

ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРНОГО РАДИОКАНАЛА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ В НОЯБРЕ–ДЕКАБРЕ 2023 Г. DISTURBANCES OF IONOSPHERIC RADIO CHANNEL DURING MAGNETIC STORMS IN NOVEMBER–DECEMBER 2023

С.Н. Пономарчук 
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, spon@iszf.irk.ru

Н.А. Золотухина 
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, zolot@iszf.irk.ru

S.N. Ponomarchuk
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, spon@iszf.irk.ru

N.A. Zolotukhina
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, zolot@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа данных наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом на субавроральных трассах Магадан—Иркутск и Норильск—Иркутск. Указаны межпланетные источники магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. Обнаружено, что сигналы, распространяющиеся вне дуги большого круга, и дополнительные диффузные отражения присутствуют на ионограммах наклонного зондирования во время усиления поля магнитосферной конвекции. Их появление может быть связано с рефракцией радиоволн на полярной стенке главного ионосферного провала и рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях. Выявлена связь вариаций максимальных наблюдаемых частот модов распространения КВ-радиоволн с пространственным положением главного ионосферного провала и экваториальной границы зоны диффузных высыпаний электронов.

Ключевые слова: распространение радиоволн, радиоканал, магнитосфера, высокоширотная ионосфера, наклонное зондирование ионосферы, главный ионосферный провал, диффузные высыпания электронов.

Abstract. This paper presents the results of analysis of oblique ionospheric sounding data obtained with continuous chirp signal on the subauroral paths Magadan—Irkutsk and Norilsk—Irkutsk. It specifies the interplanetary sources of magnetic storms in November–December 2023. It was established that signals propagating outside the great-circle arc and additional diffuse reflections can be found in oblique sounding ionograms in intense magnetospheric convection field. Their appearance can be related to refraction of radio waves on the polar wall of the main ionospheric trough and scattering by small-scale inhomogeneities. Connection has been revealed between variations in the maximum observed frequencies of HF radio wave propagation modes with the spatial position of the main ionospheric trough and the equatorial boundary of diffuse electron precipitation zone.

Keywords: radio wave propagation, radio channel, magnetosphere, high-latitude ionosphere, oblique ionospheric sounding, main ionospheric trough, diffuse electron precipitation.

ВВЕДЕНИЕ

Свойства ионосферного радиоканала зависят от многих факторов, главными из которых являются процессы поступления энергии из гелиосферы во внешние геосферы (магнитосферу, ионосферу, термосферу). Усиление потока поступающей энергии вызывает магнитосферные возмущения, в том числе геомагнитные бури, которые сопровождаются различного рода ионосферными возмущениями (ионосферными бурями), изменяющими условия распространения КВ-радиоволн. Изучение таких возмущений имеет важное значение как для понимания сути геофизических явлений в системе магнитосфера—ионосфера, так и для решения практических задач ионосферного распространения радиоволн [Благовещенский, Жеребцов, 1987; Hunsucker, Hargreaves, 2003; Благовещенский, 2013; Warrington et al., 2017].

На субавроральных трассах наибольшее влияние на условия распространения радиоволн оказывают характерные для высокоширотной ионосферы круп-

номасштабные структуры, такие как авроральный овал и главный ионосферный провал (ГИП), а также магнитоориентированные мелкомасштабные неоднородности. Во время геомагнитных бурь авроральный овал и ГИП смещаются на более низкие широты [Жеребцов и др., 1988; Blagoveshchensky, Borisova, 2000; Урядов и др., 2004; Kurkin et al., 2006], что может вызывать сильные вариации максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) модов распространения на ионограммах наклонного зондирования (НЗ) [Blagoveshchensky et al., 2008; Полах и др., 2016], отклонение траекторий распространения сигналов от дуги большого круга [Hunsucker, Bates, 1969; Rogers et al., 1997; Zaalov et al., 2003], появление аномальных сигналов с задержками, превышающими задержки основных модов, и диффузность сигналов [Rogers et al., 2003; Куркин и др., 2004; Урядов и др., 2004; Uryadov et al., 2005; Благовещенский, 2016].

Целью работы является рассмотрение проявления гелиосферно-геосферного взаимодействия в данных

Геомагнитные бури в ноябре–декабре 2023 г.,
соответствующие им экстремумы индексов K_p , Dst и межпланетные источники

№ бури	Продолжительность	Максимум K_p	Минимум Dst	Возможные межпланетные источники	
				главная фаза	фаза восстановления
1	04–10.11.23	7.3	–172	3 ICME от 31.10.23, 02.11.23, 03.11.23	ICME от 03.11.23; СНHSS из СН1183
2	12–14.11.23	5.0	–42	ICME от 09.11.23	СНHSS из СН1184
3	21–23.11.23	5.3	–65	СН HSS из СН1187	
4	25–26.11.23	6.3	–99	ICME от 22.11.23	СНHSS из СН1189
5	01–07.12.23	6.7	–108	2 ICME от 27.11.23, 28.11.23	ICME от 28.11.23, 01.12.23; СНHSS из СН1190
6	13–15.12.23	4.3	–78	СН HSS из СН1192	
7	16–18.12.23	5.3	–76	3 ICME от 13–15.12.23	
8	18–21.12.23	5.3	–68	ICME от 15.12.23 (?); СНHSS из СН1193	СНHSS из СН1193

НЗ, полученных на субавроральных КВ-радиотрассах Магадан—Иркутск и Норильск—Иркутск во время геомагнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г.

1. ГЕОМАГНИТНЫЕ БУРИ И ИХ ГЕЛИОСФЕРНЫЕ (МЕЖПЛАНЕТНЫЕ) ИСТОЧНИКИ

Анализ геомагнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. проводился на основе индексов K_p [<https://kp.gfz-potsdam.de/en/data>] и Dst [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html] с привлечением параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) перед фронтом околоземной ударной волны [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/]. Также использовались индексы $SYM-H$ [https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/], связанный с симметричным кольцевым током; SME [<http://supermag.jhuapl.edu/indices/>] — аналог AE , характеризующий активность аврорального электроджета [Bergin et al., 2020]; Dst^* — исправленный за давление СВ (P_{sw}) Dst , из которого вычтен вклад поля токов Чепмена — Ферраро, текущих на магнитопаузе [Burton et al., 1975]:

$$Dst^* = Dst - 16P_{sw}^{1/2} + 20.$$

Установление гелиосферных источников бурь проводилось на основе информации, размещенной на ресурсах [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>] и [http://www.solen.info/solar/old_reports/], с привлечением дополнительных сведений об источниках бурь [http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html], [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/].

Для оценки потока электромагнитной энергии СВ, падающего на лобовую часть магнитопаузы [Дремухина и др., 2018]), использовался параметр Акасофу [Akasofu, 1981].

В тексте введены следующие обозначения: V_{sw} — скорость СВ; N_{sw} — концентрация ионов СВ; P_{sw} — динамическое давление СВ; B_t — модуль ММП; B_z — вертикальная компонента ММП в солнечно-магнитосферной системе координат GSM; ϵ — параметр Акасофу; SI_{sym} — внезапное увеличение $SYM-H$ индекса; CME (coronal mass ejection) — выброс корональной массы; ICME (interplanetary coronal mass ejection) — межпланетный выброс корональной массы; CH (coronal hole) — корональная дыра;

СНHSS (coronal hole high speed stream) — высокоскоростной поток СВ из корональной дыры.

При описании геомагнитных бурь используется понятие многоступенчатой геомагнитной бури, необходимость введения которого обоснована, например в [Kamide et al., 1998; Richardson, Zhang, 2008]. Это понятие относится к геомагнитным бурям, главная фаза которых состоит из нескольких интервалов усиления поля кольцевого тока (понижений Dst), разделенных интервалами его частичного ослабления (увеличения Dst).

1.1. Краткий обзор межпланетной и геомагнитной обстановки

По значениям K_p и Dst (рис. 1) в ноябре и декабре 2023 г. можно выделить восемь продолжительных геомагнитных возмущений с минимумом $Dst < -30$ нТл. Согласно [Gonzalez et al., 1994], эти возмущения являются геомагнитными бурями. Список бурь, пронумерованных в хронологическом порядке, приведен в таблице. По классификации, предложенной в [Loewe, Pross, 1997], буря 2 является слабой, бури 3, 4, 6–8 — умеренными, а бури 1 и 5 — сильными. В таблице строки, содержащие информацию о слабой буре, умеренных и сильных бурях окрашены серым, голубым и терракотовым цветами соответственно. Заметны различия между минимальными Dst и Dst^* (рис. 1, б, д), связанные с высоким P_{sw} во время бурь и соответственно с усиленными токами Чепмена — Ферраро. Разность между Dst^* и Dst , равная -52 нТл, максимальна для бури 5. Наибольшие пиковые значения $\epsilon \approx 7000$ ГВт соответствуют сильным бурям 1 и 5. В остальных бурях максимальные значения $\epsilon \leq 1 \div 1.5$ ГВт.

Сопоставляя изменения K_p , Dst и V_{sw} (рис. 1), можно отметить, что все магнитные бури связаны с высокоскоростными потоками СВ. Краткая информация о сформировавшихся их межпланетных структурах дана в последней колонке таблицы.

Связь указанных в таблице СНHSS с соответствующими бурями подтверждается данными [http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html]. Число ICME, указанных в таблице для бурь 2, 3 и 5–8, соответствует списку геоэффективных CME типов «гало» или «частичное гало», приведенному на [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/]. Согласно

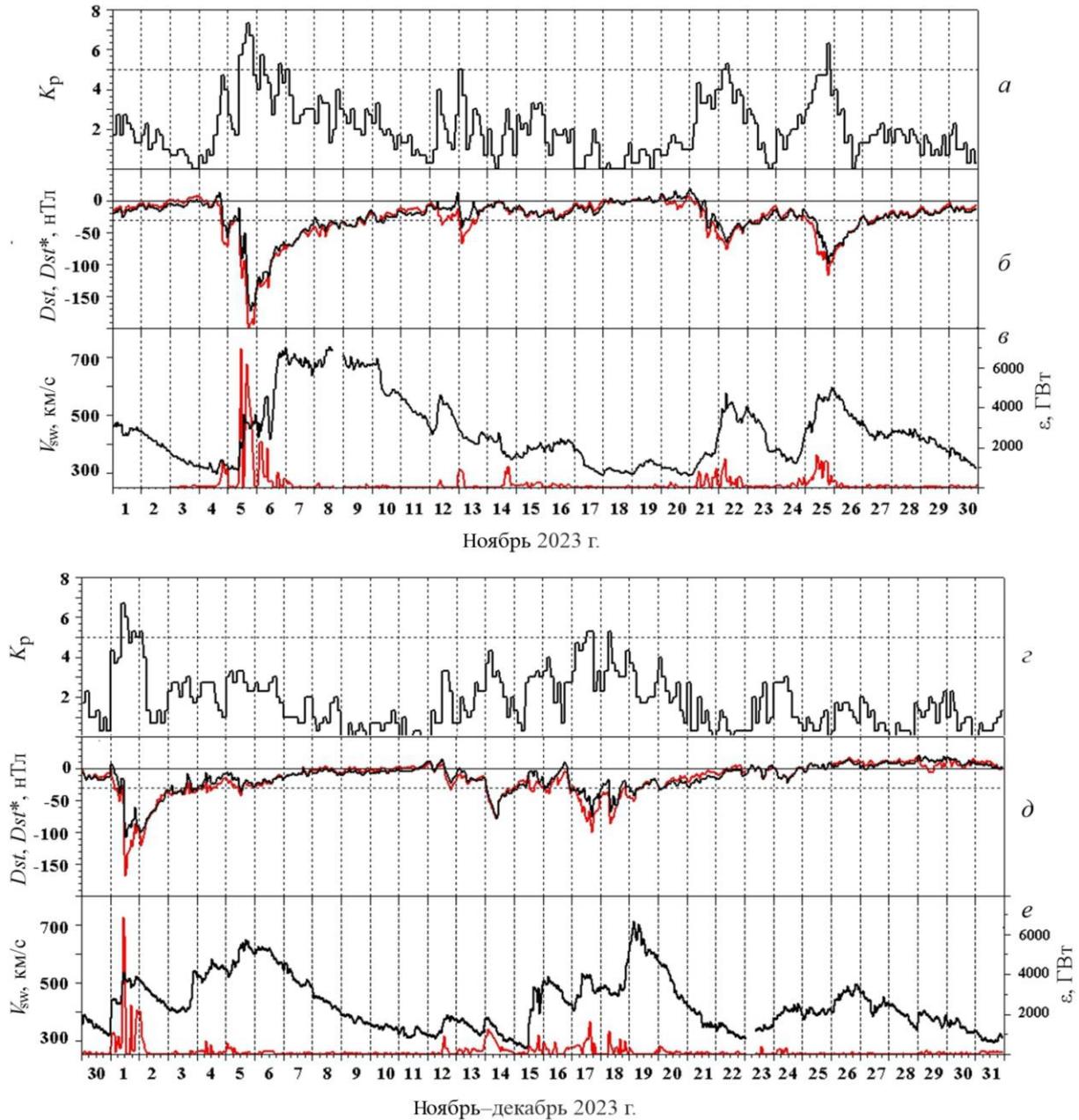


Рис. 1. Вариации: а — K_p ; б — Dst и Dst^* (черная и красная линии соответственно); в — V_{sw} (черная линия), ϵ (красная линия) в ноябре (а–в) и в декабре (z–e) 2023 г. Горизонтальными пунктирными линиями на панелях а, б, z отмечены значения $K_p=5$ и $Dst=-30$ нТл, используемые при идентификации магнитных бурь

списку СМЕ, вклад в формирование источников бурь 1 и 4 могли внести не 3 и 1, а 9 и 2 ICME соответственно.

1.2. Буря 1

Сильная буря 4–10 ноября 2023 г. состояла из начальной фазы, трехступенчатой главной фазы и продолжительной пятидневной восстановительной фазы, что следует из вариаций Dst и $SYM-H$ (рис. 2, а). За 30 и 50 мин до начала второй и третьей ступеней главной фазы наблюдались резкие увеличения $SYM-H$ на 29 и 37 нТл соответственно. По времени появления они соответствуют приходу к магнитосфере Земли межпланетных ударных волн, наблюдавшихся на SOHO в 08:13 и 11:55 UT 5 ноября [http://www.solten.info/solar/old_reports/].

Такие резкие увеличения $SYM-H$ могут быть проявлениями внезапных импульсов (sudden impulses, SI [Joselyn, Tsurutani, 1990]), вызванных скачками P_{sw} . Авторы цитируемой работы считают, что отождествить событие с SI можно только в том случае, если оно наблюдается одновременно (в пределах нескольких минут) на глобальной сети обсерваторий, расположенных вблизи геомагнитной широты 20° . Поскольку для идентификации таких событий в данной работе используется только $SYM-H$, в дальнейшем мы будем обозначать их не как SI, а как SI_{sym} N.I. Здесь N — номер бури; I — номер события в данной буре в хронологическом порядке.

Начальная фаза и каждое из трех понижений Dst (см. рис. 2), отождествляемых с 1–3 степенями главной фазы бури, совпадают по времени с проходом

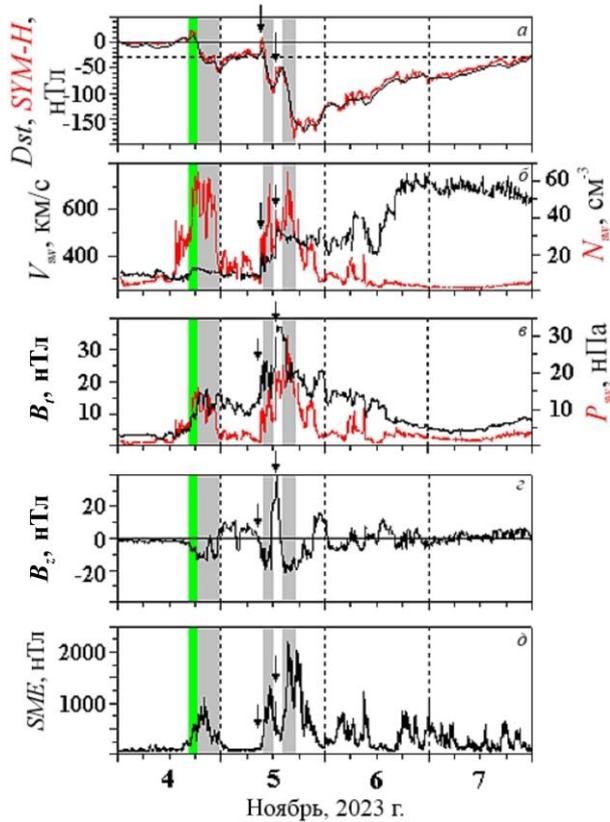


Рис. 2. Вариации в период сильной магнитной бури 1: а — $Dst/SYM-H$ (черная/красная линия); б — V_{sw}/N_{sw} (черная/красная линия); в — B_t/P_{sw} (черная/красная линия); г — B_z ; д — SME . Зеленые прямоугольники — начальная фаза бури, серые — три ступени ее главной фазы

через орбиту Земли межпланетных структур с большими N_{sw} (40–50 cm^{-3}), B_t (15–35 нТл) и направленной к югу вертикальной компонентой ММП ($B_z \sim -$ (11–23) нТл). Черные стрелки отмечают два внезапных увеличения $SYM-H$: $SI_{sym1.1}$ и $SI_{sym1.2}$. Временные интервалы, соответствующие начальной фазе и трем ступеням главной фазы, показаны зеленым и тремя серыми прямоугольниками. Подобные структуры с большими N_{sw} и B_t образуются перед СМЕ со скоростями, превышающими скорость расположенного перед ними СВ. Их принято называть оболочками (sheath) СМЕ [Kilrua et al., 2017].

В изолированных ICME переход от оболочки к собственно СМЕ сопровождается уменьшениями N_{sw} , температуры плазмы и плазменного бета [Davies et al., 2020]. В показанной на рис. 2, б–г комплексной межпланетной неоднородности, предположительно сформированной несколькими ICME, уменьшения N_{sw} за тремя sheath (цветные прямоугольники) не сопровождалось понижениями температуры и плазменного бета (на рис. 2 не приводятся). Мы полагаем, что это связано с более сложной структурой межпланетного источника бури 1, чем это следует из данных [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse] и [http://www.solen.info/solar/old_reports/]. Согласно [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/], в предшествующие буре дни (31 октября, 2, 3 ноября 2023 г.) наблюдалось не по одному, а соответственно по 3, 2 и 4 СМЕ типа частичного гало, комплекс которых образовал межпланетную структуру, вызвавшую

начальную и главную фазы бури 1. Анализ процесса образования этой структуры из девяти ICME во время их движения от Солнца до орбиты Земли выходит за рамки данной работы.

Отметим, что каждой sheath соответствуют пики ϵ (см. рис. 1) и SME (нижняя панель на рис. 2). В раннюю восстановительную фазу бури (6 ноября) магнитосферно-ионосферная система находилась под ослабевающим воздействием последнего ICME и CHSS из корональной дыры CH1183. В позднюю (7–10 ноября) — под воздействием этого же CHSS, не вызвавшего значительного усиления авроральной активности.

1.3. Буря 2

На рис. 3 показано, что возмущения 12–14 ноября 2023 г., включающие слабую бурю 2, начались в 06:12–06:15 UT 12 ноября с внезапного импульса ($SI_{sym2.1}$, отмечен стрелкой) через 40 мин после регистрации слабой ударной волны в межпланетном пространстве [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse]). Во время $SI_{sym2.1}$ $SYM-H$ увеличился от -9 до 11 нТл. За $SI_{sym2.1}$ последовало усиление авроральной активности, сравнимое по максимуму $SME \sim 750$ нТл с происходившим на первой ступени главной фазы бури 1.

С момента $SI_{sym2.1}$ до ~ 12 UT 13 ноября гео-сферные возмущения развивались под воздействием ICME от 9 ноября, отмеченного на этапе его образования как СМЕ типа гало [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/]. Затем до ~ 9 UT 17 ноября основным источником возмущений был CHSS из CH1184.

Области СВ, ответственные за развитие начальных фаз бурь 1 и 2, сходны по большим значениям N_{sw} , P_{sw} и B_t , но различаются по направлению B_z . В первом

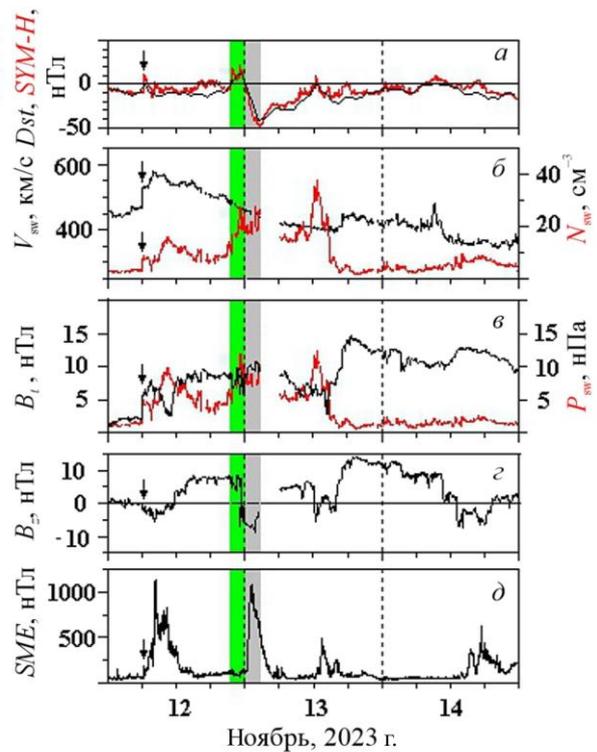


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для слабой геомагнитной бури 2

случае $B_z < 0$, во втором — преимущественно $B_z > 0$. Отклики на их воздействие в *SME* тоже различны. В начальную фазу бури 1 *SME* увеличился до ~500 нТл, в начальную фазу бури 2 не изменился и оставался на уровне ~200 нТл. Так же как во время трех ступеней главной фазы бури 1, главной фазы бури 2 соответствует по времени проход через орбиту Земли области СВ с высокими значениями N_{sw} , P_{sw} , B_t и B_z , а также усиление авроральной активности (см. рис. 2, 3).

1.4. Бури 3, 4

Серия геомагнитных возмущений, включающая умеренные бури 3 и 4, началась после магнитоспокойных дней 16–20 ноября [http://www.solen.info/solar/old_reports] и [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>]. Эти две бури имеют межпланетные источники разных типов. Буря 3 была вызвана СННСС из СН1187. Буря 4 — комбинированным воздействием одного (возможно двух) ICME и СННСС из СН1189.

Буря 3 началась после 13:00 UT 21 ноября и закончилась около 24:00 UT 23 ноября. Особенностью межпланетного источника этой бури являются вариации B_z с периодами $T \approx 6-8$ ч и амплитудой ~15 нТл (рис. 4, з). Первое понижение B_z до -8 нТл, наблюдавшееся за 6 ч до начала бури 3, произошло при сравнительно низких значениях $N_{sw} \sim 10 \text{ см}^{-3}$ и $P_{sw} \sim 1.5$ нПа. Оно вызвало незначительное понижение *Dst* до ~-8 нТл и заметное увеличение *SME* до ~600 нТл. Ступени 1–3 главной фазы бури с минимумами *Dst* = -42, -42 и -63 нТл и повышениями *SME* до 1000, 700 и 1300 нТл соответственно связаны с областями СВ с относительно высокими N_{sw} , P_{sw} , B_t и направленной на юг z -компоненты ММП ($B_z < 0$). Однако, если на всем протяжении ступеней 1 и 2 N_{sw} и P_{sw} остаются высокими ($> 15 \text{ см}^{-3}$ и > 4 нПа, соответственно), то по мере развития третьей ступени N_{sw} и P_{sw} понижаются от 16 до 5 см^{-3} и от 4.6 до 3 нПа соответственно.

Главная фаза умеренной магнитной бури 4 развивалась в ~09–19 UT 25 ноября под воздействием ICME

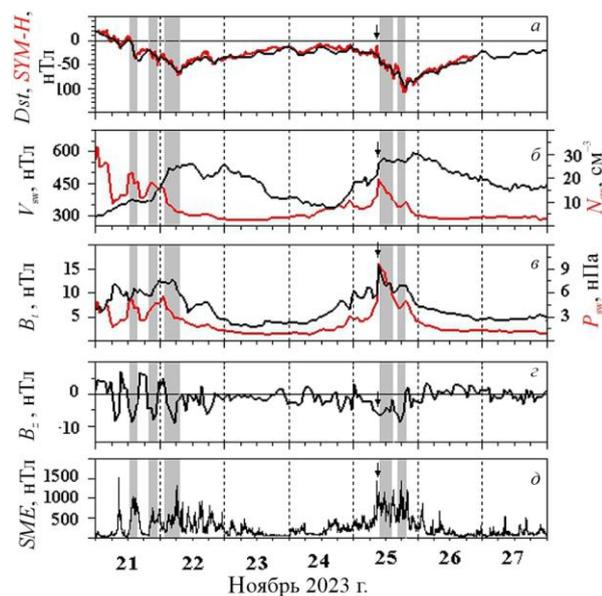


Рис. 4. То же, что на рис. 2, 3, для умеренных геомагнитных бурь 3 и 4

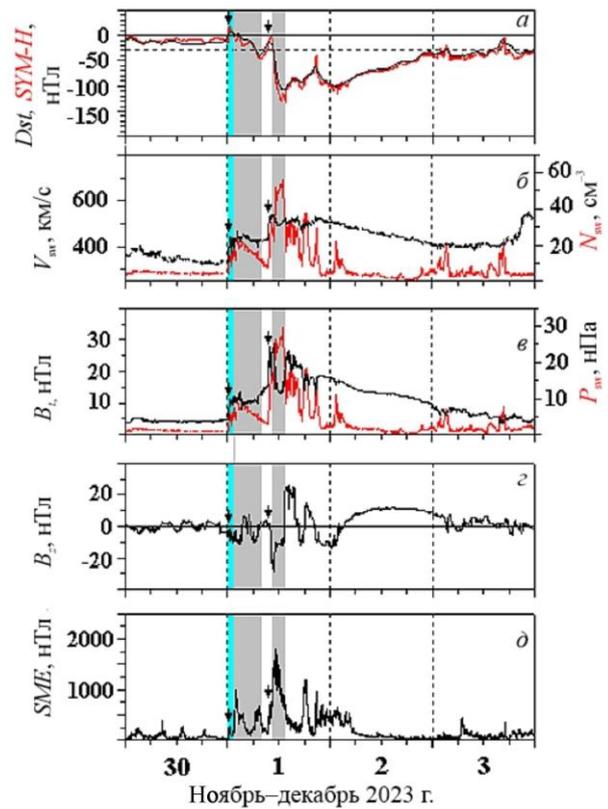


Рис. 5. То же, что на рис. 2, 3, для первых дней сильной геомагнитной бури 5

от 22 ноября (возможно двух ICME, связанных с двумя CME типа частичного гало [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/]). Она состояла из двух ступеней. Уменьшение поля кольцевого тока (*Dst* и *SYM-H*) между двумя ступенями последовало за кратковременным ослаблением B_z . В предшествующие буре часы 24 и 25 ноября космические аппараты зарегистрировали переходные возмущения (transient disturbance), вызвавшие понижения *Dst* до -31, -28 нТл и увеличение K_p до 2.7. За час до начала главной фазы в 08:36–08:38 UT 25 ноября произошло резкое увеличение *SYM-H* ($SI_{sym} 4.1$) на 19 нТл, связанное с межпланетной ударной волной, зарегистрированной на SOHO в 08:00 UT 25 ноября [http://www.solen.info/solar/old_reports/]. Доминирующий вклад в развитие восстановительной фазы бури, продолжавшейся до конца 26 ноября, внес СННСС из СН1189.

1.5. Буря 5

Сильная магнитная буря 1–7 декабря 2023 г. состояла из 65-минутной начальной фазы, последовавшей за ней 12-часовой двухступенчатой главной фазы и продолжительной шестидневной восстановительной фазы (рис. 5). Межпланетными источниками бури были три ICME, образовавшиеся 27, 28 ноября и 1 декабря, и СННСС из СН1190 [http://www.solen.info/solar/old_reports/]. ICME от 27 ноября вызвал в 00:20–00:23 UT 1 декабря $SI_{SYM} 5.1$, начальную фазу и первую ступень главной фазы бури; ICME от 28 ноября стал межпланетным источником $SI_{SYM} 5.2$, наблюдавшегося в 09:25–09:27 UT 2 декабря, и начавшейся через час после него второй ступени главной фазы бури 5. Межпла-

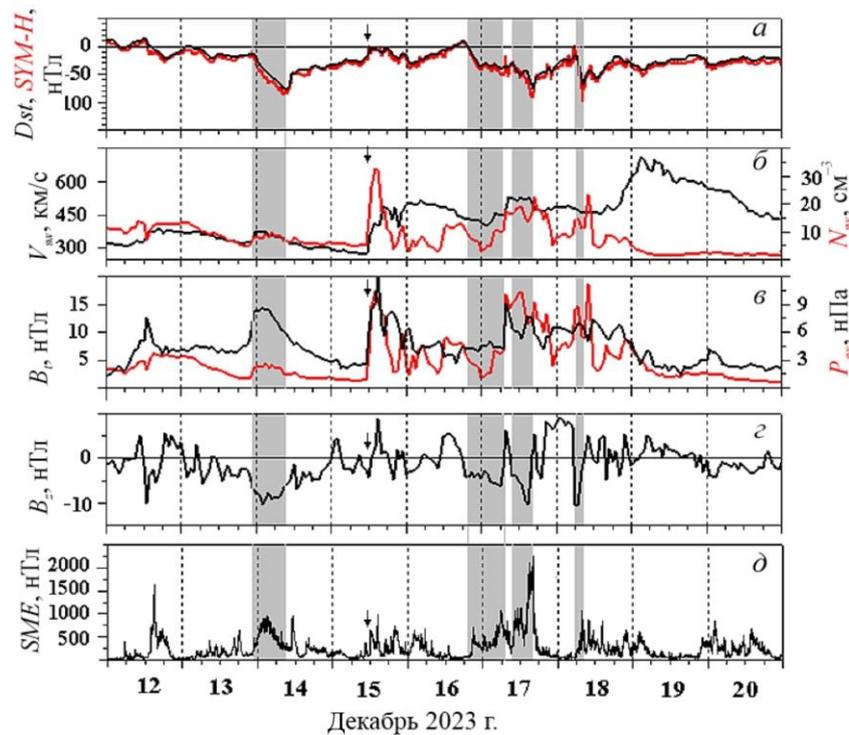


Рис. 6. То же, что на рис. 4, для умеренных геомагнитных бурь 6–8

нетные ударные волны, соответствующие событиям $SI_{SYM}5.1$ и $SI_{SYM}5.2$, наблюдались на SOHO в 23:39 UT 30 ноября и в 08:50 UT 1 декабря.

Ранняя восстановительная фаза бури была связана с ослабевающим эффектом второго ICME. Она началась около 12:30 UT 1 декабря и завершилась около 22:00 UT этого дня очередным понижением Dst , достигшего к 01:30 UT 2 декабря -100 нТл, что сравнимо с минимальным для бури 5 $Dst = -108$ нТл (см. таблицу). В этом случае понижение Dst было вызвано комбинированным эффектом усиления поля кольцевого тока и вызванного резким уменьшением P_{sw} ослабления поля токов Чепмена—Ферраро, текущих на магнитопаузе [Zhao et al., 2011]. Это подтверждается изменением Dst^* в декабре 2023 г. (см. рис. 1). В максимуме бури минимум $Dst^* = -160$ нТл, а в понижении Dst^* , наблюдавшемся в конце 1 – начале 2 декабря — -114 нТл.

Поздняя восстановительная фаза бури 5 развивалась под воздействием ICME от 1 декабря и СННСС из СН1190. Она закончилась в ~ 24 UT 7 декабря.

1.6. Бури 6–8

На сайтах, перечисленных в начале раздела 1, указаны лишь некоторые из возможных межпланетных источников магнитных возмущений, показанных на рис. 6, в том числе умеренных бурь 6–8. Для слабых возмущений, наблюдавшихся 12 декабря, это поток из небольшой корональной дыры отрицательной полярности или переходный процесс от CME [http://www.solen.info/solar/old_reports/]. Источник умеренной бури 6, начавшейся в конце 13 декабря и закончившейся $SI_{SYM}6.1$ в полдень 15 декабря — СННСС из СН1192 [http://www.solen.info/solar/old_reports/] и [<http://www.solen.info/solar/coronal>

[holes.html](#)]. Ударная волна, соответствующая $SI_{SYM}6.1$, наблюдалась на SOHO в 11:05 UT 15 декабря.

Во время умеренной бури 7 (16–18 декабря) через орбиту Земли проходила комплексная межпланетная структура, сформированная несколькими ICME от 12–15 декабря, в том числе ICME, зарегистрированным 14 декабря как CME типа гало [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/]. Наиболее вероятным источником геомагнитных возмущений 18 декабря до 18 UT был ICME, а с 18 UT 18 декабря до конца 21 декабря — СННСС из СН1193.

2. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ НЗ

Исследование влияния магнитной бури на условия распространения радиоволн в ионосферном радиоканале проводилось на основе анализа экспериментальных данных НЗ на радиотрассах, расположенных в северо-восточном регионе России: Магадан—Иркутск (протяженность $l=3034$ км, долгота средней точки $\lambda=124.21^\circ$ Е, инвариантная $\Phi=53.31^\circ$) и Норильск—Иркутск ($l=2030$ км, $\lambda=97.54^\circ$ Е, $\Phi=56.92^\circ$). Передающие пункты расположены вблизи Магадана (60° N, 150.7° Е) и Норильска (69.4° N, 88.4° Е). Приемный пункт «Иркутск» — в с. Торы, Бурятия (51.8° N, 103° Е). Данная сеть радиотрасс функционирует на базе пространственно-распределенного многофункционального ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН [Подлесный и др., 2013; Kurkin et al., 2024]. Геометрия расположения трасс показана на рис. 7. Отметим, что меридиональная трасса Норильск—Иркутск является трассой квазипродольного распространения радиоволн относительно магнитного поля Земли, а трасса Магадан—Иркутск — трассой

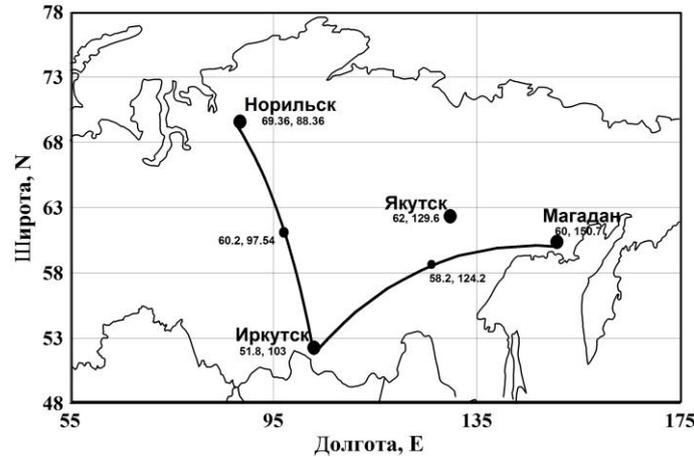


Рис. 7. Геометрия трасс НЗ в северо-восточном регионе России

квазипоперечного распространения радиоволн. Все пункты оснащены устройствами временной привязки и синхронизации. Зондирование на трассах проводилось с интервалом 5 мин.

Для обработки большого массива ионограмм НЗ (~34000) использовалась автоматическая обработка и интерпретация ионограмм [Grozov et al., 2012; Пономарчук, Грозов, 2024; Пономарчук и др., 2024], по результатам которой строились временные зависимости МНЧ односкачкового мода распространения для сигналов, отраженных от F-области (МНЧ_{1F}).

Алгоритм интерпретации ионограмм базируется на использовании результатов моделирования дистанционно-частотной характеристики (ДЧХ) распространения сигналов на заданной трассе в режиме долгосрочного прогноза, адиабатических инвариантов и результатов вторичной обработки экспериментальной ионограммы — точек со значимой амплитудой [Пономарчук, Грозов, 2024]. В результате получаем частотную зависимость группового пути мода распространения $P^{real}(f)$, привязанную к точке (f_m^r, P_m^r) , где f_m^r — максимальная применимая частота (МПЧ) мода; P_m^r — групповой путь точки смыкания верхнего и нижнего лучей [Дэвис, 1973]. На рис. 8 показаны ионограмма НЗ, полученная 5 ноября 2023 г. на трассе Магадан—Иркутск, и результаты интерпретации модов распространения. Идентифицированы моды распространения 1F2, 2F2 и 3F2 и построены соответствующие $P^{real}(f)$ (красные штриховые линии). Частота f_m^r привязана к точкам со значимой амплитудой, поэтому в дальнейшем будем условно называть ее МНЧ мода распространения. Красные стрелки показывают положение точки (f_m^r, P_m^r) для каждого мода распространения.

В периоды сильных магнитных бурь в ночные часы LT на экспериментальных ионограммах НЗ, помимо регулярных модов распространения, регистрировались дополнительные диффузные сигналы. Задержки таких сигналов в основном больше задержек регулярных модов распространения. Пример

такой ионограммы, полученной на трассе Магадан—Иркутск 4 ноября 2023 г. в 19:35 UT, показан на рис. 9. Помимо стандартного мода распространения 1F2, на ионограмме присутствует аномальный диффузный сигнал 1F. Его появление может быть обусловлено как азимутальной рефракцией на поперечных градиентах электронной концентрации крупномасштабных неоднородностей в области ГИП [Zaalov et al., 2003, 2005], так и отражением от полярной стенки ГИП, когда он приближается к области отражения сигналов на трассе распространения [Куркин и др., 2004; Урядов и др., 2004]. Диффузность сигнала может быть вызвана как рассеянием радиоволн на интенсивных мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях [Basler et al., 1988; Урядов и др., 2004; Uryadov et al., 2005], так и рефракционным рассеянием вперед на неоднородностях в области ГИП [Zaalov et al., 2005].

Заложенный в алгоритме интерпретации ионограмм НЗ, метод модельной маски, построенной по результатам расчета ДЧХ НЗ, позволяет интерпретировать на ионограмме отдельные сигналы по точкам со значимой амплитудой. На рис. 9 результат интерпретации $P^{real}(f)$ для аномального диффузного сигнала показан красной линией и обозначен 1F. Стандартный мод распространения 1F2 идентифицирован не был, так как точка (f_m^r, P_m^r) находится по максимуму гистограммы распределения точек со значимой амплитудой, попадающих в модельную маску при ее перемещении по ионограмме. Видно, что кривая $P^{real}(f)$ хорошо описывает дополнительный диффузный сигнал 1F, что свидетельствует о рефракционном механизме распространения рассеянных сигналов в ионосфере. Частоту f_m^r можно также принять за МНЧ односкачкового мода распространения (МНЧ_{1F}). Проведенное тестовое сравнение результатов ручной и автоматической обработки ионограмм для возмущенных условий показало, что стандартное отклонение относительной ошибки определения МНЧ составило меньше 5%. В дальнейшем анализируются вариации МНЧ_{1F}, полученные

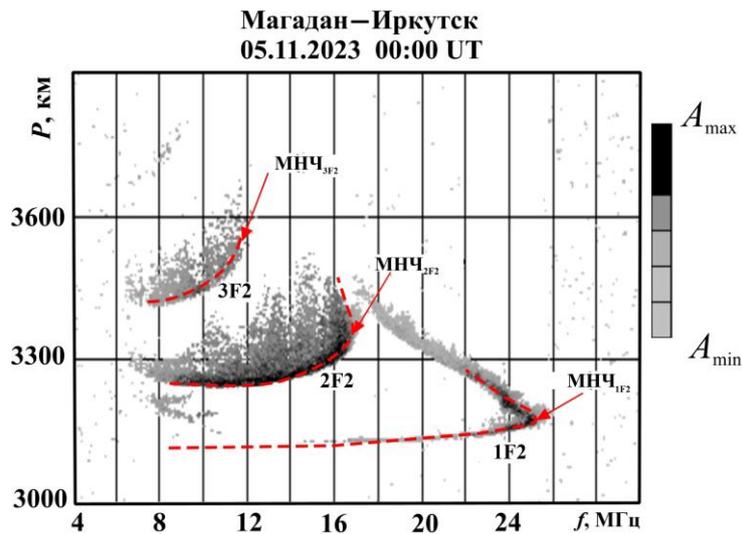


Рис. 8. Ионограмма НЗ и результаты интерпретации 05.11.2023, 00:00 UT. Ионограмма — серые точки и черные точки, $P^{real}(f)$ — красные штриховые линии

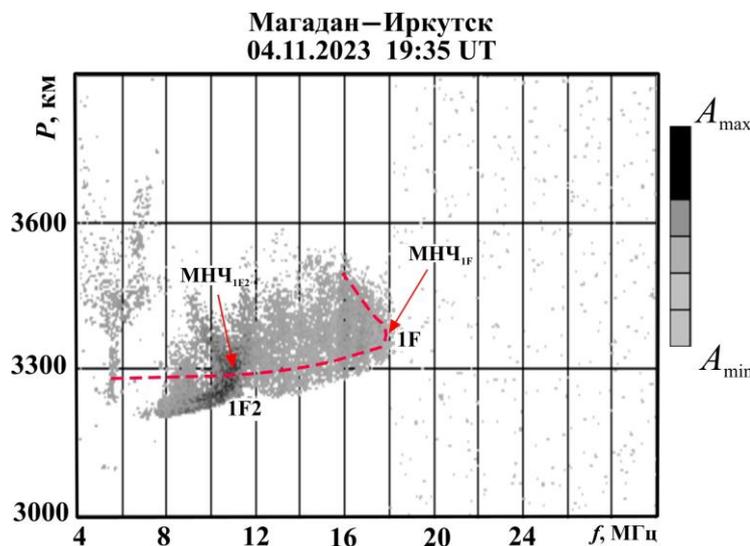


Рис. 9. Ионограмма НЗ и результаты интерпретации 04.11.2023, 19:35 UT. Серые точки и черные точки — ионограмма, $P^{real}(f)$ — красные штриховые линии

путем автоматической обработки экспериментальных ионограмм НЗ без разделения стандартных и аномальных модов распространения сигналов. Детальный анализ модовой структуры поля сигналов во время ионосферных возмущений проводился с использованием экспериментальных ионограмм.

Для интерпретации особенностей модовой структуры КВ-сигналов и вариаций MUF_{3000} привлекались результаты моделирования инвариантных широт дна ГИП [Деминов, Шубин, 2018] и экваториальной границы зоны диффузных высыпаний (ГДВ) электронов с энергией ≥ 100 эВ [Kamide, Winningham, 1977], а также напряженности поля магнитосферной конвекции E_c [Burke et al., 2007]. Электроны с энергией ~ 100 эВ проникают в F-область ионосферы, вызывая в ней увеличение электронной концентрации [Fang et al., 2008]. Этот процесс приводит, например, к формированию полярной стенки ГИП [Гальперин и др., 1977; Халипов и др., 1977]

и образованию внутри ГИП дополнительной области повышенной электронной концентрации, названной [Беспрозванная, Бенькова, 1988; Жеребцов и др., 1988] гребнем. В [Möller, 1974; Pilkington et al., 1975] по данным ВНЗ и спутниковым измерениям показано, что инвариантная широта гребня приблизительно совпадает с широтами ионосферной проекции плазмопаузы и максимума электронной температуры в ГИП.

Главной причиной развития геомагнитных бурь является усиление поля магнитосферной конвекции, приводящее к смещению внутренней границы плазменного слоя и внешней границы плазмосферы (плазмопаузы) вглубь магнитосферы [Сергеев, Цыганенко, 1980; Нишида, 1980], а их ионосферных проекций в сторону экватора. Соответственно на более низкие широты смещается ГИП, расположенный по существующим представлениям между авроральным овалом и плазмопаузой, а также характерные

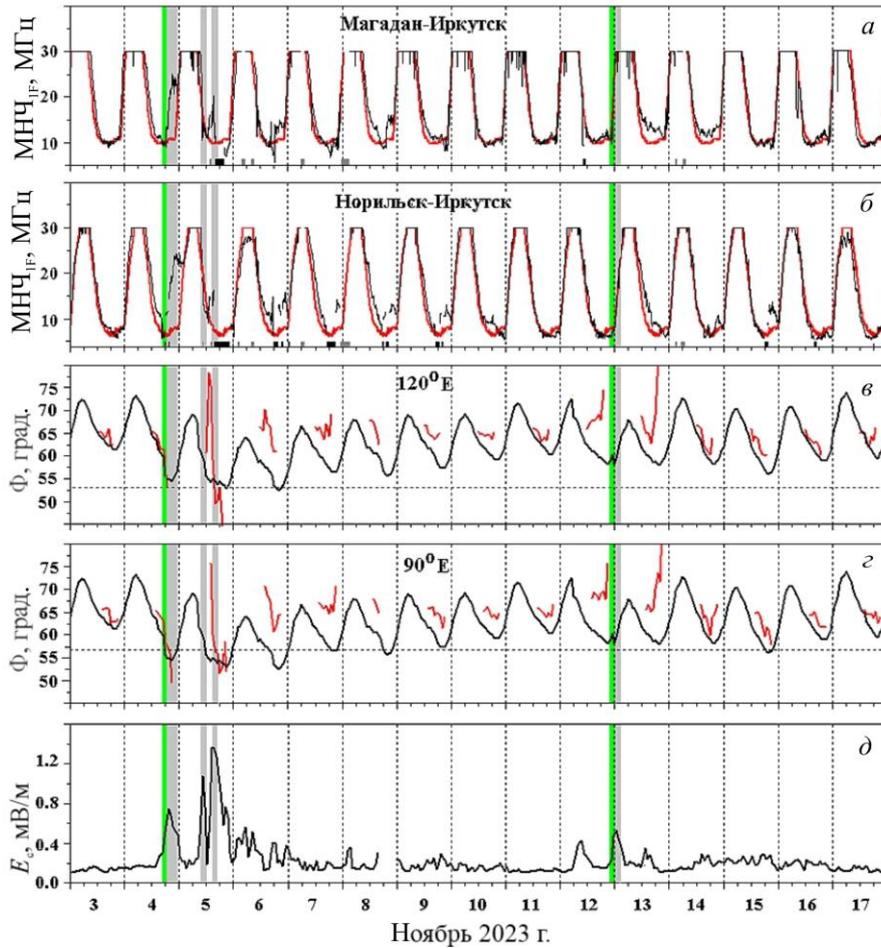


Рис. 10. Вариации MUF_{3000} на трассах Магадан—Иркутск (а) и Норильск—Иркутск (б), инвариантных широт ГИП и ГДВ на меридианах 120° E (в) и 90° E (г), напряженности электрического поля магнитосферной конвекции (д) для 3–17 ноября 2023 г.

для ГИП неоднородности электронной концентрации, влияющие на распространение КВ-радиоволн.

Одной из неоднородностей, существующих в ГИП, является провал в провале — узкий провал ионизации (УПИ), связанный с поляризационным джетом (ПД), впервые описанным в работах [Гальперин и др., 1973; Galperin et al., 1974]. Наиболее полно морфология УПИ и его связей с ПД представлена в монографии [Степанов и др., 2017]. Согласно монографии, в F-области ионосферы узкие (шириной $\sim 1^{\circ}$ – 2°) провалы ионизации наблюдаются на 1° – 10° экваториальнее ГДВ вне (в некоторых случаях внутри) проекции плазмоспаузы. По мере развития возмущения расстояние между УПИ и ГДВ уменьшается. Наиболее заметно УПИ проявляются во время суббурь на фоне усиленной крупномасштабной конвекции ионосферной плазмы. УПИ формируются за 15–30 мин, существуют в течение нескольких часов и в случаях суббурь быстро распространяются по долготе, достигая долготного размера $\sim 100^{\circ}$ и более. Рост геомагнитной активности сопровождается уменьшением широты УПИ, что в совокупности с другими факторами может приводить на субавторальных трассах к блэкауту — отсутствию прохождения радиосигналов. Дополнительно отметим, что ПД вызывает стратификацию ионосфер-

ной плазмы [Синевиц и др., 2023], что также может повлиять на модовую структуру КВ-сигналов.

2.1. Ноябрь 2023 г.

На рис. 10 для 3–17 ноября 2023 г. показаны временные вариации MUF_{3000} на трассах Магадан—Иркутск (а) и Норильск—Иркутск (б), инвариантных широт Φ дна ГИП (черная линия) и ГДВ (красная линия) на меридианах 120° E (в) и 90° E (г), напряженности электрического поля магнитосферной конвекции (д). Красные линии (а, б) — вариации месячной медианы MUF_{3000} ; серые прямоугольники на оси абсцисс — интервалы времени, в которых измерения не проводились; черные — интервалы блэкаута. Горизонтальные пунктирные линии — широты средних точки трасс Магадан—Иркутск ($\Phi=53.3^{\circ}$) (в) и Норильск—Иркутск ($\Phi=56.92^{\circ}$) (г). Зеленые прямоугольники — начальные фазы бурь 1 и 2, серые — ступени их главных фаз.

В утренние и дневные часы LT на рассматриваемых трассах НЗ постоянно регистрировались средне-масштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). Анализируемый период наблюдений (ноябрь, декабрь 2023 г.) характеризовался высоким уровнем солнечной активности, поэтому MUF_{3000} радиотрасс в дневные часы превышала верхнюю границу

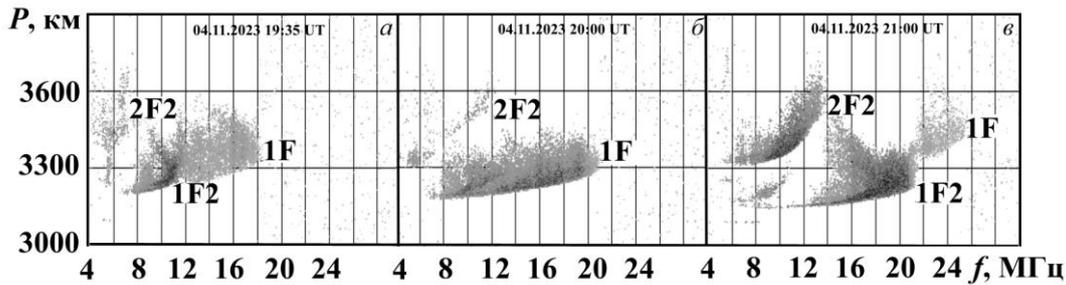


Рис. 11. Ионограммы НЗ на трассе Магадан—Иркутск 4 ноября 2023 г.: а — 19:35 UT; б — 20:00 UT; в — 21:00 UT

частотного диапазона зондирования (30 МГц). Вариации $MNЧ_{1F}$ (см. рис. 10) ограничены предельной частотой зондирования. Анализ дневных ПИВ в работе не проводится. В вечерние и послеполуночные часы в зимний период вероятность появления ПИВ мала [Kurkin et al., 2024] и на фоне ионосферных возмущений, вызванных магнитными бурями, они на ионограммах НЗ не проявлялись.

Сильная геомагнитная буря 1 началась в 16:45 UT 4 ноября, а ее главная фаза — в ~18 UT. С этого момента $MNЧ_{1F}$ увеличивается (а, б), что связано с приближением ГИП и ГДВ к средней точке трассы (в, з). На трассе Магадан—Иркутск в интервале 18÷23 часов UT на ионограммах НЗ, наряду со стандартными сигналами 1F2 и 2F2, отраженными от слоя F2, присутствуют дополнительные сигналы с задержками, превышающими задержки основных модов распространения, и частотами большими, чем $MNЧ_{1F2}$. На рис. 11 приведены ионограммы НЗ, иллюстрирующие изменения и особенности модовой структуры поля сигналов на трассе Магадан—Иркутск в 19:35, 20:00 и 21:00 UT. Дополнительные сигналы отмечены 1F. В эти часы E_c возрастает (см. рис. 10, д). ГИП и зона диффузных высыпаний электронов смещаются по широте в область отражения в средней точке радиотрассы (см. рис. 10, в). Высыпания электронов низких энергий приводят к возрастанию концентрации электронов в F-области вблизи полярной стенки ГИП [Гальперин и др., 1977]. Также образуется дополнительная область повышенной электронной концентрации внутри ГИП [Жеребцов и др., 1988]. Рост электронной концентрации приводит к значительному увеличению $MNЧ$ как основных модов распространения 1F2 и 2F2, так и дополнительных сигналов 1F. Поскольку трасса Магадан—Иркутск квазиперпендикулярна относительно направления магнитного поля Земли, появление аномального сигнала 1F в 19:35 UT (см. рис. 11, а) обусловлено ракурсным рассеянием на интенсивных мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностях в области полярной стенки ГИП [Uryadov et al., 2005]. В 20:00 UT средняя часть трассы находится в ГИП и зоне диффузных высыпаний. Сигналы основного мода 1F2 и дополнительные сигналы 1F сближаются по задержке (б). По мере удаления ГИП от средней точки трассы на север и уменьшения E_c модовая структура сигналов возвращается к стандартному виду (в).

На трассе Норильск—Иркутск влияние ионосферных возмущений на условия распространения

радиоволн проявилось начиная с 17:03 UT. На ионограммах НЗ регистрировались рассеянные сигналы с малой амплитудой, наблюдались отдельные блэкауты, что обусловлено малой электронной концентрацией в F-области и большим затуханием сигнала, так как часть трассы распространения, включая точку излучения, находилась в зоне ГИП и диффузных высыпаний. Изменения модовой структуры регистрируемых сигналов определяются положением ГИП и ГДВ относительно областей отражения сигналов в ионосфере. Начиная с 19:38 UT область отражения мода распространения 1F2 находится в зоне ГИП и диффузных высыпаний электронов (см. рис. 10, з). Электронная концентрация в F2-слое возрастает, что приводит к увеличению $MNЧ_{1F2}$. Затем ГДВ и дно ГИП смещаются в сторону экватора. На ионограммах НЗ появляется мод 2F2 и дополнительный сигнал 1F, распространяющийся вне дуги большого круга. Задержка дополнительного сигнала 1F превышает задержку основного мода 1F2, и $MNЧ_{1F}$ больше $MNЧ_{1F2}$. Появление дополнительных сигналов может быть связано с азимутальной рефракцией радиоволн на поперечных градиентах электронной концентрации в области полярной стенки ГИП [Zaalov et al., 2003, 2005]. В последующие моменты времени ГИП сдвигается к полюсу и начиная с 22:38 UT ионограмма НЗ принимает стандартный вид. На трассе Норильск—Иркутск аномальные диффузные сигналы ракурсного рассеяния не регистрируются из-за ориентации трассы относительно направления магнитного поля Земли.

Во время второй и третьей ступеней главной фазы сильной геомагнитной бури 5 ноября ионосферные возмущения на трассе Магадан—Иркутск начали проявляться с 10:30 UT. В течение двадцати минут регистрируются аномальные диффузные сигналы с задержками, превышающими задержки сигналов основного мода 1F2 примерно на 1 мс. Значения $MNЧ_{1F}$ и $MNЧ_{1F2}$ были примерно равны. Появление таких сигналов связано с ракурсным рассеянием радиоволн на магнито-ориентированных мелкомасштабных неоднородностях вблизи экваториальной границы аврорального овала в области диффузных высыпаний [Урядов и др., 2004]. В вечерние часы экваториальная граница аврорального овала смещается вниз по широте, и соответственно уменьшаются задержки дополнительных сигналов 1F на ионограммах. Ближе к 15:00 UT ГИП сдвигается и накрывает область отражения ионосферы для мода 1F2.

В это же время E_c возрастает до максимальных значений (см. рис. 10, *д*), ГДВ пересекает среднюю область радиотрассы и спускается ниже по широте (*е*). Задержки сигналов основного мода 1F2 и дополнительного диффузного мода 1F приблизительно совпадают, а $MNЧ_{1F} > MNЧ_{1F2}$. Далее сигнал мода 1F2 ослабевает и исчезает. Остается только дополнительный сигнал 1F. После смещения ГДВ на широты, меньшие широты средней точки трассы, и прекращения высыпаний электронов в область отражения сигналов (см. рис. 10, *е*), в 16:20–19:55 UT наступает полный блэкаут, связанный с уменьшением электронной концентрации. С 20:00 UT модовая структура сигналов, регистрируемых на ионограммах НЗ, восстанавливается к стандартному для невозмущенных условий виду.

На трассе Норильск—Иркутск в период главной фазы бури 1 начиная с 10:33 UT 5 ноября 2023 г. большая часть трассы находилась в ГИП и зоне диффузных высыпаний, поэтому регистрировались ионограммы со слабыми рассеянными сигналами, перемежающиеся ионограммами с блэкаутами (см. рис. 10, *б*).

В период слабой магнитной бури 2 (12–14 ноября 2023 г.) на обеих трассах зондирования вариации $MNЧ_{1F}$ относительно суточной медианы измерений связаны с положением ГИП и ГДВ относительно отражающих областей ионосферы и изменениями напряженности поля конвекции. На трассе Магадан—Иркутск ГИП находился вдали от трассы распространения, поэтому рассеянные сигналы 1F на ионограммах не регистрировались. Основные вариации $MNЧ_{1F}$ в ночные часы определялись среднemasштабными ПИВ. На трассе Норильск—Иркутск увеличения $MNЧ_{1F}$ в послеполуночные часы LT 14 и 15 ноября связаны с приближением ГИП и ГДВ к средней точке трассы, что приводило к формированию дополнительного сигнала 1F, отраженного от полярной стенки провала.

На рис. 12 показаны временные вариации $MNЧ_{1F}$ на трассах Магадан—Иркутск (*а*) и Норильск—Иркутск (*б*), широт Φ для дна ГИП и ГДВ на меридианах 120° E (*в*) и 90° E (*г*) и E_c (*д*) для 21–27 ноября 2023 г. Для умеренной магнитной бури 3 (21–23.11.2023) вариации $MNЧ_{1F}$ в вечерние и ночные часы на трассе Магадан—Иркутск обусловлены регистрацией дополнительных сигналов 1F с задержками, превышающими задержки основного мода распространения 1F2, и частотами, большими $MNЧ_{1F2}$.

В период главной фазы умеренной магнитной бури 4 (25.11.2023) усиление E_c (*д*) и высыпания электронов привели к формированию областей ракурсного рассеяния на магнитоориентированных неоднородностях на полярной стенке ГИП в вечерние часы LT, что вызвало появление дополнительных сигналов на ионограммах НЗ на трассе Магадан—Иркутск и соответственно увеличение $MNЧ_{1F}$.

На трассе Норильск—Иркутск в период магнитных бурь 3, 4 регистрировались слабые рассеянные сигналы и длительные интервалы блэкаута (*б*).

2.2. Декабрь 2023 г.

Рассмотрим возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в декабре 2023 г.

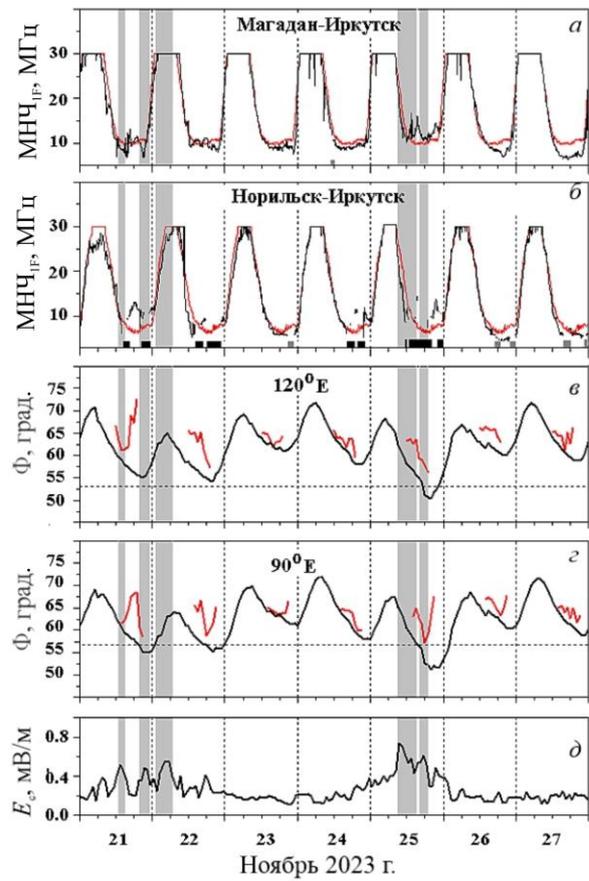


Рис. 12. Вариации $MNЧ_{1F}$ на трассах Магадан—Иркутск (*а*) и Норильск—Иркутск (*б*), инвариантных геомагнитных широт ГИП и ГДВ на меридианах 120° E (*в*) и 90° E (*г*) и E_c (*д*) для 21–27 ноября 2023 г.

На рис. 13 показаны временные вариации $MNЧ_{1F}$ односкачкового мода на трассе Магадан—Иркутск (*а*) и Норильск—Иркутск (*б*), широты Φ дна ГИП (черная линия) и ГДВ (красная линия) на меридианах 120° E (*в*) и 90° E (*г*) и E_c (*д*) для 30 ноября – 7 декабря 2023 г. Отличительной особенностью сильной магнитной бури 5 (1–7 декабря 2023 г.) являются anomalно высокие значения напряженности электрического поля конвекции и сильное смещение ГИП в сторону экватора. Судя по динамике изменения широты дна ГИП (*в*), 1 декабря 2023 г. средняя часть трассы Магадан—Иркутск более 12 ч (12–24 UT) находилась в ГИП. Средняя часть трассы Норильск—Иркутск находилась в ГИП около 15 ч (*г*). Наблюдались большие вариации $MNЧ$ модов распространения относительно их медианных значений (*а*, *б*).

На рис. 14 показаны ионограммы НЗ, полученные на трассе Магадан—Иркутск для 12:00 UT, 16:45 UT и 22:00 UT 1 декабря, по которым можно отследить изменения и особенности модовой структуры поля сигналов, связанные с ионосферными возмущениями в период данной магнитной бури. Так же как и для магнитной бури 4, усиление электрического поля магнитосферной конвекции (см. рис. 13, *д*) и высыпания электронов привели к формированию областей ракурсного рассеяния на магнитоориентированных неоднородностях на экваториальной границе аврорального овала в вечерние часы LT. Начиная с 10:50 UT 1 декабря 2023 г. регистрировались

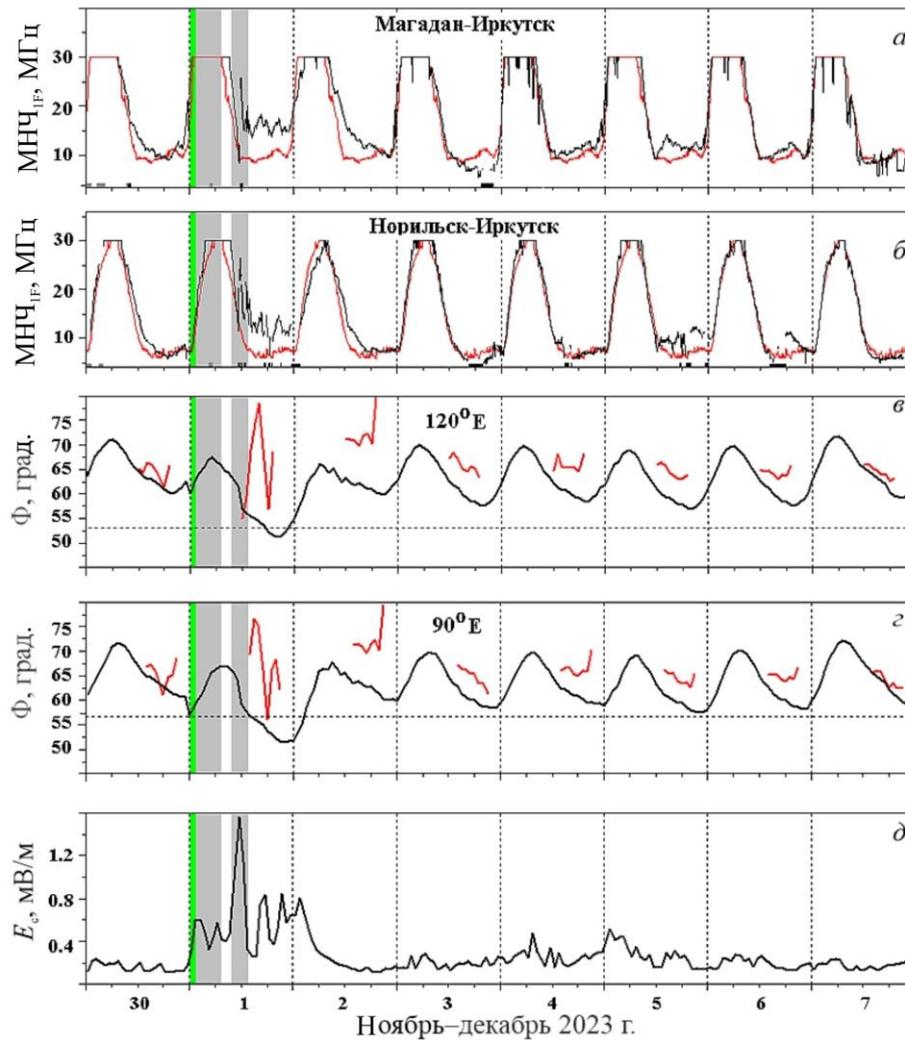


Рис. 13. Временные вариации MUF_{3000} на трассах Магадан—Иркутск (а) и Норильск—Иркутск (б), инвариантных геомагнитных широт ГИП и границы зоны ДВ на меридианах 120° (в) и 90° (г), напряженности электрического поля магнитосферной конвекции (д) для 30 ноября – 7 декабря 2023 г.

дополнительные сигналы с задержками и МНЧ, превышающими задержки и МНЧ основных модов распространения. За полчаса ГИП накрыл среднюю часть трассы. В это же время ГДВ сместилась по широте к средней точке трассы и отражающая для мода распространения 1F2 область ионосферы оказалась в зоне диффузных высыпаний. Реально, исходя из анализа экспериментальных ионограмм, средняя часть трассы Магадан—Иркутск 1 декабря 2023 г. находилась в зоне ГИП примерно 10 ч с 11:20 до 21:20 UT. Смещение ГИП и ГДВ в среднюю часть трассы в совокупности привело к возрастанию электронной концентрации в отражающем F-слое с последующим ростом MUF_{3000} (рис. 14, а, б). По мере изменения E_c изменяется MUF_{3000} . Видно (см. рис. 13), что в 12–24 UT 1 декабря на трассе Магадан—Иркутск наблюдались три интервала усиления флуктуаций MUF_{3000} , близких по длительности к периодам осцилляций E_c , составившим ~4 ч. Далее по мере смещения ГИП на север на ионограммах НЗ регистрируются дополнительные сигналы 1F, связанные с рассеянием радиоволн на полярной стенке провала (см. рис. 14, в). С 23:35 UT 1 декабря модовая структура

сигналов, регистрируемых на ионограммах, восстанавливается к стандартному виду, определяемому солнечной радиацией в утренние часы LT.

На трассе Норильск—Иркутск модовая структура регистрируемых КВ-сигналов во время главной фазы бури 5 также определяется положением ГИП и ГДВ относительно трассы распространения. Начиная с 10:48 UT 1 декабря на ионограммах НЗ появляются дополнительные сигналы, обусловленные азимутальной рефракцией радиоволн на поперечных градиентах электронной концентрации в области полярной стенки ГИП. В 11:38 UT зона диффузных высыпаний расположена в ГИП и напряженность электрического поля конвекции резко возрастает (см. рис. 13, д). Основной мод 1F2 и дополнительный мод 1F сближаются по задержке, MUF_{3000} увеличивается за счет дополнительной электронной концентрации в F-области ионосферы. Далее с 12:23 UT большая часть трассы находится в области электронных высыпаний, о чем свидетельствует появление отражающего E_s -слоя на ионограммах НЗ с 15:58 до 17:08 UT. Отражение сигналов происходит за счет высыпавшихся электронов в областях E и F. Регист-

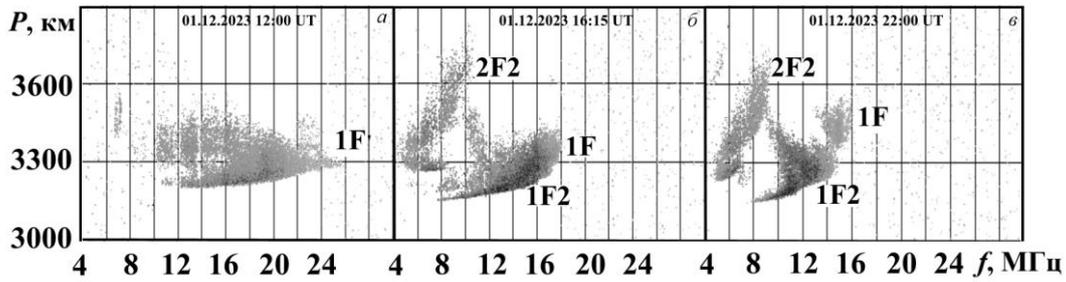


Рис. 14. Ионограммы НЗ на трассе Магадан—Иркутск 1 декабря 2023 г. в 12:00 (а), 16:15 (б), 22:00 UT (в)

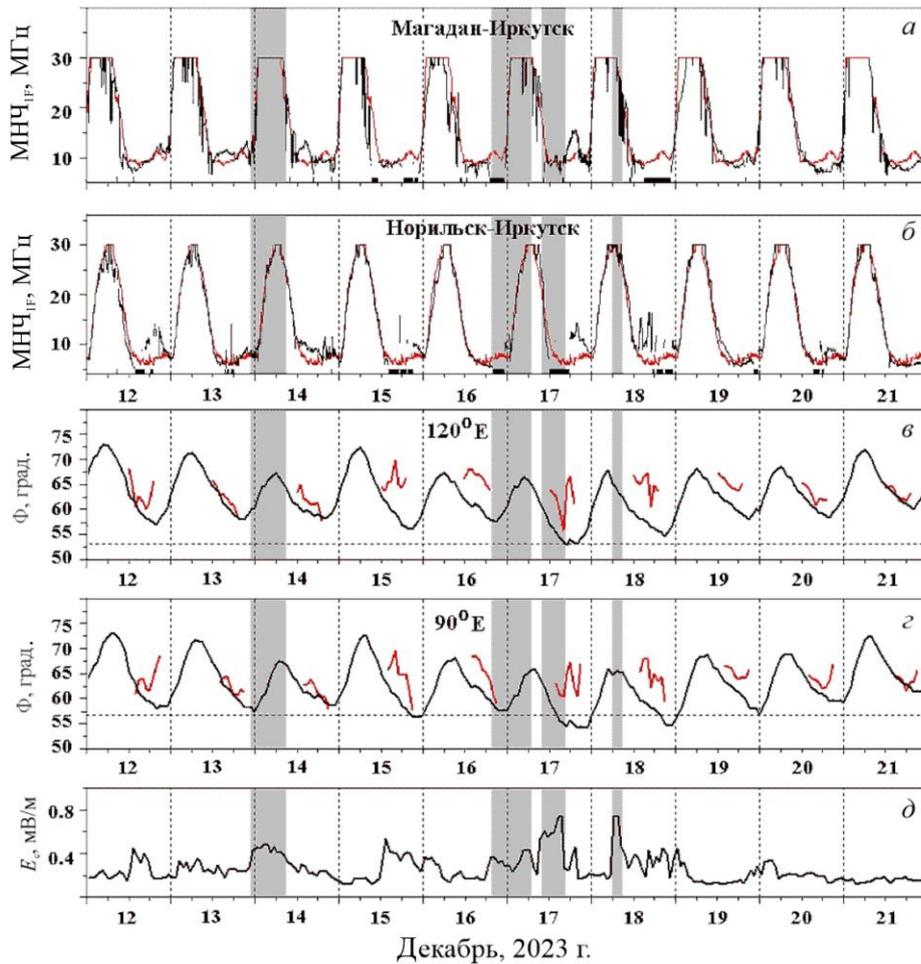


Рис. 15. Вариации MUF_{1F} на трассах Магадан—Иркутск (а) и Норильск—Иркутск (б); инвариантных геомагнитных широт ГИП и границы зоны ДВ на меридианах 120° E (в) и 90° E (г); E_c (д) для 12–21 декабря 2023 г.

рируемые сигналы, отраженные от F-области, имеют диффузный вид. Вариации MUF_{1F} для вечернего и ночного периода LT (см. рис. 13, б) определяются изменениями E_c (д).

В магнитовозмущенные дни 2–6 декабря 2023 г. в вечерние и ночные часы на обеих трассах НЗ регистрировались ионограммы со слабыми рассеянными сигналами или периоды блэкаута.

Особенностью магнитных возмущений 13–18 декабря являлся относительно высокий уровень $E_c > 0.4$ мВ/м (рис. 15, д). Приток электронов в верхние слои ионосферы в совокупности с движением ГИП и ГДВ в сторону средних точек радиотрасс приводит к вариациям MUF модов распространения в вечерние и ночные часы LT. На ионограммах НЗ регистрировались сигналы с малой амплитудой.

В ночные часы часто наступал блэкаут. Интервалы блэкаутов показаны черными прямоугольниками (а, б).

Наибольшие вариации MUF_{1F} на трассах зондирования наблюдались 17 и 18 декабря. На трассе Магадан—Иркутск увеличение MUF_{1F} начиная с 17:00 UT 17 декабря связано со смещением ГИП и ГДВ на широты отражающих областей ионосферы для сигналов мода 1F2. В совокупности с ростом напряженности электрического поля конвекции E_c (д) это приводит к возрастанию концентрации электронов в F-области. На трассе Норильск—Иркутск увеличение MUF_{1F} в ночные часы связано с прохождением радиоволн через область диффузных высыпаний электронов низких энергий. В вечерние и ночные часы 18 декабря наблюдался блэкаут на обеих трассах (а, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы особенности проявления гелиогеосферного взаимодействия в данных НЗ, полученных на субавроральных КВ-радиотрассах Магадан—Иркутск и Норильск—Иркутск во время геомагнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. На основе совместного анализа результатов обработки данных зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом и данных моделирования пространственного положения дна ГИП, экваториальной границы диффузных высыпаний электронов и напряженности электрического поля магнитосферной конвекции показано следующее.

1. В периоды сильных и умеренных магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. ионосферные возмущения приводят к сильным вариациям МНЧ распространения КВ-радиоволн на субавроральных трассах Магадан—Иркутск и Норильск—Иркутск в вечерние и ночные часы LT. Вариации МНЧ определяются положением ГИП и ГДВ относительно средней точки радиотрассы в условиях усиления электрического поля магнитосферной конвекции.

2. На ионограммах НЗ в вечерние и ночные часы регистрируются дополнительные сигналы с задержками и МНЧ, превышающими соответствующие параметры стандартных односкачковых модов распространения радиоволн в невозмущенных условиях. Появление дополнительных сигналов на трассе Магадан—Иркутск может быть обусловлено рефракцией радиоволн в области ГИП, а также рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях, ориентированных вдоль магнитного поля, вблизи экваториальной границы аврорального овала или в области ГИП.

3. Ионосферные возмущения, связанные с диффузными высыпаниями электронов и изменениями напряженности электрического поля магнитосферной конвекции, приводят к отсутствию прохождения радиоволн на субполярных трассах в вечерние и ночные часы LT.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беспрозванная А.С., Бенькова Н.П. Крупномасштабные структурные особенности слоя F2 в высоких широтах. *Proc. of International Symposium "Physical Processes in the Trough Region during Disturbances"*. Garzau, GDR (31.03-04.04.1987). Berlin, 1988. С. 25–39.

Благовещенский Д.В. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на распространение КВ (обзор). *Геомагнетизм и аэронаука*. 2013. Т. 53, № 4. С. 435–450. DOI: [10.7868/S0016794013040032](https://doi.org/10.7868/S0016794013040032).

Благовещенский Д.В. Аномальные явления на КВ-радиотрассах во время геомагнитных возмущений. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2016. Т. 56, № 4. С. 479–488. DOI: [10.7868/S0016794016040027](https://doi.org/10.7868/S0016794016040027).

Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. *Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов*. М.: Наука, 1987. 272 с.

Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней

ионосфере во время магнитной бури. *Космические исследования*. 1973. Т. 11, № 2. С. 273–296.

Гальперин Ю.И., Крайне Ж., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. I. Модель экваториальной границы диффузной зоны вторжения авроральных электронов в вечернем и окологлобальном секторах. *Космические исследования*. 1977. Т. 15, № 3. С. 421–434.

Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2018. Т. 58, № 3. С. 366–373. DOI: [10.7868/S0016794018030070](https://doi.org/10.7868/S0016794018030070).

Дремухина Л.А., Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И. Связь параметров солнечного ветра разных типов с индексами геомагнитной активности в период 1995–2016 гг. *Proc. XXI Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena"*. Apatity (12–16 March 2018). 2018. 41. С. 34–37. DOI: [10.25702/KSC.2588-0039](https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039).

Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973. 502 с. Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. *Физические процессы в полярной ионосфере*. М.: Наука, 1988. 232 с.

Куркин В.И., Пономарчук С.Н., Смирнов В.Ф. О влиянии главного ионосферного провала на характеристики КВ-сигналов на трассах наклонного зондирования. *Солнечно-земная физика*. 2004. № 5. С. 124–127.

Нишида А. *Геомагнитный диагноз магнитосферы*. Перевод с англ. А.Е. Левитина; Под ред. Я.И. Фельдштейна. М.: Мир, 1980. 299 с.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 4. С. 24–31.

Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б. и др. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2016. Т. 56, № 5. С. 591–605.

Пономарчук С.Н., Грозов В.П. Автоматическая интерпретация ионограмм наклонного зондирования на основе гибридных алгоритмов. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 109–118. DOI: [10.12737/szf-102202410](https://doi.org/10.12737/szf-102202410).

Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Ильин Н.В., Пензин М.С. Моделирование КВ-радиотрасс на основе волнового подхода. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 99–108. DOI: [10.12737/szf-102202409](https://doi.org/10.12737/szf-102202409).

Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. *Магнитосфера Земли*. М.: Наука, 1980. 174 с.

Синевиц А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В. и др. Внутренняя структура поляризационного джета: стратифицированный поляризационный джет. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2023. Т. 63, № 6. С. 764–774. DOI: [10.31857/S0016794023600333](https://doi.org/10.31857/S0016794023600333).

Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. *Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы*. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. 176 с.

Урядов В.П., Куркин В.И., Вертоградов Г.Г. и др. Особенности распространения КВ-сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2004. Т. 47, № 12. С. 1041–1056.

Халипов В.Л., Гальперин Ю.И., Лисаков Ю.В. и др. Диффузная авроральная зона. II. Формирование и динамика полярного края субаврорального ионосферного провала в вечернем секторе. *Космические исследования*. 1977. Т. 15, № 5. С. 708–723.

Akasofu S.I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere. *Space Sci. Rev.* 1981. Vol. 28. P. 121–190. DOI: [10.1007/BF00218810](https://doi.org/10.1007/BF00218810).

Basler R.P., Price G.H., Tsunoda R.T., Wong T.L. Ionospheric distortion of HF signals. *Radio Sci.* 1988. Vol. 23, no 4. P. 569–579. DOI: [10.1029/RS023i004p00569](https://doi.org/10.1029/RS023i004p00569).

Bergin A., Chapman S.C., Gjerloev J.W. AE, DST, and their SuperMAG counterparts: The effect of improved spatial resolu-

tion in geomagnetic indices. *J. Geophys. Res.* 2020. Vol. 125. e2020JA027828. DOI: [10.1029/2020JA027828](https://doi.org/10.1029/2020JA027828).

Blagoveshchensky D.V., Borisova T.D. Substorm effects of ionosphere and propagation. *Radio Sci.* 2000. Vol. 35, no. 5. P. 1165–1171. DOI: [10.1029/1998RS001776](https://doi.org/10.1029/1998RS001776).

Blagoveshchensky D.V., Kalishin A.S., Sergeeva M.A. Space weather effects on radio propagation: study of the CEDAR, GEM and ISTP storm events. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26, iss. 6. P. 1479–1490. DOI: [10.5194/angeo-26-1479-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1479-2008).

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.* 2007. Vol. 69, iss. 3. P. 279–287. DOI: [10.1016/j.jastp.2006.05.027](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.05.027).

Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T. An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst*. *J. Geophys. Res.* 1975. Vol. 80, no. 31. P. 4204–4214. DOI: [10.1029/JA080i031p04204](https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204).

Davies E.E., Forsyth R.J., Good S.W., Kilpua E.K.J. On the radial and longitudinal variation of a magnetic cloud: ACE, Wind, ARTEMIS and Juno observations. *Solar Phys.* 2020. Vol. 295, article number 157. DOI: [10.1007/s11207-020-01714-z](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01714-z).

Fang X., Randall C.E., Lummerzheim D., et al. Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2008. Vol. 113. A09311. DOI: [10.1029/2008JA013384](https://doi.org/10.1029/2008JA013384).

Galperin Yu.I., Ponomarev V.N., Zosimova A.G. Plasma convection in the polar ionosphere. *Ann. Geophys.* 1974. Vol. 30, no. 1. P. 1–7.

Gonzalez W.D., Joselyn J.A., Kamide Y., et al. What is a geomagnetic storm? *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99, iss. A4. P. 5771–5792. DOI: [10.1029/93JA02867](https://doi.org/10.1029/93JA02867).

Grozov V.P., Ilyin N.V., Kotovich G.V., Ponomarchuk S.N. Software system for automatic interpretation of ionosphere sounding data. *Pattern Recognition and Image Analysis.* 2012. Vol. 22, no. 3. P. 458–463. DOI: [10.1134/S1054661812030042](https://doi.org/10.1134/S1054661812030042).

Hunsucker R.D., Bates H.F. Survey of polar and auroral region effects on HF propagation. *Radio Sci.* 1969. Vol. 4, no. 4. P. 347–365. DOI: [10.1029/RS004i004p00347](https://doi.org/10.1029/RS004i004p00347).

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. *The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation*. Cambridge University Press, 2003. 617 p. DOI: [10.1017/CBO9780511535758](https://doi.org/10.1017/CBO9780511535758).

Joselyn J.A., Tsurutani B.T. Geomagnetic sudden impulses and storm commencement. A note on terminology. *Eos, Transactions American Geophysical Union.* 1990. Vol. 71, iss. 47. P. 1808–1811. DOI: [10.1029/90EO00350](https://doi.org/10.1029/90EO00350).

Kamide Y., Winningham J.D. A statistical study of the “instantaneous” nightside auroral oval: The equatorward boundary of electron precipitation as observed by the Isis 1 and 2 satellites. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, iss. 35. P. 5573–5588. DOI: [10.1029/JA082i035p05573](https://doi.org/10.1029/JA082i035p05573).

Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., et al. Two-step development of geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, iss. A4. P. 6917–6921. DOI: [10.1029/97JA03337](https://doi.org/10.1029/97JA03337).

Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space. *Living Rev. Solar Phys.* 2017. Vol. 14, article number 5. DOI: [10.1007/s41116-017-0009-6](https://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6).

Kurkin V.I., Matyushonok S.M., Pirog O.M., et al. 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.* 2006. Vol. 38, no. 8. P. 1772–1777. DOI: [10.1016/j.asr.2006.03.023](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.03.023).

Kurkin V.I., Medvedeva I.V., Podlesnyi A.V. Effect of sudden stratosphere warming on characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia. *Adv. Space Res.* 2024. Vol. 73, no. 7. P. 3613–3623. DOI: [10.1016/j.asr.2023.09.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.020).

Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, no. A7. P. 14209–14213. DOI: [10.1029/96JA04020](https://doi.org/10.1029/96JA04020).

Möller H.G. Backscatter results from Lindau-II. The movement of curtains of intense irregularities in the polar F-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1974. Vol. 36, no. 9. P. 1487–1501. DOI: [10.1016/0021-9169\(74\)90227-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(74)90227-X).

Pilkington G.R., Münch J.W., Braun H.J., Möller H.G. Comparison of ground HF backscatter and simultaneous particle and plasma pause measurements from a polar orbiting satellite. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1975. Vol. 37, no. 2. P. 337–347. DOI: [10.1016/0021-9169\(75\)90115-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(75)90115-4).

Richardson I.G., Zhang J. Multiple-step geomagnetic storms and their interplanetary drivers. *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35, article number L06S07. DOI: [10.1029/2007GL032025](https://doi.org/10.1029/2007GL032025).

Rogers N.C., Warrington E.M., Jones T.B. Large HF bearing errors for propagation paths tangential to auroral oval. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation.* 1997. Vol. 144, no. 2. P. 91–96. DOI: [10.1049/ip-map:19970663](https://doi.org/10.1049/ip-map:19970663).

Rogers N.C., Warrington E.M., Jones T.B. Oblique ionogram features associated with off-great circle HF propagation at high and sub-auroral latitudes. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation.* 2003. Vol. 150, no. 4. P. 295–300. DOI: [10.1049/ip-map:20030552](https://doi.org/10.1049/ip-map:20030552).

Uryadov V.P., Ponyatov A.A., Vertogradov G.G., et al. Dynamics of the auroral oval during geomagnetic disturbances observed by oblique sounding of the ionosphere in the Eurasian longitudinal sector. *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy.* 2005. Vol. 6. GI1002. DOI: [10.1029/2004GI000078](https://doi.org/10.1029/2004GI000078).

Warrington E.M., Rogers N.C., Stocker A.J., et al. Developments in HF propagation predictions to support communications with aircraft on trans-polar routes. *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS)*. IEEE, 2017. P. 1953–1959. DOI: [10.1109/PIERS.2017.8262070](https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262070).

Zaalov N.Y., Warrington E.M., Stocker A.J. The simulation of off-great circle HF propagation effects due to the presence of patches and arcs of enhanced electron density within the polar cap ionosphere. *Radio Sci.* 2003. Vol. 38, no. 3. P. 18. DOI: [10.1029/2002RS002798](https://doi.org/10.1029/2002RS002798).

Zaalov N.Y., Warrington E.M., Stocker A.J. A ray-tracing model to account for off-great circle HF propagation over northerly paths. *Radio Sci.* 2005. Vol. 40, RS4006. P. 1–14. DOI: [10.1029/2004RS003183](https://doi.org/10.1029/2004RS003183).

Zhao H., Zong Q.G., Wei Y., Wang Y. Influence of solar wind dynamic pressure on geomagnetic *Dst* index during various magnetic storms. *Science China Technological Sciences.* 2011. Vol. 54. P. 1445–1454. DOI: [10.1007/s11431-011-4319-y](https://doi.org/10.1007/s11431-011-4319-y).

URL: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/data> (дата обращения 15 февраля 2024 г.).

URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html (дата обращения 14 февраля 2024 г.).

URL: https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/ (дата обращения 15 февраля 2024 г.).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu/indices/> (дата обращения 18 апреля 2024 г.).

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/> (дата обращения 15 января 2024 г.).

URL: http://www.solen.info/solar/old_reports/ (дата обращения 14 января 2024 г.).

URL: http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html (дата обращения 8 апреля 2024 г.).

URL: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 8 апреля 2024 г.).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 14 января 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Пономарчук С.Н., Золотухина Н.А. Возмущения ионосферного радиоканала во время магнитных бурь в ноябре–декабре 2023 г. *Солнечно-земная физика.* 2024. Т. 10, № 4. С. 91–105. DOI: [10.12737/szf-104202410](https://doi.org/10.12737/szf-104202410).