

УДК 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СОПРОВОЖДАВШИХ МАГНИТНУЮ БУРЮ 14–20 ЯНВАРЯ 2022 г.

© 2025 г. В. И. Куркин^{1, *}, Н. А. Золотухина^{1, **}, С. Н. Пономарчук^{1, ***},
А. В. Ойнац^{1, ****}, К. Г. Ратовский^{1, *****}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), Иркутск, Россия

*e-mail: vikurkin@yandex.ru

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

***e-mail: spon@iszf.irk.ru

****e-mail: oinats@iszf.irk.ru

*****e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 06.05.2024 г.

Принята к публикации 25.07.2024 г.

Проведен анализ ионосферных возмущений, сопровождавших умеренную магнитную бурю 14–20 января 2022 г. Работа основана на данных вертикального и наклонного зондирования ионосферы, полученных в Северо-Восточном регионе России, дополненных наблюдениями КВ-радаров и магнитных обсерваторий. Выявлено, что амплитуды положительных и отрицательных ионосферных возмущений, сопровождавших данную бурю, сравнимы с возмущениями, которые наблюдались в другие дни января во время слабых магнитных бурь и возмущений. Специфическими особенностями возмущений, наблюдавшимися только в ходе исследуемой бури, являются: (1) полуночно-утреннее увеличение максимальной наблюдаемой частоты односкачкового мода распространения КВ-радиоволн на трассах Норильск–Торы и Магадан–Торы 14 января; (2) ночные усиления флуктуаций критической частоты F_2 -слоя в Иркутске и максимальной наблюдаемой частоты односкачкового мода на трассе Магадан–Торы 15 января; (3) утренне-полуденные E_s -слои с предельными частотами, достигавшими 7 МГц, наблюдавшиеся на средних широтах в конце первого и начале второго дня восстановительной фазы бури.

Ключевые слова: магнитная буря, зондирование ионосферы, ионосферные возмущения, распространение радиоволн, максимальная наблюдаемая частота, критическая частота F_2 -слоя, главный ионосферный провал, диффузные высыпания электронов

DOI: 10.31857/S0016794025010092, EDN: ADQVRU

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния солнечной и геомагнитной активности на условия распространения радиоволн, начатые в конце 20-х годов прошлого века [Pickard, 1927; Anderson, 1928], позволили установить тесную связь между геомагнитными возмущениями и значительными изменениями структуры ионосферы. По результатам этих исследований был введен термин “ионосферная буря”, под которым понимают совокупность ионосферных возмущений, сопровождающих геомагнитные бури. В настоящее время исследование ионосферных бурь развивается очень интенсивно как по наблюдательным, так и по теоретическим направлениям. Интерес к данному явлению обусловлен

тем, что ионосферные возмущения часто нарушают работу систем ионосферной радиосвязи, вызывая помехи, а в экстремальных случаях отсутствие прохождения радиоволн между приемо-передающими устройствами, а также энергетических систем, приводя к частичному или полному отключению электроэнергии, сбоям в работе железнодорожной автоматики и т.д. [Goodman et al., 2006; Кузнецов, 2014; Пилипенко, 2021].

Для изучения пространственно-временной динамики ионосферной бури принято использовать разность между текущими и фоновыми значениями критической частоты F_2 -слоя ионосферы (foF_2) или определяемой по ней максималь-

ной электронной концентрации ионосферы $NmF2 = 1.24 \times 10^4 (foF2)^2$, а также между текущими и фоновыми значениями полного электронного содержания (ПЭС). По знаку указанной разности ионосферные возмущения разделяют на положительные и отрицательные, считающиеся основными элементами ионосферной бури. В качестве фоновых обычно используют средние значения $foF2/\text{ПЭС}$, измеренные в ближайшие к началу бури магнитоспокойные дни (q -дни), или их месячные медианные значения [Данилов, 2013; Mikhailov et al., 2004]. Однако значительные изменения ионосферных параметров, сравнимые с изменениями, происходящими во время бурь, наблюдаются даже в q -дни, что требует проверки правомерности использования этих дней для определения фона в каждом конкретном случае [Perrone et al., 2020]. Второй способ более приемлем тогда, когда значения $foF2/\text{ПЭС}$, измеренные в магнитоспокойные дни, значительно отличаются от их месячных медианных величин. Кроме положительных и отрицательных возмущений различной амплитуды и длительности, ионосферная буря включает в себя усиленное образование спорадических и диффузных ионосферных слоев.

Пространственно-временные масштабы и интенсивность ионосферных возмущений, также как и уровень геомагнитной активности, увеличиваются с ростом корпускулярной и электромагнитной энергии, поступающей из межпланетной среды первоначально в высокоширотную часть магнитосферно-ионосферной системы, а затем в другие области внешних геосфер [Prölss, 2006]. Наиболее сильные магнитосферно-ионосферные возмущения приходятся на годы максимума солнечной активности.

Обобщенная пространственно-временная картина развития ионосферной бури основана, главным образом, на данных, полученных во время изолированных сильных и умеренных магнитных бурь, имеющих явно выраженные главную, восстановительную, а в некоторых случаях, начальную фазу [Prölss, 1997; Fuller-Rowell et al., 1997; Buonsanto, 1999; Mendillo, 2006; Данилов, 2013]. Установлено, что проявления ионосферной бури, регистрируемые конкретным ионозондом, зависят не только от межпланетных, магнитосферных и термосферных процессов, но также и от местоположения наблюдательного пункта и его местного времени [Жеребцов и Пирог, 2008; Kurkin et al., 2008].

Гораздо меньше информации собрано к настоящему времени об ионосферных возмущениях, сопровождающих слабые магнитные бури,

которые на средних широтах могут быть сопоставимы с изменениями во время сильных магнитных бурь [Buresova et al., 2014]. Уменьшение максимальных наблюдаемых частот односкачкового мода распространения КВ-радиоволн ($MUF(3000)F2$) во время слабых магнитных бурь может составлять 25–50% [Kurkin et al., 2022; Куркин и др., 2022]. В работе [Ratovsky et al., 2022] показано, что около половины из 25 наблюдавшихся в Иркутске в 2003–2016 гг. экстремальных повышений максимальной электронной концентрации в $F2$ -слое ионосферы, при которых нормированные отклонения $NmF2$ от месячных медианных значений были больше 150%, наблюдалось во время слабых геомагнитных возмущений с минимумом $Dst > -30$ нТл. Согласно критерию, указанному в работе [Gonzalez et al., 1994], возмущения с индексом $Dst > -30$ нТл не являются геомагнитными бурями.

Попытка статистического исследования реакции ионосферы на “более слабую” (“weaker”) геомагнитную активность предпринята в публикации [Chen et al., 2022]. Для отбора “weaker” событий авторы использовали критерий $Ap < 60$. В результате применения этого критерия в анализируемую в работе [Chen et al., 2022] выборку вошли сильные и умеренные магнитные бури, что ставит под сомнение правомерность сделанных в этой работе выводов о тенденциях изменения ионосферного отклика на слабые магнитные возмущения. Еще одним существенным недостатком работы [Chen et al., 2022], ставящим под сомнение ее выводы, является неоднородность экспериментальных данных, на которых она основана.

В данной работе продолжены исследования отклика ионосферы на слабые магнитные бури, начатые в работе [Kurkin et al., 2022; Куркин и др., 2022], где показано, что отклик ионосферы на воздействие высокоскоростного потока солнечного ветра, вызывающего бурю, зависит как от геоэффективных параметров потока, так и от продолжительности его воздействия на магнитосферно-ионосферную систему и ее исходного состояния.

2. ОБЪЕКТ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования выбраны ионосферные данные, полученные в январе 2022 г. на фазе роста 25-го цикла солнечной активности. Анализ геомагнитной обстановки основан на рядах значений Kp , Dst , ap [URL OMNI2] и SME [URL SME] индексов. Характеристики межпланетных источников, вызвавших геомагнитные возмущения, представленные в работе параметрами плазмы солнечного ветра (SW) и межпланетного магнитного поля (IMF) [URL OMNI2]. По параметрам SW

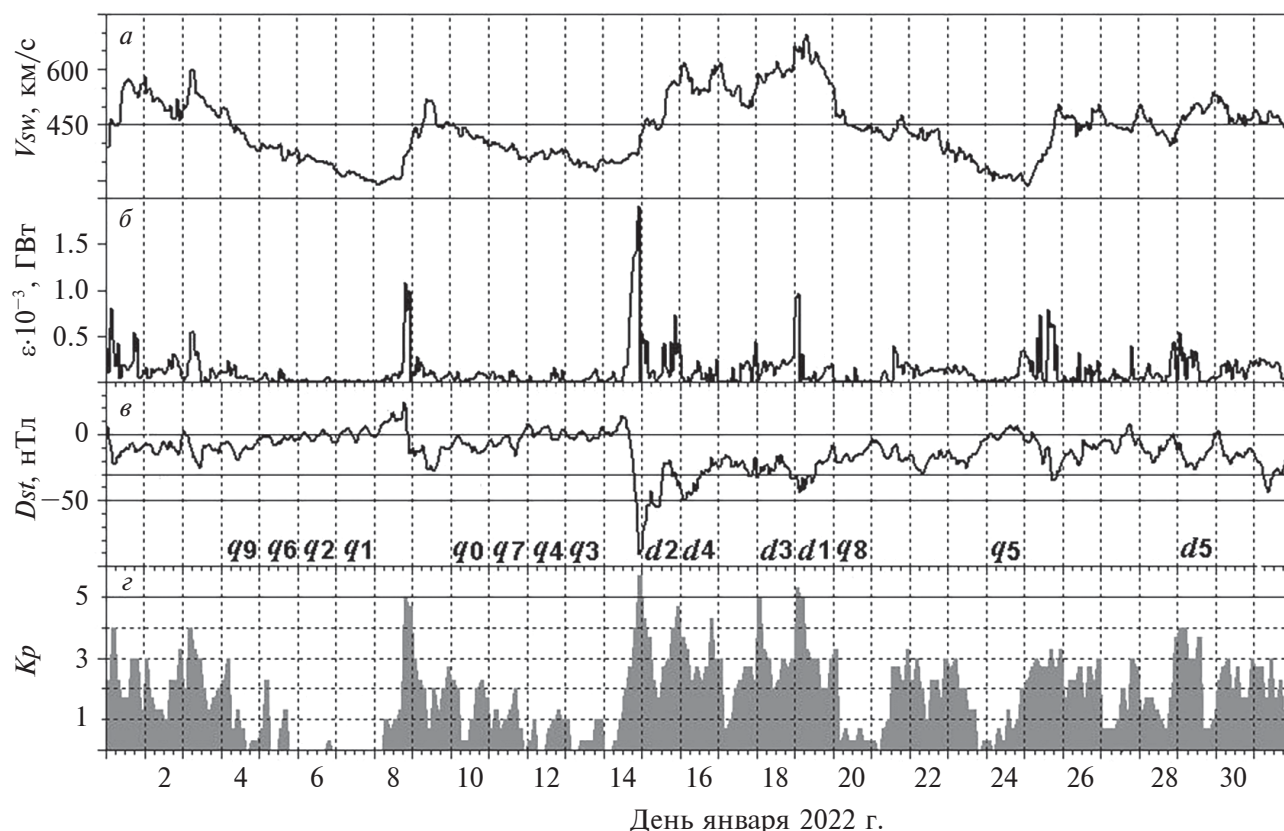


Рис. 1. Вариации скорости солнечного ветра V_{sw} (а); параметра Акасофу ϵ (б); Dst - (в) и Kp - (г) индексов в январе 2022 г. Горизонтальные линии отмечают на панели (а) — значение $V_{sw} = 450$ км/с, используемое для выделения высокоскоростных потоков [Borovsky and Denton, 2010]; на панели (в) — уровни $Dst = -30$ и -50 нТл, являющиеся верхними пороговыми значениями для слабых и умеренных магнитных бурь соответственно [Loewe and Prolss, 1997]; на панели (г) — уровень $Kp = 5$, используемый как нижний порог при идентификации магнитных бурь. Символами q и d с цифрами отмечены магнитоспокойные и магнитовозмущенные дни в соответствии с их обозначениями на [URL qd].

и IMF вычислен параметр Акасофу ϵ (поток энергии, падающий из межпланетной среды на подсолнечную магнитосферу [Akasofu, 1981]).

На рис. 1 показано, что в течение выбранного месяца магнитосферно-ионосферная система подвергалась воздействию 4 высокоскоростных потоков солнечного ветра, пиковые скорости которых были больше 450 км/с. Первый поток вызвал слабые возмущения 1–4 января с минимумом $Dst = -25$ нТл и максимумом $Kp = 4$; второй, более медленный поток 8–11 января, — слабую бурю 8–11 января с повышением Kp до бурового уровня $Kp = 5$ и понижением Dst до -27 нТл.

Возмущения 14–20 января являются умеренной магнитной бурей (минимум $Dst = -91$ нТл, максимум $Kp = 6$). Она была вызвана комплексной межпланетной неоднородностью, сформированной межпланетным выбросом корональной массы, набегавшим на него высокоскоростным потоком солнечного ветра из корональной дыры

SH1054 и еще двумя корональными выбросами. Скорость ветра немонотонно нарастала от 360 км/с в лидирующей части неоднородности до 700 км/с в предпоследний день бури. На переднем фронте неоднородности направленная к югу вертикальная компонента межпланетного магнитного поля (B_z ММП) усилилась до -17 нТл (на рисунке не показана). На панели (б) видно, что мощность внешнего источника бури 14–20 января, оцениваемая с помощью параметра Акасофу (ϵ), была в ~ 2 раза больше, чем мощность межпланетных источников других возмущений. Следует ожидать, что эту бурю сопровождали более сильные, чем наблюдавшиеся во время других событий, ионосферные возмущения.

Серии слабых возмущений 22–23 и 25–31 января характеризовались множественными понижениями Dst , из которых только 2 могут быть отнесены по минимумам $Dst = -34$ и -44 нТл (25 и 31 января соответственно) к слабым магнитным бурям.

Отметим, что в январе 2022 г. внезапного стратосферного потепления, оказывающего, согласно Mikhailov et al. [2021], заметное влияние на развитие ионосферных возмущений не было [Vargin et al., 2022]. Зато в ~04:15 UT 15 января произошло мощное извержение вулкана Tonga, вызвавшее генерацию перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) с основными периодами ~10–30 мин, распространявшихся вдоль большого круга со скоростью 300–350 м/с [Zhang et al., 2022].

Конкретная цель нашей работы – сравнить ионосферные возмущения, развивавшиеся во время умеренной бури 14–20 января, с теми возмущениями, которые наблюдались в другие дни января 2022 г., в том числе в дни слабых бурь и в q -дни.

3. АНАЛИЗИРУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследование основано на рядах месячных значений критической частоты и высоты пика $F2$ -слоя ($foF2$ и $hmF2$), предельной частоты

Es -слоя ($foEs$), а также измерений МНЧ1 $F2$, полученных на трассах наклонного зондирования (НЗ) ионосферы.

Значения $foF2$, $hmF2$, $foEs$ были измерены с помощью ионозонда $DPS-4$ и ЛЧМ-ионозонда, расположенных в Иркутске (52.5° N , 104° E , $\Phi = 48.4^\circ$) с $\Delta t = 15$ мин и в Торах, р. Бурятия (52° N , 103° E , $\Phi = 48^\circ$) со скважностью $\Delta t = 1$ мин. Здесь Φ – исправленная геомагнитная широта. Дополнительно используются наблюдения аврального эха в Екатеринбурге (EKB) и Магадане (MGW) на КВ-радарх, ряды значений горизонтальной (H) составляющей геомагнитного поля, измеренной на обсерваториях Иркутск, Якутск (62° N , 129.7° E , $\Phi = 56.8^\circ$) [URL Intermag] и оригинальные данные магнитной обсерватории Норильск (69.4° N , 88.1° E , $\Phi = 65.3^\circ$), а также координаты полярной и экваториальной границ аврального овала, взятые на сайте [URL Oval]. Карта размещения наблюдательных средств показана на рис. 2.

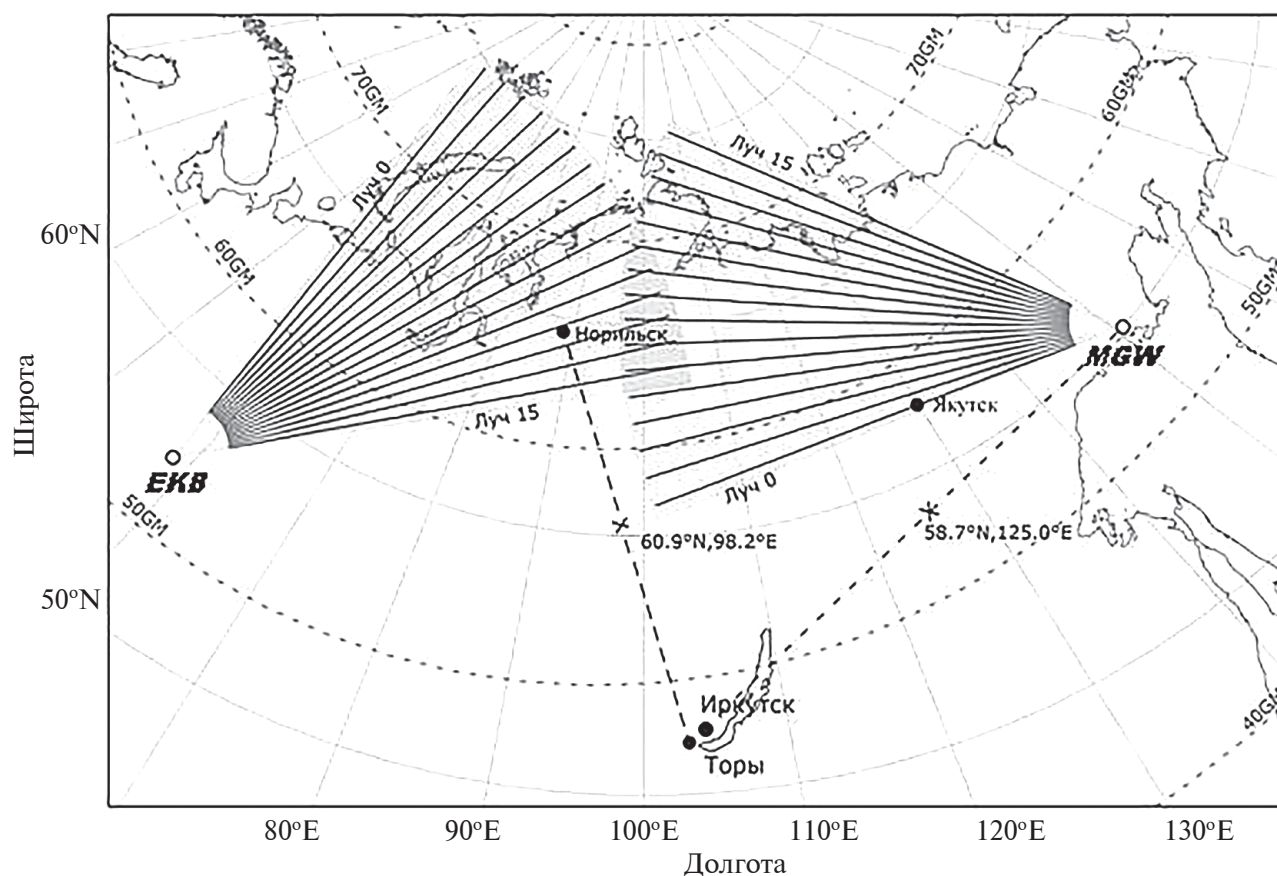


Рис. 2. Карта расположения средств зондирования ионосферы и магнитных обсерваторий. Точками показаны ионосферные станции и магнитные обсерватории; штриховыми и сплошными линиями – радиотрассы и лучи радаров соответственно, крестиками – средние точки радиотрасс.

Измерения МНЧ1F2 проводились со скважностью $\Delta t = 5$ мин на трассах Норильск–Торы и Магадан–Торы (координаты средних точек трасс 60.9° N , 98° E , $\Phi = 57^\circ$ и 58.5° N , 125.8° E , $\Phi = 53.7^\circ$ соответственно).

Непрерывный мониторинг на указанных трассах проводился с использованием аппаратуры многофункционального ЛЧМ-ионозонда “Ионозонд-МС” [Подлесный и др., 2013]. Северный участок первой трассы расположен в субавроральных широтах. Трасса Магадан–Торы относится к среднеширотным, но во время сильных магнитных возмущений ее северный участок, включая среднюю точку, может находиться в области главного ионосферного провала (ГИП) [Полех и др., 2016]. В нашей работе исправленная геомагнитная широта (Φ) дна ГИП определена по модели, представленной в работе [Демин и Шубин, 2018]. В ней широта дна ГИП вычисляется по значениям ap -индекса в текущем и нескольких (в нашем случае в 4) предшествующих 3-часовых интервалах.

4. ИОНОСФЕРНАЯ БУРЯ 14–20 ЯНВАРЯ 2022 Г.

На трех нижних панелях рис. 3 приведены графики изменений МНЧ1F2 на двух трассах и f_oF2 , f_oEs над Иркутском, построенные по оригинальным данным, полученным в течение 4 дней, предшествующих умеренной буре 14–20 января, и во время бури. Для удобства сравнения, на верхней панели приведен график изменения Dst -индекса.

Магнитная буря началась около 16 UT 14 января с главной фазы и продолжалась до конца 20 января. В предшествующие буре магнитоспокойные дни 10–13 января на трассе Магадан–Торы и в Иркутске были зарегистрированы ночные положительные ионосферные возмущения. В это время значения МНЧ1F2 были на ~ 2 МГц, а f_oF2 на ~ 1.5 МГц больше месячных медианных значений (показаны на рисунке серой линией). Авторы работы [Mikhailov et al., 2004] называют такие события “Q disturbances” и полагают, что они генетически связаны с планетарными волнами. Из-за наличия ночных Q-возмущений мы

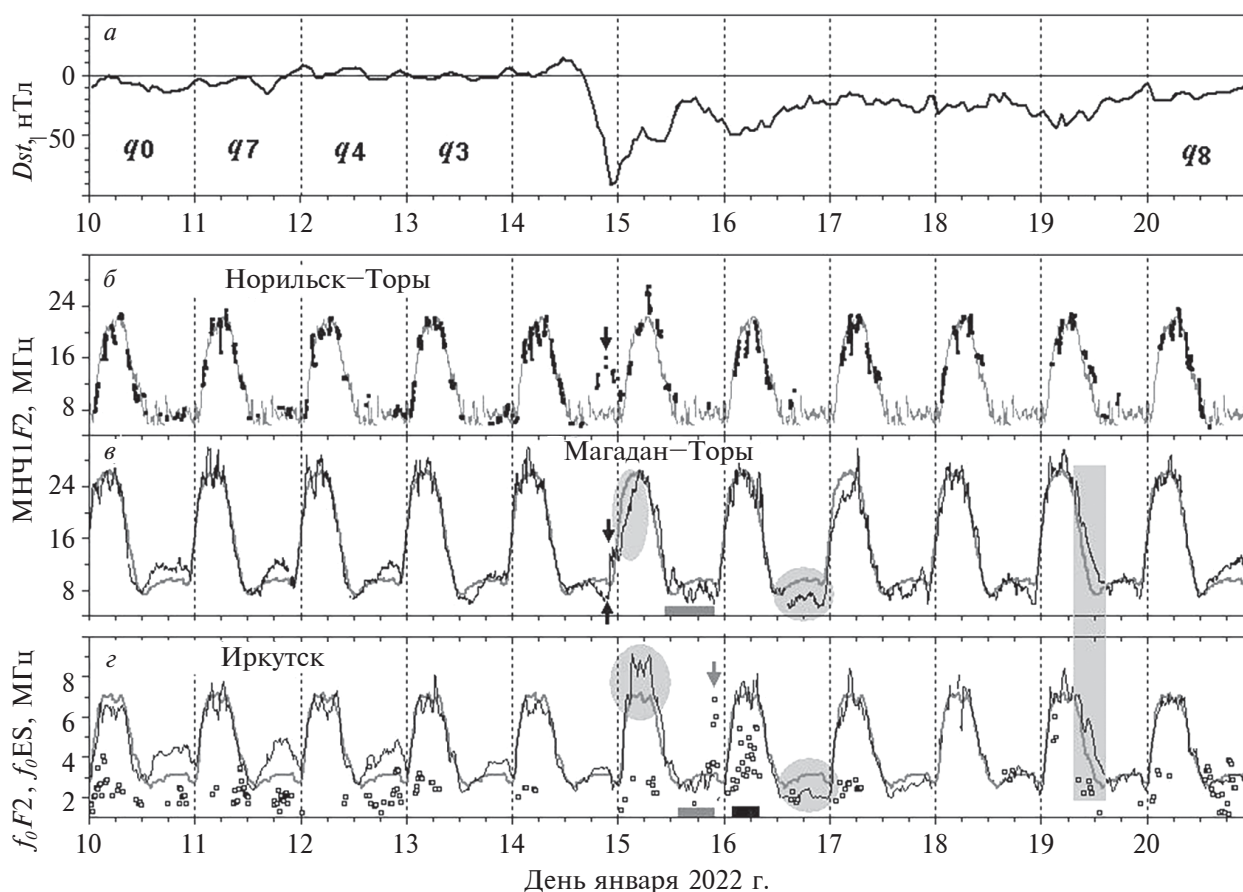


Рис. 3. Вариации Dst индекса (а); МНЧ1F2 на трассах Норильск–Торы (б) и Магадан–Торы (е); f_oF2 и f_oEs в Иркутске (з). Текущие/фоновые значения МНЧ1F2 и f_oF2 показаны черными/серыми линиями, значения f_oEs — квадратами.

выбрали в качестве фоновых месячные медианные значения ионосферных параметров.

Графики, приведенные на рис. 3, показывают, что в рассматриваемом нами долготном секторе ионосферная буря началась перед 19:00 UT 14 января, примерно через 3 ч после начала главной фазы магнитной бури, и закончилась через 5 дней (около 14:00 UT 19 января в предпоследний день поздней восстановительной фазы бури). Укажем отчетливо видные на графиках возмущения, которые могут быть проявлениями ионосферной бури.

4.1. Положительное ионосферное возмущение, наблюдавшееся на трассе Норильск—Торы в 18:53–23:53 UT 14 января после 200-минутного блэкаута, и резкое увеличение $MNCH1F2$ от 8 до 13.6 МГц, зарегистрированное на трассе Магадан—Торы в 22:00–22:05 UT 14 января (между двумя сеансами зондирования) после отрицательного возмущения. На рис. 3 эти элементы отмечены черными стрелками. На трассе Норильск—Торы возмущение было максимальным в 20:58–21:13 UT 14 января.

4.2. Выделенные овалами дневное отрицательное возмущение, зарегистрированное на трассе Магадан—Торы в 23:45–04:50 UT 14–15 января, и частично перекрывающееся с ним по времени продолжительное дневное положительное возмущение, развивавшееся над Иркутском в 02:00–09:00 UT 15 января.

4.3. Усиление короткопериодных вариаций $MNCH1F2$ и $foF2$ в ночные часы 15 января на трассе Магадан—Торы (в 10–21 UT; 18.5–05.5 LT) и над Иркутском (в 13–22 UT; 20–05 LT). На рис. 3 указанные интервалы отмечены серыми прямоугольниками на оси абсцисс панелей *в*, *г*. Средний период вариаций $T \approx 110$ –120 мин.

4.4. Наблюдавшаяся в Иркутске и Торах интенсификация диффузных утренних (серая стрелка на панели *г*) и дневных (черный прямоугольник на оси абсцисс панели *г*) плоских спорадических слоев с большими предельными частотами, максимальные значения которых равны соответственно 7 и 5.5 МГц.

4.5. Отмеченные овалами ночные отрицательные возмущения, наблюдавшиеся в Иркутске и на трассе Магадан—Торы 16 января в близких временных интервалах. На трассе Магадан—Торы ночное отрицательное возмущение перешло в более слабое дневное отрицательное возмущение, продолжавшееся до 05:00 UT 17 января.

4.6. Последнее заметное ионосферное возмущение (выделено серым прямоугольником) наблюдалось одновременно на трассе Магадан—

Торы и в Иркутске в 09:30–13:00 UT (вечерние часы) 19 января. В максимуме возмущения текущие значения $MNCH1F2$ и $foF2$ были соответственно на 60 и 40% больше фоновых.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Для сопоставления указанных в разделе 4 элементов ионосферной бури 14–20 января 2022 г. с ионосферными возмущениями, наблюдавшимися в другие дни этого месяца, мы выделили из исходных рядов данных короткопериодные (периоды $0.5 < T \leq 3.5$ ч, диапазон крупномасштабных и среднемасштабных ПИВ [Hunsucker, 1982]) и продолжительные ($36 > T > 3.5$ ч) возмущения. Для проведения этой процедуры был использован полосовой фильтр, не дающий фазовых сдвигов [Marmet, 1979]. Изменения нормированных отклонений продолжительных возмущений $MNCH1F2$ и $foF2$ ($\Delta MNCH1F2$ и $\Delta foF2$), наблюдавшихся в течение месяца, от их фоновых значений (определены для тех же периодов) показаны на рис. 4.

Укажем те специфические элементы ионосферной бури 14–20 января 2022 г., которые значительно отличаются от возмущений, происходивших в другие дни.

5.1. Прежде всего, это указанное в п. 4.1. единственное явное ионосферное возмущение, наблюдавшееся в январе 2022 г. на трассе Норильск—Торы. Оно развивалось в виде увеличения $MNCH1F2$, начавшегося в главную фазу бури около 19 UT 14 января и достигшего в максимуме значения $\Delta foF2 \sim 140\%$ в 3–6 раз большего, чем положительные возмущения, наблюдавшиеся в другие дни. На левых панелях рис. 5 видно, что рост $MNCH1F2$ начался после смещения дна ГИП до широты меньшей, чем Φ средней точки трассы. Отмеченный вместе с ним в п. 4.1. скачкообразный рост $MNCH1F2$ на трассе Магадан—Торы в 22:00–22:05 UT тоже произошел после перехода средней точки трассы с экваториальной на полярную стенку ГИП. Анализ ионограмм НЗ показал, что рост $MNCH1F2$ в этот период времени обусловлен многолучевым распространением мода 1F2, так как полярная стенка ГИП близко подходит к средней отражающей области ионосферы радиотрассы Магадан—Торы. Кроме того, дополнительный вклад в увеличение $MNCH1F2$ могли внести авроральные высыпания во время суббури, проявления которой в геомагнитных вариациях показаны на рис. 5 справа.

На субавроральной ст. Якутск быстрое понижение H -компоненты магнитного поля, характерное для взрывной фазы суббури, совпало по времени с увеличением SME -индекса на ~ 400 нТл [URL *SME*]. Оно началось примерно

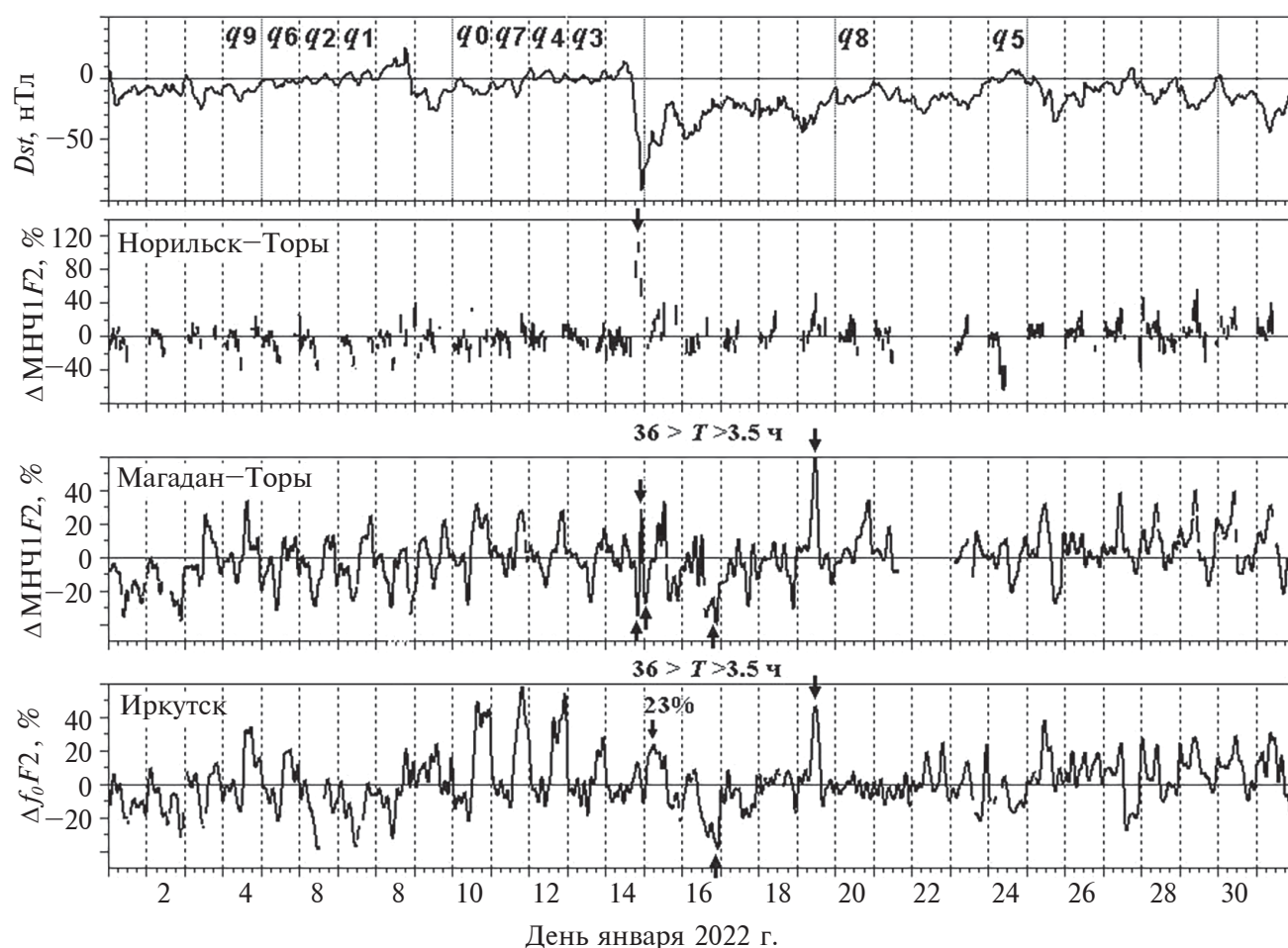


Рис. 4. На верхней панели показаны вариации Dst -индекса; ниже — $\Delta MUF2$ на трассах Норильск–Торы, Магадан–Торы и $\Delta foF2$ над Иркутском. Черными стрелками отмечены элементы ионосферной бури, представленные в пунктах 4.1, 4.2, 4.5 и 4.6 раздела 4 (см. текст).

через 5 мин после резкого увеличения $MUF2$ на трассе Магадан–Торы. На авроральной обс. Норильск и среднеширотной обс. Иркутск отрицательное и положительное возмущения H соответственно начались на ~40 мин позднее, что указывает на продвижение суббуревых явлений в сторону запада. По данным MGW-радара развитие суббури сопровождалось увеличением доплеровских скоростей аврорального эха до максимальных для данной бури значений ± 400 м/с. Сигналы эха приходили из сектора, включающего меридиан Якутска, а их источники были расположены в окрестности экваториальной границы аврорального овала (см. рис. 6). При этом севернее этой границы скорости были направлены на запад; южнее нее — на восток, в сторону радара, что соответствует области усиленного западного электроджета.

5.2. Вторым специфическим элементом рассматриваемой ионосферной бури является активизация короткопериодных вариаций $MUF2$ и $foF2$ в ночные часы 15 января, отмеченная в п. 4.3. На рис. 7 показано, что на трассе Магадан–Торы усиление короткопериодных вариаций $MUF2$ (отмечено стрелкой с ломаной линией) наблюдалось в 10–21 UT (18.5–05.5 LT) 15 января. В этом интервале среднеквадратическое отклонение $MUF2$ составляло 0.8 МГц, а в эти же часы в другие дни — в 2 раза меньше, всего лишь 0.4 МГц. Над Иркутском активизация короткопериодных вариаций $foF2$ (отмечена стрелкой) произошла примерно на час позже — в 13–22 UT (20–05 LT). Она характеризовалась среднеквадратическим отклонением $S = 0.24$ МГц в ~2.5 раза большим, чем в другие дни ($S = 0.1$ МГц). Менее значительное (примерно в 1.5 раза, до $S = 0.6$ МГц) усиление короткопериодных вариаций $MUF2$

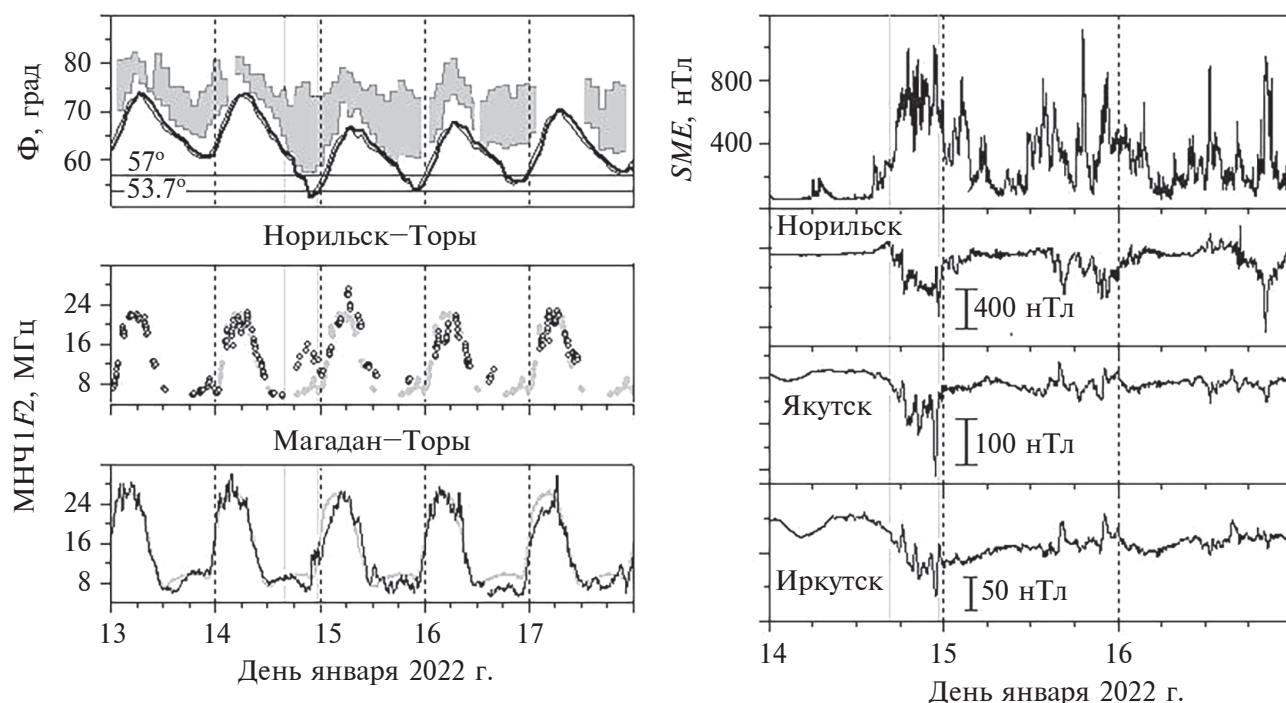


Рис. 5. Слева сверху вниз показаны изменения исправленной геомагнитной широты аврорального овала (серая фигура) и дна ГИП на долготах 105° и 120° Е (линии), МНЧ1F2 на трассах Норильск–Торы и Магадан–Торы; справа — график SME -индекса и вариации H -компоненты геомагнитного поля, зарегистрированные тремя обсерваториями, размещенными в рассматриваемом долготном секторе. Динамика дна ГИП рассчитана по модели [Демин и Шубин, 2018]. Границы овала построены по данным, приведенным на [URL Oval].

наблюдалось также в 10–21 UT 9 января только на трассе Магадан–Торы. Этот интервал тоже отмечен стрелкой с ломаной линией. Сравнивая графики, видим, что в обоих случаях ночные активизации короткопериодных составляющих вариаций МНЧ1F2 произошли на фазе восстановления умеренной и слабой магнитных бурь примерно через сутки после того, как дно ГИП сместилось до средней точки трассы.

Амплитуды короткопериодных вариаций МНЧ1F2 и $foF2$, наблюдавшихся в дневные часы января 2022 г. (на рисунке не показаны), были в 3 раза больше ($S = 1.02$ и 0.32 МГц соответственно) амплитуд ночных вариаций. Они слабо менялись день ото дня, в том числе при переходе от магнитоспокойных дней 10–13 января к магнитовозмущенному дню 15 января. Средний период наблюдавшихся вариаций $T \approx 110$ –120 мин. Он близок к периоду ПИВ $T = 1.8$ ч, связанных с геомагнитными бурями [Ding et al., 2008]. Однако перманентный характер короткопериодных вариаций МНЧ1F2 и $foF2$, представленных в статье, не позволяет отождествить их с ПИВ, эпизодически возникающими в высоких широтах во время геомагнитных возмущений [Hunsucker, 1982].

5.3. К особым элементам ионосферной бури мы отнесли также указанную в п. 4.4. активизацию плоских среднеширотных спорадических слоев в утренние и дневные часы 15–16 января. На верхней левой панели рис. 8 показано, что спорадические слои с $foEs$ от 1 до 7 МГц наблюдались ежедневно. Число сеансов, в которых их предельные частоты были больше 3.1 МГц (верхней квартили месячного ряда значений $foEs$), менялось от дня ко дню от 1 до 17. Максимальное число ионограмм с $foEs > 3.1$ МГц было получено в 17 из 18 сеансов, проведенных в 03:30–07:45 UT (10:30–14:30 LT) 16 января. На нижней левой панели рис. 8 видно, что в эти часы активизация спорадических слоев наблюдалась только 16 января. К особенностям данной ионосферной бури можно отнести также активизацию утренних спорадических слоев в 20:45–22:45 UT (03:45–05:45 LT) 15 января, во время которой в трех последовательных сеансах были зарегистрированы наибольшие для января 2022 г. предельные частоты 5.6, 6.9 и 6.6 МГц. В утренние часы значение $foEs = 6.6$ МГц, близкое к наблюдавшемуся 15 января, было зарегистрировано только 2 января в 1 из 96 проведенных в этот день сеансов. В работе [Tang et al., 2022]

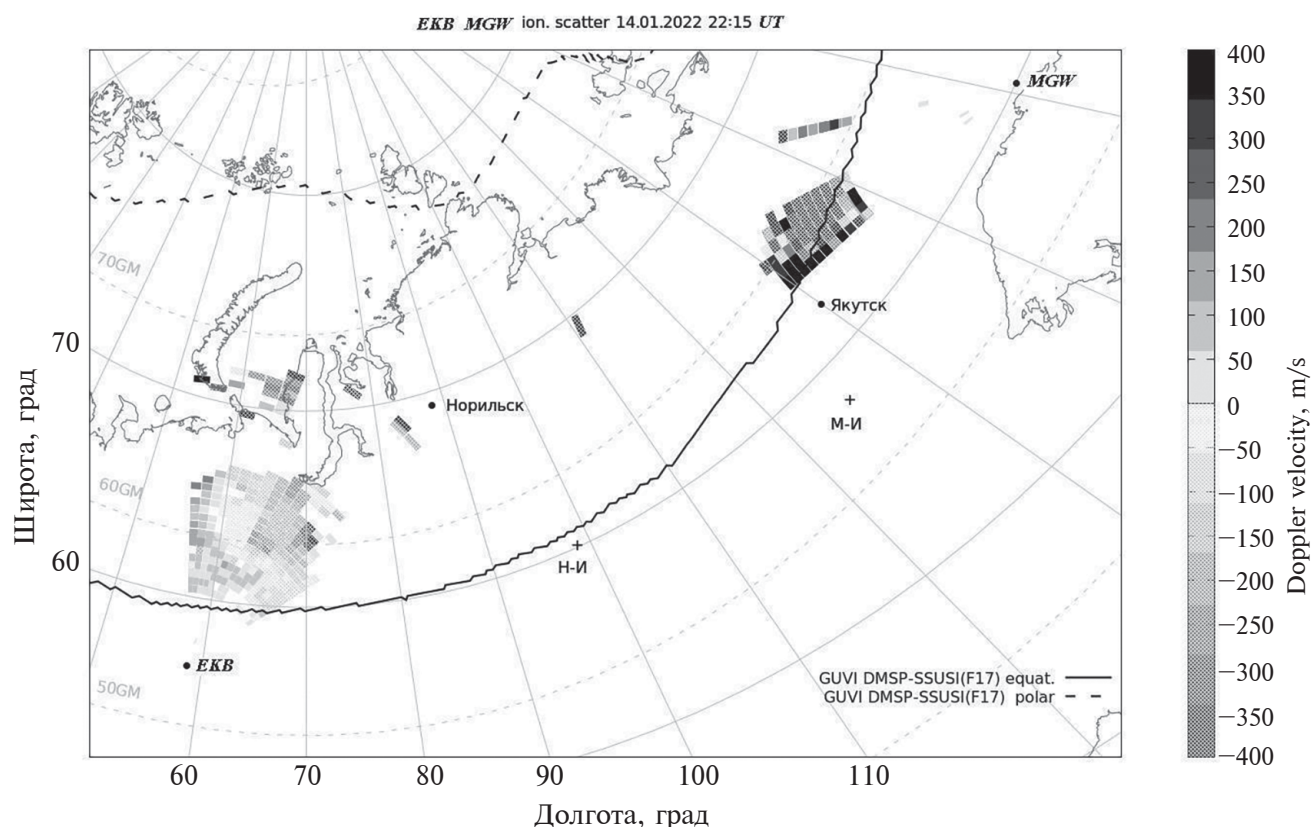


Рис. 6. Карта источников аврорального эха, зарегистрированных двумя КВ-радарми в 22:15 UT 14.01.2022 г. Штриховая/сплошная линии показывают положение северной/южной границы овала (построены по данным [URL Oval]).

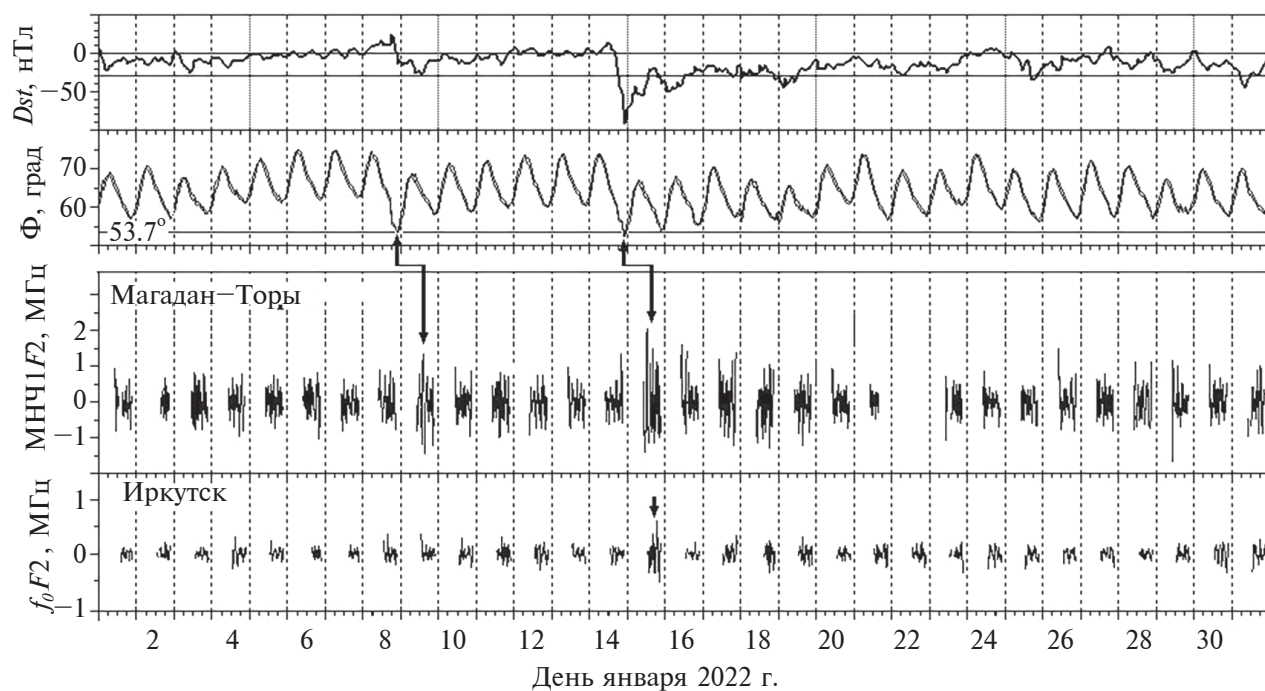


Рис. 7. Вариации Dst -индекса, широты ГИП и короткопериодных составляющих МНЧ1F2 на трассе Магадан—Торы и f_0F2 в Иркутске в ночное время суток.

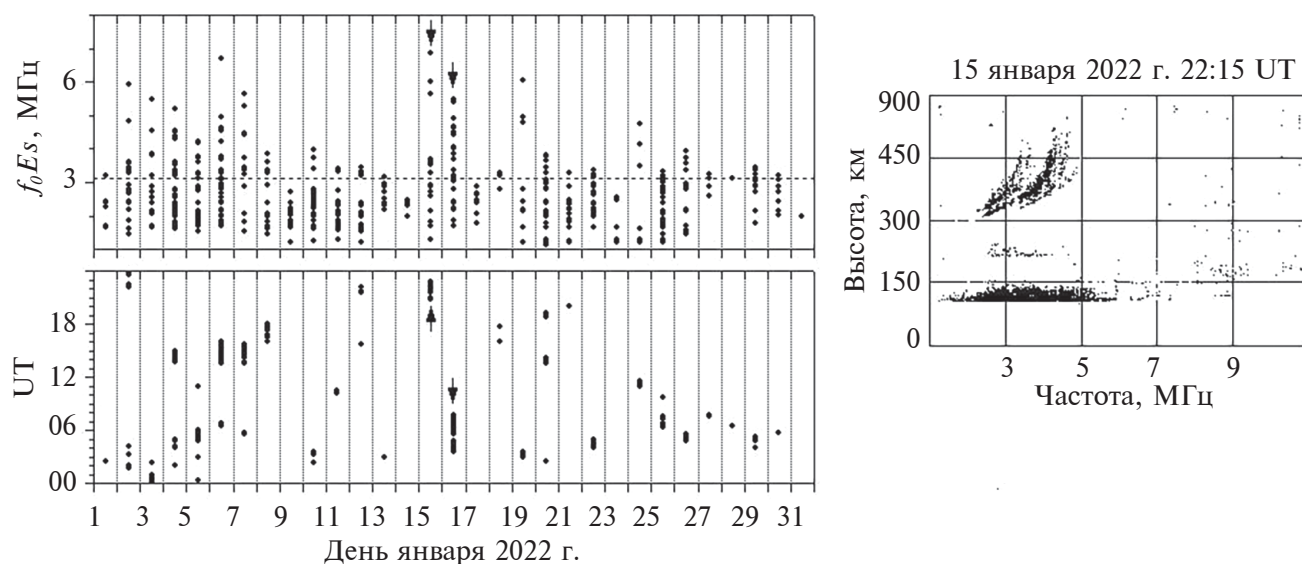


Рис. 8. Слева сверху показаны значения $foEs$, измеренные в Иркутске в течение каждого дня января 2022 г.; внизу — время регистрации $foEs$, больших чем 3.1 МГц. Здесь 3.1 МГц — верхняя квартиль месячного ряда значений $foEs$, отмеченная на рисунке горизонтальной пунктирной линией. Справа представлена ионограмма, содержащая отражения от спорадического диффузного слоя. Она получена в Торах с помощью ЛЧМ-ионозонда.

показано, что образование плотных Es -слоев на средних широтах во время геомагнитных бурь может быть связано с усилением ветра в мезосфере и нижней термосфере.

5.4. О специфике положительных и отрицательных ионосферных возмущений, отмеченных в пунктах 4.2., 4.5. и 4.6., можно судить по графикам, приведенным на рисунках 4, 5, 9 и 10.

На рис. 9 для каждого дня января 2022 г. представлены отдельно положительные (панель *a*) и отрицательные (панель *b*) значения ΔMUF_{3000} на трассе Магадан—Торы. Под ними показано время регистрации положительных значений ΔMUF_{3000} , лежащих над верхней квартилью, и отрицательных, лежащих под нижней квартилью, месячных рядов этих параметров. В таком же формате на панелях (*в*) и (*г*) рис. 9 представлены положительные и отрицательные значения ΔfoF_2 , полученные в Иркутске.

5.4.1. Видно, что относительно слабое дневное положительное возмущение с $\Delta foF_2 \leq 23\%$, зарегистрированное в Иркутске в 02–09 UT (09–16 LT) 15 января (см. п. 4.2.) было более ранним, чем превышающие его по величине вечернее положительное возмущение с $\Delta foF_2 \sim 40\%$ 19 января (см. п. 4.6.) и менее значительные вечерние положительные возмущения с $\Delta foF_2 \sim 25–38\%$, наблюдавшиеся в Иркутске в 08–13 UT (15–20 LT) 25 и 27–31 января.

Второй особенностью положительного возмущения foF_2 15 января является то, что ему соответствует понижение MUF_{3000} на трассе Магадан—Торы. В отличие от этого, вечерние положительные возмущения foF_2 19, 25 и 27 января наблюдаются почти одновременно с вечерними положительными возмущениями MUF_{3000} на трассе Магадан—Торы. Особенно ярко это проявилось в вечерние часы 19 января во время усиления поля кольцевого тока и 25 января во время слабой магнитной бури (см. рис. 1 и рис. 4). Судя по морфологическим признакам, вечерние положительные возмущения являются проявлениями сумеречного эффекта (“Dusk Effect”) [Buonsanto, 1999]. Возвращаясь к рис. 5, видим, что понижение MUF_{3000} на трассе Магадан—Торы в первые часы 15 января последовало за пересечением дна ГИП средней точки трассы.

Третье отличие дневного положительного возмущения 15 января от сумеречных эффектов показано на верхних панелях рис. 10. Видно, что значения foF_2 растут во время увеличения пиковой высоты F_2 -слоя (панель *a*), в то время как в случаях сумеречных эффектов (панели *б*, *в*) происходит понижение hmF_2 .

Отметим, что дневные положительные возмущения NmF_2 характерны для средних широт в зимние месяцы [Buonsanto, 1999]. В работе [Paznukhov et al., 2009] показано, что на средних широтах положительные ионосферные воз-

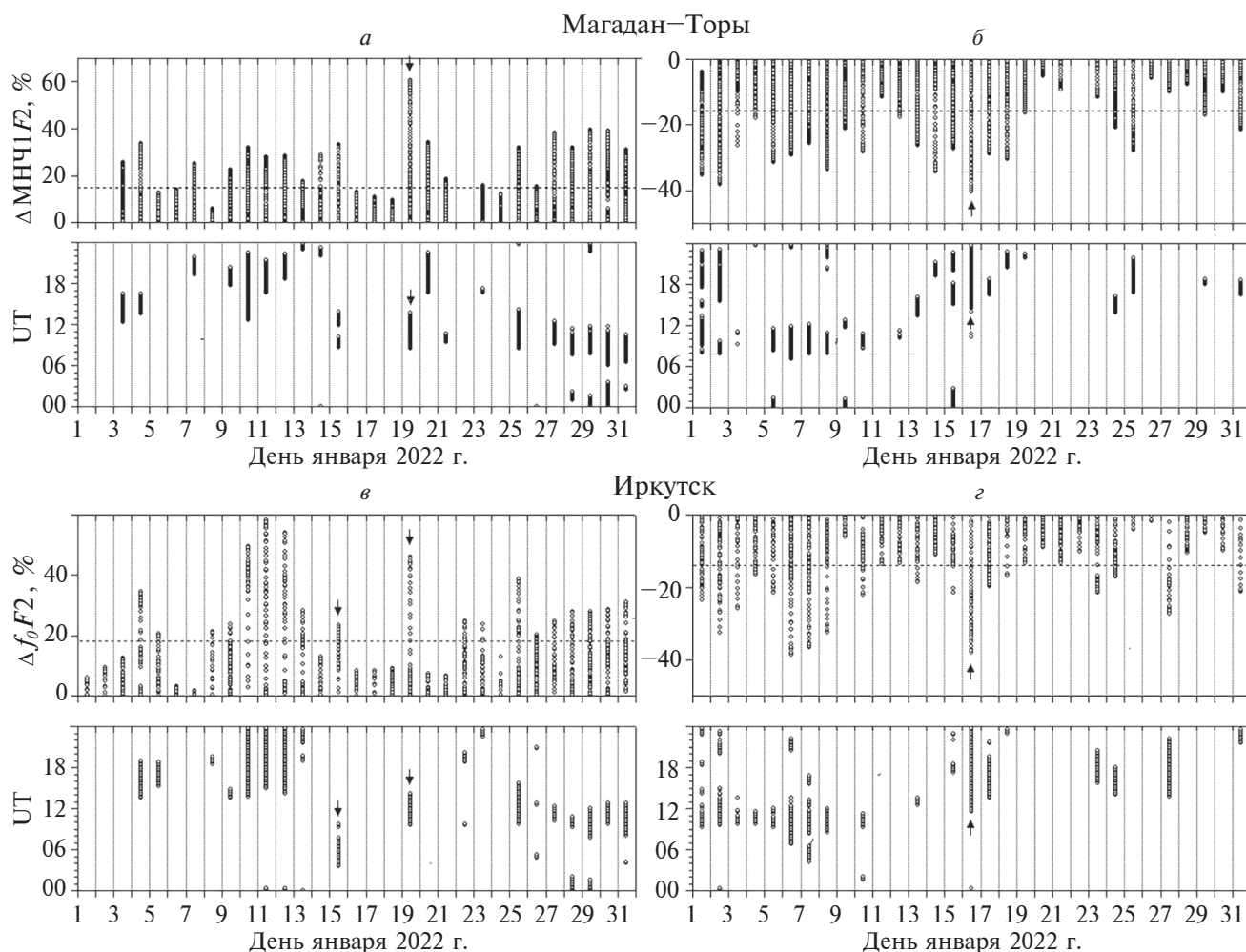


Рис. 9. (а) — Значения положительных ΔmUF_2 , наблюдавшиеся на трассе Магадан–Торы в течение каждого дня января 2022 г. (вверху), и время регистрации тех из них, которые лежат выше верхних квартилей месячных рядов положительных ΔmUF_2 (внизу); (б) — это же для отрицательных ΔmUF_2 и тех из них, которые лежат ниже нижних квартилей отрицательных ΔmUF_2 . На панелях (в) и (г) показаны аналогичные графики, построенные для положительных и отрицательных ΔfoF_2 . Горизонтальные штриховые линии отмечают верхние квартили для положительных и нижние квартили для отрицательных возмущений.

мушения, наблюдаемые во время геомагнитных бурь, запаздывают относительно повышения пиковой высоты F_2 -слоя. При этом величина задержки между увеличением hmF_2 и foF_2 составляет 1–2 ч. В нашем случае она составляет около $\Delta t \approx 1.5$ ч. Время начала положительной фазы ионосферной бури зависит от местного времени наблюдательного пункта в момент начала геомагнитной бури. Используя график, приведенный на рис. 10 в работе [Paznukhov et al., 2009], мы получили, что положительное ионосферное возмущение могло начаться в Иркутске через 8–9 ч после начала бури, то есть в 00–01 UT, что соответствует, также как величина Δt , полученным нами результатам анализа экспериментальных данных.

В совокупности, перечисленные отличия указывают на то, что в дневные часы 15.01.2022 г. в рассматриваемом долготном секторе на средних широтах преобладало влияние ветра, направленного к экватору, а в субавроральных — перемещения ГИП и, возможно, изменение состава атмосферы.

5.4.2. В п. 4.5. предыдущего раздела мы отметили, что 16.01.2022 г. ночное отрицательное ионосферное возмущение наблюдалось почти одновременно на трассе Магадан–Торы и в Иркутске. Это отчетливо видно на рис. 3, а также на рис. 9 (панели б, г), на котором это возмущение отмечено стрелками. На этих же панелях видно, что отрицательные возмущения, сравнимые по глубине и времени появления с отрицательным

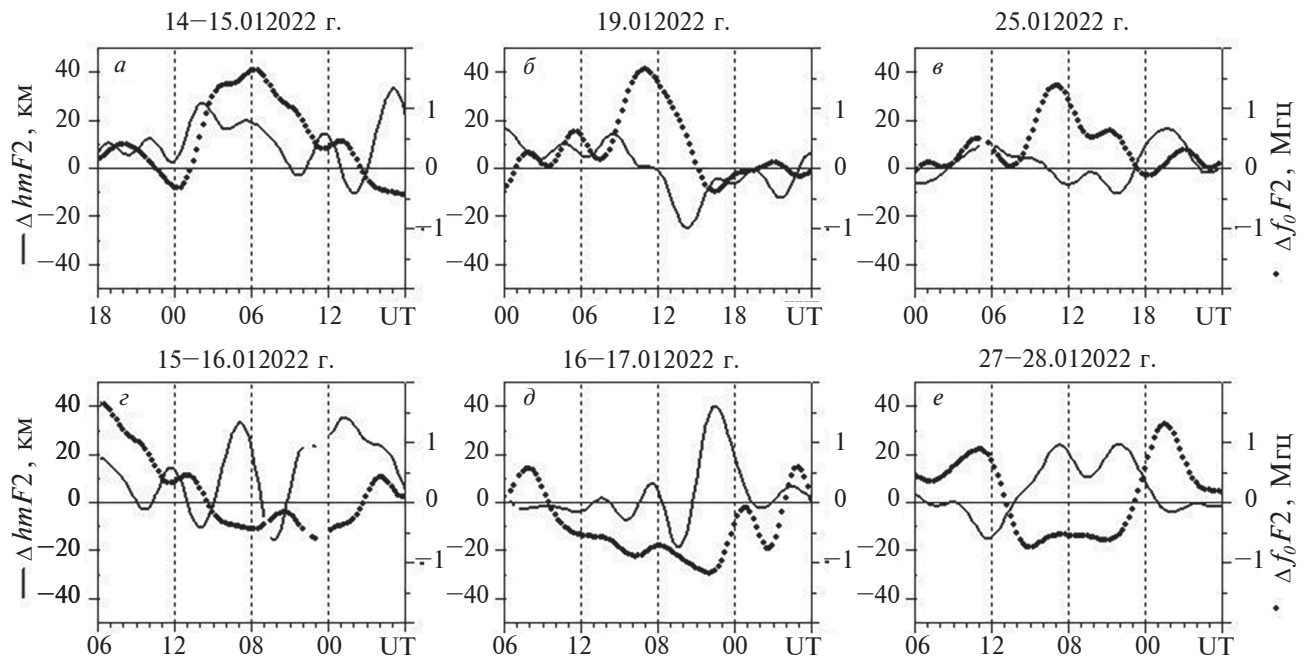


Рис. 10. Для положительных (а–в) и отрицательных (г–е) возмущений, наблюдавшихся в Иркутске в январе 2022 г., показаны изменения абсолютных отклонений $foF2$ и $hmF2$ от их фоновых значений.

возмущением 16 января, наблюдались на трассе Магадан–Торы во время слабых геомагнитных возмущений 1 и 2 января. В Иркутске наиболее близкие к нему по глубине отрицательные возмущения ($\Delta foF2 \approx -40\%$) наблюдались в магнитоспокойные дни 6 и 7 января, а по времени появления 27.01.2022 г., – в восстановительную фазу слабой магнитной бури. Однако 6, 7 января понижения $foF2$ наблюдались не в ночные, а в полуденно-вечерние часы, а возмущение 27 января имело гораздо меньшую глубину $\Delta foF2 \approx -30\%$.

Приведенные на рис. 10 (панели г–е) графики демонстрируют тенденцию увеличения $hmF2$ во время отрицательных ионосферных возмущений, развивавшихся над Северо-Восточным регионом России в январе 2022 г.

6. ВЫВОДЫ

Анализ данных вертикального и наклонного зондирования, полученных в Северо-Восточном регионе России в январе 2022 г., показал, что ионосферная буря, сопровождавшая магнитную бурю 14–20 января 2022 г., содержала следующие, не наблюдавшиеся в другие дни этого месяца, элементы.

1. Продолжительное увеличение $MUF(3000)F2$ на трассе Норильск–Торы, начавшееся 14 января через 3 ч после начала главной фазы с повышения $MUF(3000)F2$ относительно фона на 100% и, спустя 2 ч, на $\Delta MUF(3000)F2 = 120\%$.

2. Резкий, произошедший между 2 сеансами зондирования на трассе Магадан–Торы, рост $MUF(3000)F2$ на 5.6 МГц (на $\sim 70\%$). Он был зарегистрирован 14 января через 6 ч после начала главной фазы.

3. Активизация возмущений $foF2$ и $MUF(3000)F2$ с периодами 0.5–3.5 ч, наблюдавшаяся над Иркутском и на трассе Магадан–Торы в ночные часы 15 января (первый день восстановительной фазы бури).

4. Спорадические слои с большими предельными частотами, непрерывно регистрировавшиеся в Иркутске в течение 4 дневных часов 16 января (второй день восстановительной фазы бури).

События 1 и 2 могли быть связаны с положением средних точек радиотрасс относительно полярной и экваториальной “стенок” ГИП. На полярной стенке ГИП, т.е. в зоне диффузных высыпаний, во время геомагнитных возмущений концентрация электронов увеличена. Резкое увеличение $MUF(3000)F2$ на трассе Магадан–Торы могло быть связано с суббурей, внесшей дополнительный вклад в поток высыпавшихся электронов. Суббуря была зарегистрирована на субавроральной обс. Якутск, расположенной вблизи средней точки трассы Магадан–Торы.

Причины усиления флуктуаций $MUF(3000)F2$ и $foF2$ 15 января и образования среднеширотных спорадических слоев 15–16 января не совсем

ясны. Основываясь на спутниковых данных, полученных вблизи точки либрации L1, мы полагаем, что активизация ночных возмущений с периодами 0.5–3.5 ч в восстановительную фазу бури могла быть связана с усилением термосферного ветра и воздействием флуктуаций давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на находящуюся в метастабильном состоянии магнитосферно-ионосферную систему.

Длительное положительное возмущение, наблюдавшееся в Иркутске в дневные часы 15 января, развивалось на фоне увеличения высоты максимума F2-слоя и отрицательного ионосферного возмущения на трассе Магадан–Торы. В совокупности это указывает на то, что в дневные часы 15.01.2022 г. в рассматриваемом долготном секторе на средних широтах преобладало влияние ветра, направленного к экватору, а в субавроральных – смещение дна ГИП до широты средней точки трассы Магадан–Торы и изменение состава атмосферы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены на базе наблюдений, проводимых с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-angara.iszf.irk.ru/>). Мы благодарим менеджеров сайтов (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>), (<https://intermagnet.org>), (https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public), (https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr-aur_cs) и коллаборации SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/indices/>) за возможность использования информации, размещенной на их сайтах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 5. С. 1–33. 2013. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=189>
- Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 58. № 3. С. 366–373. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030070>
- Жеребцов Г.А., Пирог О.М. Динамика и макроструктура ионосферной плазмы / Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Том I–3. Ионосферная

плазма. Часть 1. Ред. В.Д. Кузнецов, Ю.Я. Ружин. М: Янус-К. С. 363–380. 2008.

– Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. № 3 (6). С. 3–13. 2014.

<https://sciup.org/kosmicheskaja-pogoda-i-riski-kosmicheskoy-deyatelnosti-14343447>

– Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Ионосферные эффекты слабых геомагнитных бурь в минимуме солнечной активности: весеннее равноденствие / Материалы всероссийской открытой научной конференции Армандовские чтения: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн [Электронный ресурс]. С. 105–114. 2022.

<https://doi.org/10.24412/2304-0297-2022-1-105-114>

– Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. Т. 7. № 3. С. 72–109. 2021.

<https://doi.org/10.12737/szf-73202106>

– 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. 2013.

<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=166>

– 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 аэронавигация. Т. 56. № 5. С. 591–605. 2016.

– 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>

– Anderson C.N. Correlation of long wave transatlantic radio transmission with other factors affected by solar activity // Proc. Inst. Radio Eng. V. 16. № 2. P. 297–347. 1928. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1928.221400>

– Borovsky J.E., Denton M.H. Solar wind turbulence and shear: A superposed-epoch analysis of corotating interaction regions at 1 AU // J. Geophys. Res. V. 115. № A10101. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA014966>

– Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // Space Sci. Rev. V. 88. № 3–4. P. 563–601. 1999.

<https://doi.org/10.1023/A:1005107532631>

– Buresova D., Lastovicka J., Hejda P., Bochnicek J. Ionospheric disturbances under low solar activity conditions // Adv. Space Res. V. 54. P. 185–196. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.007>

– Chen Y., Liu L., Le H., Zhang H., Zhang R. Responding trends of ionospheric F₂-layer to weaker geomagnetic activities // J. Space Weather Space Clim. V. 12. № 6. 12 pp. 2022. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022005>

– Ding F., Wan W., Liu L., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Perevalova N.P. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during

- major magnetic storms over the years 2003–2005 // *J. Geophys. Res.* V.113. № A00A01. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013037>
- Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V., Roble R.G., Richmond A.D. How does the thermosphere and ionosphere react to a geomagnetic storm? / *Magnetic Storms / AGU Geophysical Monograph Series*. V. 98. Eds. B. T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, Y. Kamide, J.K. Arballo. American Geophysical Union, Washington, D.C. P. 203–225. 1997.
- 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. Iss. A4. P. 5771–5792. 1994. <https://doi.org/10.1029/93JA02867>
- 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>
- Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // *J. Geophys. Res.* V. 20. № 2. P. 293–315. 1982.
- 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. Sol.-Terr. Phys.* V. 70. № 18. P. 2346–2357. 2008.
- Kurkin V.I., Polekh N.M., Zolotukhina N.A. Effect of weak magnetic storms on the propagation of hf radio waves // *Geomagnetism and Aeronomy.* V. 62. № 1–2. C. 104–115. 2022. <https://doi.org/10.1134/S0016793222020116>
- Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 102. № A7. P. 14209–14213. 1997. <https://doi.org/10.1029/96JA04020>
- Marmet P. New digital filter for the analysis of experimental data // *Rev. Sci. Instrum.* V. 50. № 1. P. 79–83. 1979. <https://doi.org/10.1063/1.1135673>
- 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>
- Mikhailov A.V., Depueva A.Kh., Leschinskaya T.Yu. Morphology of quiet time F2-layer disturbances: high and lower latitudes // *Int. J. Geomagn. Aeron.* V. 5. № 1. GI1006. 2004. <https://doi.org/10.1029/2003GI000058>
- Mikhailov A.V., Perrone L., Nusinov A.A. Mid-latitude daytime F2-layer disturbance mechanism under extremely low solar and geomagnetic activity in 2008–2009 // *Remote Sens.* 13. 1514. 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13081514>
- Paznukhov V.V., Altadill D., Reinisch B.W. Experimental evidence for the role of the neutral wind in the development of ionospheric storms in midlatitudes // *J. Geophys. Res.* V. 114. № A12319. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014479>
- Perrone L., Mikhailov A.V., Nusinov A.A. Daytime mid-latitude F2-layer Q-disturbances: A formation mechanism // *Sci Rep.* V. 10. 9997. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66134-2>
- Pickard G.W. The correlation of radio reception with solar activity and terrestrial magnetism // *Proc. Inst. Radio Eng.* V. 15. № 2. P. 83–97. 1927. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1927.221165>
- Prolss G.W. Magnetic storm associated perturbations of the upper atmosphere / *Magnetic Storms / AGU Geophysical Monograph Series*. V. 98. Eds. B.T. Tsurutani, W.D. Gonzalez, Y. Kamide, J.K. Arballo. American Geophysical Union, Washington, D.C. P. 227–241. 1997.
- Prolss G.W. Ionospheric F-region storms: Unsolved problems / *Characterizing 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.
- Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Dmitriev A.V., Medvedeva I.V. Relation of extreme ionospheric events with geomagnetic and meteorological activity // *Atmosphere*. V. 13. № 1. P. 146. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010146>
- Tang Q., Sun H., Du Z., Zhao J., Liu Y., Zhao Z., Feng X. Unusual enhancement of midlatitude sporadic-E layers in response to a minor geomagnetic storm // *Atmosphere*. V. 13. № 5. P. 816. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13050816>
- Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic stratosphere dynamical processes in the winter 2021–2022 // *Atmosphere*. V. 13. № 10. P.1550. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13101550>
- Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E. et al. Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb Waves // *Front. Astron. Space Sci.* 9:871275. 2022. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>
- URL Intermag: <https://intermag.net.org/>
- URL qd: <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>
- URL OMNI2: https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/
- URL Oval: https://ssusi.jhuapl.edu/gal_edr-aur_cs
- URL SME: <https://supermag.jhuapl.edu/indices/>

Specific Features of Ionospheric Disturbances Accompanying the 14–20 January 2022 Magnetic Storm

V. I. Kurkin^{1, *}, N. A. Zolotukhina^{1, **}, S. N. Ponomarchuk^{1, ***}, A. V. Oinats^{1, ****},
K. G. Ratovsky^{1, *****}

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS),
Irkutsk, 664033, Russia*

**e-mail: vikurkin@yandex.ru*

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

****e-mail: spon@iszf.irk.ru*

*****e-mail: oinats@iszf.irk.ru*

******e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru*

We conducted the analysis of ionospheric disturbances that occurred during the moderate magnetic storm of 14–20 January 2022. The study is based on data of vertical and oblique ionospheric sounding obtained in the Northeastern region of Russia, and supplemented by observations at HF radars and magnetic observatories. It has been revealed that the amplitudes of positive and negative ionospheric disturbances accompanying this storm are comparable to those observed on other days of January during weak magnetic storms and disturbances. Specific features of the disturbances observed only during the storm in question are as follows: (1) a midnight–morning increase of the maximum observed frequency of one-hop mode of HF radio wave propagation on the paths Norilsk — Tory and Magadan — Tory on 14 January; (2) enhanced nighttime fluctuations in F_2 -layer critical frequency in Irkutsk and the maximum observed frequency of one-hop mode on the path Magadan — Tory on 15 January; (3) Morning–midday E_s layers with limiting frequencies reaching 7 MHz that were observed in mid-latitudes at the end of the first and beginning of the second day of the storm recovery phase.

Keywords: magnetic storm, ionospheric sounding, ionospheric disturbances, radio wave propagation, maximal observed frequency, F_2 -layer critical frequency, main ionospheric trough, diffuse electron precipitation