модом  $2Es$ . Отметим, что в Иркутске в ночные часы в течение всего возму-



шенного интервала 27 сентября–2 октября 2019 г.  $f_oF2$  были ниже фоновых на ~18–20%.

**3.3.** Сравнивая приведенные на рис. 1 графики, видим, что возмущенный период 24–30 сентября 2020 г. характеризуется более сложными вариациями межпланетного магнитного поля и геомагнитных индексов, чем сентябрьские бури 2018 и 2019 гг., длительным воздействием высокоскоростного потока солнечного ветра, а также медленным и плавным вводом энергии из межпланетной среды во внешние геосферы. Для этого события характерны многократные понижения  $Dst$  индекса до значений, меньших –30 нТл, но больших –50 нТл. Формально, каждое из этих понижений может быть рассмотрено как слабая геомагнитная буря [Gonzalez et al., 1994]. Однако все они связаны с одним внешним источником – высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры  $CH973$  [URL solar], имеющим очень неоднородную структуру. Этот факт ставит под сомнение целесообразность разбиения наблюдавшегося 24–30 сентября 2020 г. продолжительного возмущения на отдельные геомагнитные бури.

Детальное сопоставление графиков, приведенных на правых панелях рис. 1, показывает, что все значительные понижения  $Dst$  и повышения  $Kp$  индексов совпадают по времени с усилениями  $E_s$ , способствующими поддержанию магнитосферно-ионосферной системы в возмущенном состоянии.

На рис. 5б, 5в приведены вариации  $MNЧ1F2$  и  $MNЧ2E_s$ , зарегистрированные на трассах Норильск–Иркутск и Магадан–Иркутск во время этого продолжительного возмущения. Кратковременное усиление направленной к югу  $B_z IMF$  до –8.3 нТл в ~07:30 UT 24 сентября (рис. 1, ряд 4, правая панель) вызвало резкие увеличения  $E_s$  и  $Kp$  до самых высоких из рассматриваемых случаев величин 0.46 мВ/м и 6– соответственно, а также относительно неглубокое понижение  $Dst$  до –40 нТл. Несмотря на то, что данное возмущение было непродолжительным, на трассе Магадан–Иркутск в вечерние часы 24 сентября наряду с основными модами появились отражения от спорадических слоев. При этом величины  $MNЧ1F2$  уменьшились на 3–4 МГц, а  $MNЧ2E_s$  были высокими.

Последующие изменения геомагнитной активности, проявившиеся в вариациях  $Kp$ - и  $Dst$ -индексов, не способствовали устойчивому приему сигналов на обеих трассах. На трассе Норильск–Иркутск принимались слабые сигналы, что может быть объяснено усилившимся поглощением. Это подтверждается данными риометра, установленного на выносном пункте “Исток” вблизи Норильска. Прохождение односкачкового мода эпизодически наблюдалось 25 сентября в

01:50–10:00 UT и в отдельные часы вечером, а на трассе Магадан–Иркутск в послеполуденные часы (05:10–10:10 UT) и кратковременно в 13:40–14:30 UT. Ночью в течение длительного времени прохождение радиосигналов на обеих трассах отсутствовало.

Следующее увеличение направленной к югу компоненты  $IMF$ , начавшееся после 18:00 UT 25 сентября (экстремальное значение  $B_z IMF = -6.1$  нТл в 22:30 UT) вновь привело к усилению поля магнитосферной конвекции до 0.38 мВ/м, росту  $Kp$  до 5– и бухтообразному понижению  $Dst$  до –50 нТл. В утренние и дневные часы 26 сентября на обеих трассах регистрировались пониженные на 25–30% значения  $MNЧ1F2$ . В ночь этого дня на трассе Норильск–Иркутск прохождения радиосигналов не было, а на трассе Магадан–Иркутск текущие значения  $MNЧ1F2$  были в 2 раза меньше фоновых.

В последующие дни динамика  $MNЧ1F2$  на исследуемых трассах подобна наблюдавшейся 26 сентября. На трассе Норильск–Иркутск эпизодически регистрировались  $MNЧ1F2$ , пониженные утром и близкие к фоновым после полудня. Исключением являются дневные часы 29 сентября, когда величины  $MNЧ$  односкачкового мода были на 1.5–2.0 МГц ниже фоновых. На графиках  $MNЧ1F2$ , построенных по данным трассы Магадан–Иркутск, видно, что они близки к фоновым только в 23:00–24:00 UT 26 сентября и около 10:00 UT 27 сентября. Большую часть суток  $MNЧ1F2$  или значительно ниже фоновых, или не регистрируются из-за отсутствия прохождения сигнала, что происходит преимущественно в 18:00–23:00 UT. Для средней точки трассы это соответствует сектору 02:30–07:30 LT, в центре которого расположена область наименьшей широты дна ГИП, наблюдаемого при фиксированных значениях  $Kp/ap$ -индекса [Демин и Шубин, 2018]. Можно полагать, что в это время участок трассы, прилегающий к средней точке, был расположен в области ГИП. Согласно модельным расчетам, показанным на рис. 5д, в ночные и ранние утренние часы средняя точка трассы Норильск–Иркутск находилась вблизи дна ГИП с 25 по 30, а трассы Магадан–Иркутск – в ранние утренние часы 27–28 сентября.

Вариации критической частоты в Иркутске (рис. 5з) показывают ее увеличение в послеполуденные часы относительно фоновых значений и значительное (от 30 до 46%) уменьшение ночью на протяжении всего возмущенного периода. Это существенно отличает событие сентября 2020 г. от рассмотренных ранее ионосферных бурь в сентябре 2018 и 2019 гг., во время которых  $f_oF2$  в Иркутске уменьшались не более, чем на 25%.

Следующее заметное отличие заключается в том, что во время возмущений 24–30 сентября

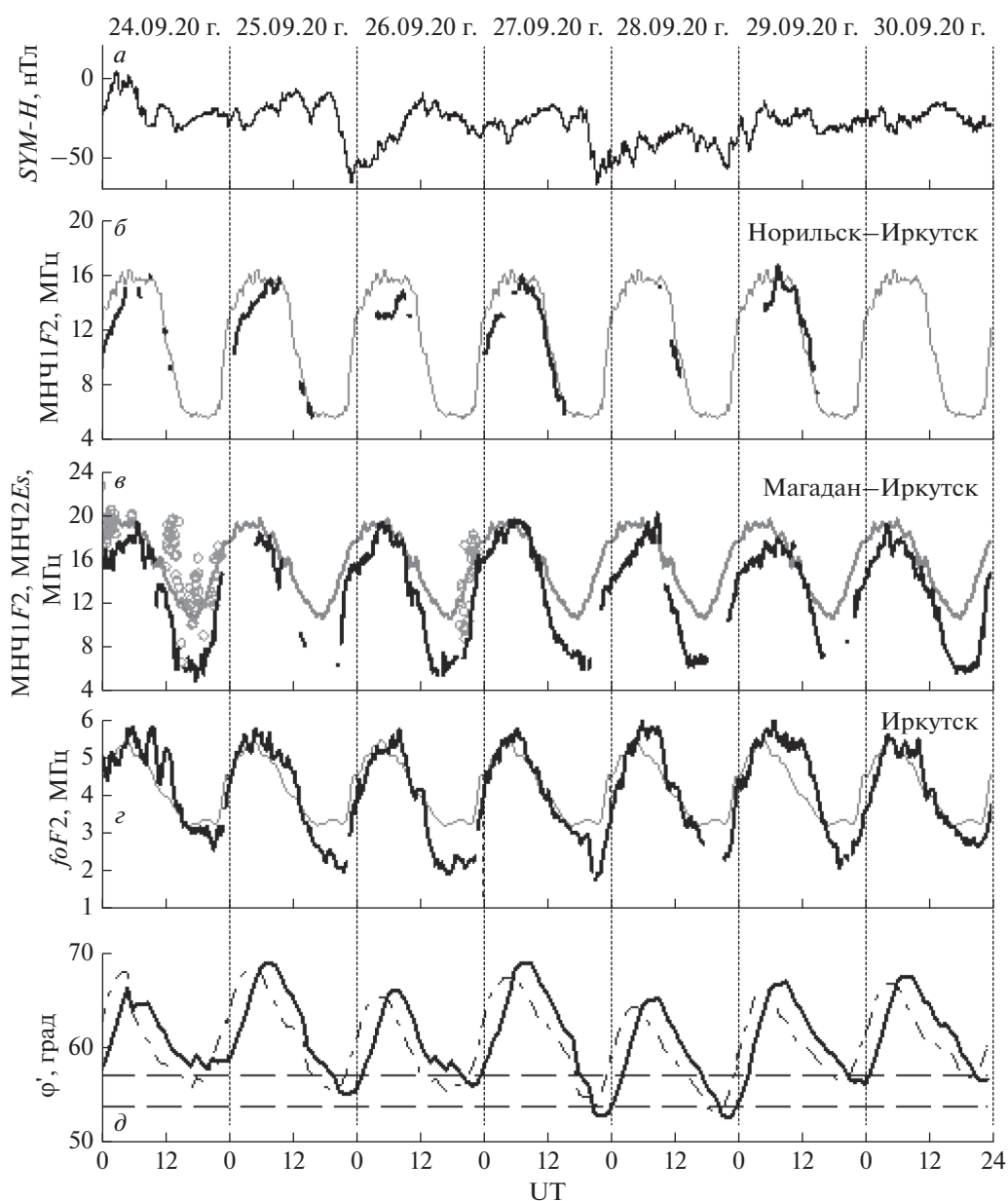


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для 24–30 сентября 2020 г.

2020 г. отрицательное возмущение в МНЧ1F2 наблюдалось на трассе Магадан–Иркутск в течение почти полных суток. Исключением являются слабые кратковременные положительные возмущения, зарегистрированные на этой трассе в 07:00–08:00 UT 27 и в 08:30–09:30 UT 28 сентября, в то время как по данным вертикального зондирования в Иркутске повышенные относительно фона послеполуденные значения  $foF2$  наблюдались во все рассмотренные дни.

Мы полагаем, что указанные отличия обусловлены тем, что воздействие CIR и высокоскоростного потока из CH973 на магнитосферу Земли на-

чалось 23 сентября – за день до рассмотренного нами интервала [URL catalog; URL solar]. На правых панелях рис. 1 видно, что приход CIR и CH HSS проявился в увеличении плотности и скорости солнечного ветра, повороте к югу  $BzIMF$ , росте параметра Акасофу и усилении поля конвекции. Это вызвало понижение  $Dst$ -индекса до  $-24$  нТл, увеличение  $Kp$  до 4– и, по предварительным данным,  $AE$ -индекса до 1200 нТл [URL kyoto]. Усиление авроральной активности привело к разогреву высокоширотной ионосферы и изменению ее состава, отчетливо видному на картах GUVI за 23 сентября [URL guvi].

## 4. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ вариаций максимальных наблюдаемых частот в эпоху минимума солнечной активности на трассах Норильск–Иркутск и Магадан–Иркутск, проходящих через субавроральные широты и вблизи них, а также критических частот в приеме-передающих пунктах позволил сделать следующие выводы.

1. Длительное воздействие на магнитосферно-ионосферно-термосферную систему высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр приводит к значительным нарушениям условий распространения КВ-радиоволн на этих трассах даже в минимуме солнечной активности. Во время слабых геомагнитных бурь, вызванных *CIR* и *CH HSS*, в дневные часы понижения максимальных наблюдаемых частот однокачкового мода могут достигать 25–35%, в вечерние и ночные часы – 40–50%. В отдельных случаях прохождение сигналов отсутствует в течение длительного времени.

2. На меридиональной трассе Норильск–Иркутск реализуются более сложные условия прохождения радиоволн, чем на широтной трассе Магадан–Иркутск, т.к. во время возмущений значительный участок первой трассы охватывает область главного ионосферного провала и зону диффузных высыпаний. В результате основным модом распространения КВ-радиоволн является  $2E_s$ . Максимальная наблюдаемая частота этого мода значительно превышает МНЧ основного мода  $1F_2$ .

3. Предложенная в работе [Демин и Шубин, 2018] модель положения дна главного ионосферного провала хорошо согласуется с экспериментальными данными и может быть использована для оценки условий распространения радиоволн во время слабых и умеренных магнитных бурь.

## 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены на базе наблюдений, проводимых с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckprf.ru/skr/3056>). Мы благодарим менеджеров сайтов (<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi->), (<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>), [http://www.solen.info/solar/old\\_reports](http://www.solen.info/solar/old_reports), <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>, [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/), <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval1.cgi>, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>) за возможность использования информации, размещенной на этих сайтах.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Благовещенский Д.В.* Распространение декаметровых радиоволн во время геомагнитных возмущений. СПб.: ГУАП, 394 с. 2011.
- *Данилов А.Д.* Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // *Гелиогеофизические исследования*. № 5. С. 1–33. 2013.
- *Демин М.Г., Шубин В.Н.* Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 58. № 3. С. 366–373. 2018.
- *Кринберг И.А., Тащилин А.В.* Ионосфера и плазмосфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- *Кузнецов В.Д.* Космическая погода и риски космической деятельности // *Космическая техника и технологии*. № 3(6). С. 3–13. 2014.
- *Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И., Березовский В.А., Киселёв А.М., Петухов Е.В.* Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы // *Гелиогеофизические исследования*. Вып. 4. С. 24–31. 2010.
- *Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Подлесный А.В.* Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 56. № 5. С. 591–605. 2016.
- *Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В.* Вариации диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на субавроральной трассе во время магнитно-ионосферной возмущенности в октябре 2016 года // *Изв. ВУЗов. Радиофизика*. Т. 64. № 2. С. 83–94. 2021.
- *Akasofu S.I.* Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* V. 28. № 2. P. 121–190. 1981.  
<https://doi.org/10.1007/BF00218810>
- *Aruliah A.L., Muller-Wodarg I.C.F.* Consequences of geomagnetic history on the high-latitude thermosphere and ionosphere: Averages // *J. Geophys. Res.* V. 104. № 12. P. 28073–28088. 1999.
- *Buonsanto M.J.* Ionospheric storms – a review // *Space Sci. Rev.* V. 88. № 3–4. 563–601. 1999.
- *Burke W.J., Huang C.Y., Marcos F.A., Wise J.O.* Interplanetary control of thermospheric densities during large magnetic storms // *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* V. 69. № 3. P. 279–287. 2007.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.05.027>
- *Danilov A.D., Laštovička J.* Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere // *Inter. J. Geomagn. Aeronomy*. V. 2. № 3. P. 209–224. 2001.
- *Danilov A.D., Konstantinova A.V.* Behavior of the ionospheric F region prior to geomagnetic storms // *Advances in Space Research*. V. 64. № 7. P. 1375–1387. 2019.
- *Echer E., Tsurutani B.T., Gonzalez W.D.* Interplanetary origins of moderate ( $-100 \text{ nT} < Dst \leq -50 \text{ nT}$ ) geomagnetic storms during solar cycle 23 (1996–2008) // *J. Geophys. Res.* V. 118. № 1. P. 385–392. 2013.  
<https://doi.org/10.1029/2012JA018086>
- *Fujiwara H., Miyoshi Y.* Characteristics of large-scale traveling atmospheric disturbances during quiet and disturbed periods simulated by a whole general circulation model // *Geophys. Res. Lett.* V. 33. L10108. 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL027103>

- *Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., Kroehl H.W., Rostoker G., Tsurutani B.T., Vasyliunas V.M.* What is a geomagnetic storm? // *J. Geophys. Res.* V. 99. № A4. P. 5771–5792. 1994.
- *Goodman J.M., Ballard J.W., Patterson J.D., Gaffney B.* Practical measures for combating communication system impairments caused by large magnetic storms // *Radio Sci.* V. 41. № 6. RS6S41. 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2005RS003404>
- *Kurkin V.I., Matyushonok S.M., Pirog O.M., Poddelsky I.N., Ponomarchuk S.N., Rozanov S.V., Smirnov V.F.* The dynamics of the auroral oval and ionospheric trough boundaries according to data from the DMSP satellites and ground-based ionosonde network // *Adv. Space Res.* V. 38. № 8. P. 1772–1777. 2006.
- *Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.M., Mikhalev A.V., Poddelsky I.N., Stepanov A.E.* Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north-eastern region of Asia during the minimum of 23rd cycle of solar activity // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 70. № 18. P. 2346–2357. 2008.
- *Liu H.-L.* Variability and predictability of the space environment as related to lower atmosphere forcing: Space weather and terrestrial weather // *Space Weather.* V. 14. № 9. P. 634–658. 2016.  
<https://doi.org/10.1002/2016SW001450>
- *Marmet P.* New digital filter for the analysis of experimental data // *Rev. Sci. Instrum.* V. 50. P. 79–83. 1979.
- *Mendillo M.* Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* V. 44. RG4001. 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2005RG000193>
- *Pirog O.M., Romanova E.B., Polekh N.M., Tashchilin A.V., Zhrebtsov G.A.* The main ionospheric trough in the East Asian region: Observation and modeling // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 71. № 1. P. 49–60. 2009.
- *Prölss G.* Ionospheric F-region storms / *Handbook of Atmospheric Electrodynamics.* Ed. H. Volland. Boca Raton: CRC Press. V. 2. P. 195–248. 1995.
- *Prölss G.W.* Ionospheric F-region storms: Unsolved problems / *Characterising the Ionosphere, Meeting Proc. RTO-MP-IST-056.* Fairbanks, United States, 12–16 June 2006. Neuilly-sur-Seine, France. V. 10. P. 10-1–10-20. 2006.
- *Rogers N.C., Warrington E.M., Jones T.B.* Oblique ionogram features associated with off-great-circle HF propagation at high and subauroral latitudes // *IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation* V. 150(4). P. 295–300. 2003.  
<https://doi.org/10.1049/ip-map:20030552>
- *Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F.* New ionospheric index for Space Weather services // *Adv. Space Res.* V. 66. № 6. P. 1415–1426. 2020.
- *Takahashi T., Shibata K.* Sheath-accumulating propagation of interplanetary coronal mass ejection // *The Astrophys. J. Lett.* V. 837. № 2. L17. 2017.
- *Tsugawa T., Saito A., Otsuka Y.* A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan // *J. Geophys. Res.* V. 109. A06302. 2004.  
<https://doi.org/10.1029/2003JA010302>
- *Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A.* Geoefficiency and energy partitioning in CIR-driven and CME-driven storms // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* V. 71. № 10–11. P. 1023–1031. 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.02.005>
- *Uryadov V.P., Ponyatov A.A., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Kurkin V.I., Ponomarchuk S.N.* Dynamics of the auroral oval during geomagnetic disturbances observed by oblique sounding of the ionosphere in the Eurasian longitudinal sector // *Inter. J. Geomagn. Aeronomy.* V. 6. № 1. G11002. 2005.  
<https://doi.org/10.1029/2004GI000078>
- *Uryadov V.P., Vybornov F.I., Kolchev A.A., Vertogradov G.G., Sklyarevsky M.S., Egoshin I.A., Shumaev V.V., Chernov A.G.* Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels // *Adv. Space Res.* V. 61. № 7. P. 1837–1849. 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.003>
- *Warrington E.M., Stocker A.J., Siddle D.R.* Measurement and modeling of HF channel directional spread characteristics for northerly paths // *Radio Sci.* V. 41. № 2. RS2006. 2006.  
<https://doi.org/10.1029/2005RS003294>
- *Yigit E., Knizova P.K., Georgieva K., Ward W.* A review of vertical coupling in the Atmosphere–Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity // *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* V. 141. P. 1–12. 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.02.011>
- *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 // *J. Geophys. Res.* V. 122. № 2. P. 2484–2504. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA023180>
- *Zolotukhina N.A., Kurkin V.I., Polekh N.M.* Ionospheric disturbances over East Asia during intense December magnetic storms of 2006 and 2015: similarities and differences // *Solar-Terrestrial Physics.* V. 4. № 3. P. 28–42. 2018.
- URL catalog: <http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>
- URL solar: [http://www.solen.info/solar/old\\_reports](http://www.solen.info/solar/old_reports)
- URL warehouse: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>
- URL CME: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)
- URL nasa: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval1.cgi>
- URL kyoto: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>
- URL guvi: <http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi->