

Ионосферные эффекты слабых геомагнитных бурь в минимуме солнечной активности: весеннее равноденствие

В.И. Куркин¹, Н.М. Полех¹, Н.А. Золотухина¹

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ)
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А
E-mail: yikurkin@yandex.ru*

*Исследованы условия распространения КВ-радиоволн во время слабых геомагнитных бурь, наблюдавшихся в марте 2018–2020 гг. при низкой солнечной активности. Показано, что независимо от типа межпланетного источника бури (межпланетный выброс корональной массы или высокоскоростной поток плазмы солнечного ветра из корональной дыры), длительное воздействие на систему магнитосфера-ионосфера-термосфера этого источника и предшествующих ему гелиосферных неоднородностей вызывает ионосферные возмущения, оказывающие значительное влияние на частоты принимаемых сигналов.
Ключевые слова: вертикальное и наклонное зондирование, солнечный ветер, магнитная буря, максимальная наблюдаемая частота*

Ionospheric effects of weak geomagnetic storms under the minimum of solar activity: spring equinox

V.I. Kurkin¹, N.M. Polekh¹, N.A. Zolotukhina¹

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS*

*The conditions for HF radio wave propagation during weak geomagnetic storms observed in March of 2018–2020 at low solar activity were studied. It is shown that regardless of the type of storm interplanetary source (Interplanetary Coronal Mass Ejection or Coronal Hole High Speed Stream), a long-term impact on the magnetosphere-ionosphere-thermosphere system of this source and preceding heliospheric inhomogeneities causes ionospheric disturbances that a significant effect on the frequencies of the received signals.
Keywords: vertical and oblique sounding, solar wind, magnetic storm, maximal observed frequency*

Введение

Исследование влияния на околоземное космическое пространство таких явлений, как интенсивные солнечные вспышки, выбросы корональной массы и потоки солнечного ветра из корональных дыр, проводятся в течение многих десятилетий. Это обусловлено их негативным воздействием на функционирование систем радиосвязи, радиолокации, спутниковой навигации и жизнеобеспечения космических аппаратов [1–3]. Особенно большой интерес исследователей вызывают сильные геомагнитные бури, вызванные межпланетными выбросами корональной массы (Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME), во время которых в магнитосферу Земли поступает значительное количество энергии. При этом наблюдается комплекс явлений, вызванных взаимосвязанными процессами в магнитосфере, ионосфере и термосфере. Они сопровождаются изменением динамического режима атмосферы, вариациями ее состава, появлением больших градиентов электронной концентрации, что в конечном итоге вызывает изменение свойств ионосферного радиоканала [3–6].

Годы минимума солнечной активности характеризуются, как правило, отсутствием сильных магнитных бурь, а наблюдаемые ионосферные возмущения обычно вызваны

высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр (Coronal Hole High Speed Stream, CH HSS) и метеорологическими эффектами, к примеру, внезапными стратосферными потеплениями [7]. Эксперименты, проведенные на трассах наклонного зондирования, показали, что даже в спокойных геомагнитных условиях регистрируются колебания максимальных наблюдаемых частот (МНЧ), обусловленные усилением волновой активности [8].

Воздействие высокоскоростных потоков на ионосферу довольно сложно и неоднозначно. Используя значения критической частоты слоя F2 (f_oF2) и максимальной наблюдаемой частоты односкачкового мода (МНЧ1F2), авторы [9,10] показали, что значительные (на несколько МГц) отклонения текущих значений этих параметров от их фоновых величин могут быть вызваны высокоскоростными потоками солнечного ветра. Согласно этим работам, максимальный ионосферный отклик наблюдается в тех случаях, когда скорость солнечного ветра не превышает 700 км/с.

Основываясь на данных наклонного зондирования, полученных в 2018–2020 гг. в дни, близкие к осеннему равноденствию, авторы [11] показали, что длительное воздействие на магнитосферно-ионосферно-термосферную систему CH HSS приводит к значительным нарушениям условий распространения КВ-радиоволн. Во время рассмотренных авторами слабых бурь понижения МНЧ1F2 относительно фоновых значений достигали днем 25–35%; вечером и ночью — 40–50%, или прохождение сигналов отсутствовало. В данной работе представлены результаты подобного исследования, выполненного для этих же лет и месяцев весеннего равноденствия.

Наблюдения и обозначения

В основу исследования положены данные наклонного зондирования, полученные на радиотрассах Норильск–Иркутск, Магадан–Иркутск и Хабаровск–Иркутск (координаты средних точек трасс соответственно: 60.9° N, 98° E; 58.5° N, 125.8° E; 51.3° N, 119.5° E) и вертикального зондирования, полученные в Иркутске (52.5° N, 104.0° E). Приемо-передающие пункты трасс оснащены многофункциональными ЛЧМ-ионозондами "Ионозонд-МС" [12], работающими на частотах 4–30 МГц (интервал зондирования $\Delta t = 5$ мин), ионосферная станция Иркутск — дигизондом DPS-4 ($\Delta t = 15$ мин). Факт наличия ионосферных возмущений и их амплитуды определялись путем сравнения текущих и фоновых значений МНЧ1F2 и f_oF2 . Фоновые значения были получены сглаживанием средних значений этих параметров, измеренных в магнитоспокойные дни, наиболее близкие к началу анализируемого возмущения.

Для анализа геомагнитной активности использовались значения K_p , Dst, SYM-H и PCN индексов, приведенные соответственно на сайтах <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html#LIST>, https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html> и <https://pcindex.org/archive>. Структура межпланетных источников возмущений изучалась по данным, размещенным на сайте https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/ (OMNI (Combined 1AU IP Data; Magnetic and Solar Indices)) с минутным и часовым разрешениями. В статье использованы следующие обозначения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП): V_t , V_y ММП, V_z ММП — модуль ММП, азимутальная и вертикальная компоненты ММП в солнечно-магнитосферной системе координат; N_{sw} , V_{sw} и V_y — плотность, радиальная и азимутальная компоненты скорости солнечного ветра; β — отношение плазменного давления к магнитному; Φ — долгота направления потока плазмы солнечного ветра. По параметрам солнечного ветра и ММП были вычислены следующие величины: E_c — напряженность поля магнитосферной конвекции [13]; S — удельная энтропия ионов солнечного ветра [14]; ε — параметр Акасофу [15]. Данные

OMNI и SOHO LASCO CME CATALOG [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/] были использованы для верификации типа межпланетного источника, указанного для каждого из рассмотренных событий на сайтах <http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> и http://www.solen.info/solar/old_reports. При интерпретации обнаруженных ионосферных возмущений использовались карты GPS_TEC1HR_IGS, взятые на сайте https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/istp_public/ (GPS), и полученные в Магадане и Новосибирске данные вертикального зондирования (доступны на <http://ipg.geospace.ru/graph/ion/>).

Анализ магнитосферно-ионосферных возмущений

Анализировались ионосферные данные, полученные во время слабых геомагнитных бурь, наблюдавшихся в близкие к весеннему равноденствию дни марта 2018, 2019 и 2020 гг.

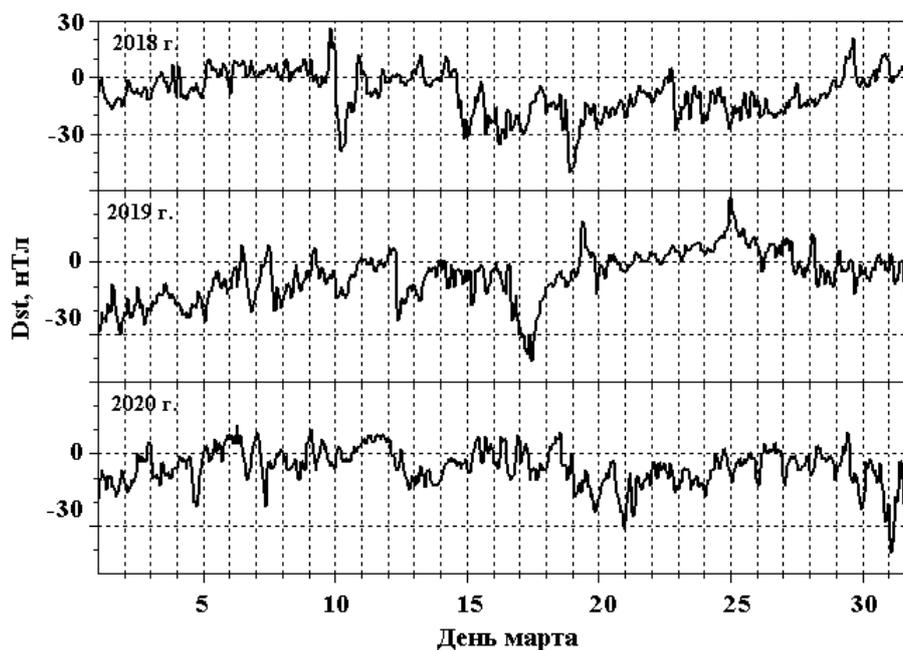


Рис. 1. Изменения Dst индекса в марте 2018, 2019 и 2020 гг. (верхняя, средняя и нижняя панели соответственно)

Таблица 1. Список анализируемых бурь

№	Даты	Главная фаза				Dst min, нТл	Кр max	Межпланетный источник
		Начало		Конец				
		День	UT	День	UT			
1	09–10/03/2018	09	23:17	10	04:32	-49	4+	CME
2	14–15/03/2018	14	15:01	15	00:57	-32	4	CH HSS (CH857)
3	15–17/03/2018	15	14:16	16	04:52	-35	4+	CH HSS (CH857)
4	17–21/03/2018	17	22:48	18	21:47	-50	6	CH HSS (CH857)
5*	22–29/03/2018	22	18:56	22	22:00	-28	4	CH HSS (CH858)
6	16–19/03/2019	16	14:31	17	10:46	-41	5-	CME
7	18–22/03/2020	18	12:44	20	23:05	-31	4+	CH HSS (CH955)
8	29–31/03/2020	29	10:38	31	02:33	-41	4	CH HSS (CH956)

На рис. 1 показаны изменения Dst индекса в течение рассматриваемых месяцев. Для выделения слабых бурь использован установленный для них критерий: минимальное значение $Dst \leq -30$ и > -50 нТл. Список соответствующих этому

критерию событий дан в Таблице 1. Исключением является пятое событие (помечено звездочкой). В нем, по предварительным данным, Dst индекс понизился лишь до -28 нТл. Время начала и конца главной фазы определено по изменениям SYM-H индекса.

Бури, вызванные ICME

С межпланетными выбросами корональной массы были связаны бури 1 и 6, развивавшиеся при $F10.7 \sim 67$ sfu (9–12 марта 2018 г.) и ~ 69 sfu (16–19 марта 2019 г.). Первичные источники ICME представлены в SOHO LASCO CME CATALOG как “Very Poor Event; Partial Halo” и “Poor Event; Partial Halo” в первом и шестом событиях соответственно. На рис. 2 изменения измеренных и рассчитанных по ним параметров двух ICME сопоставлены с изменениями Kp, SYM-H и PCN индексов.

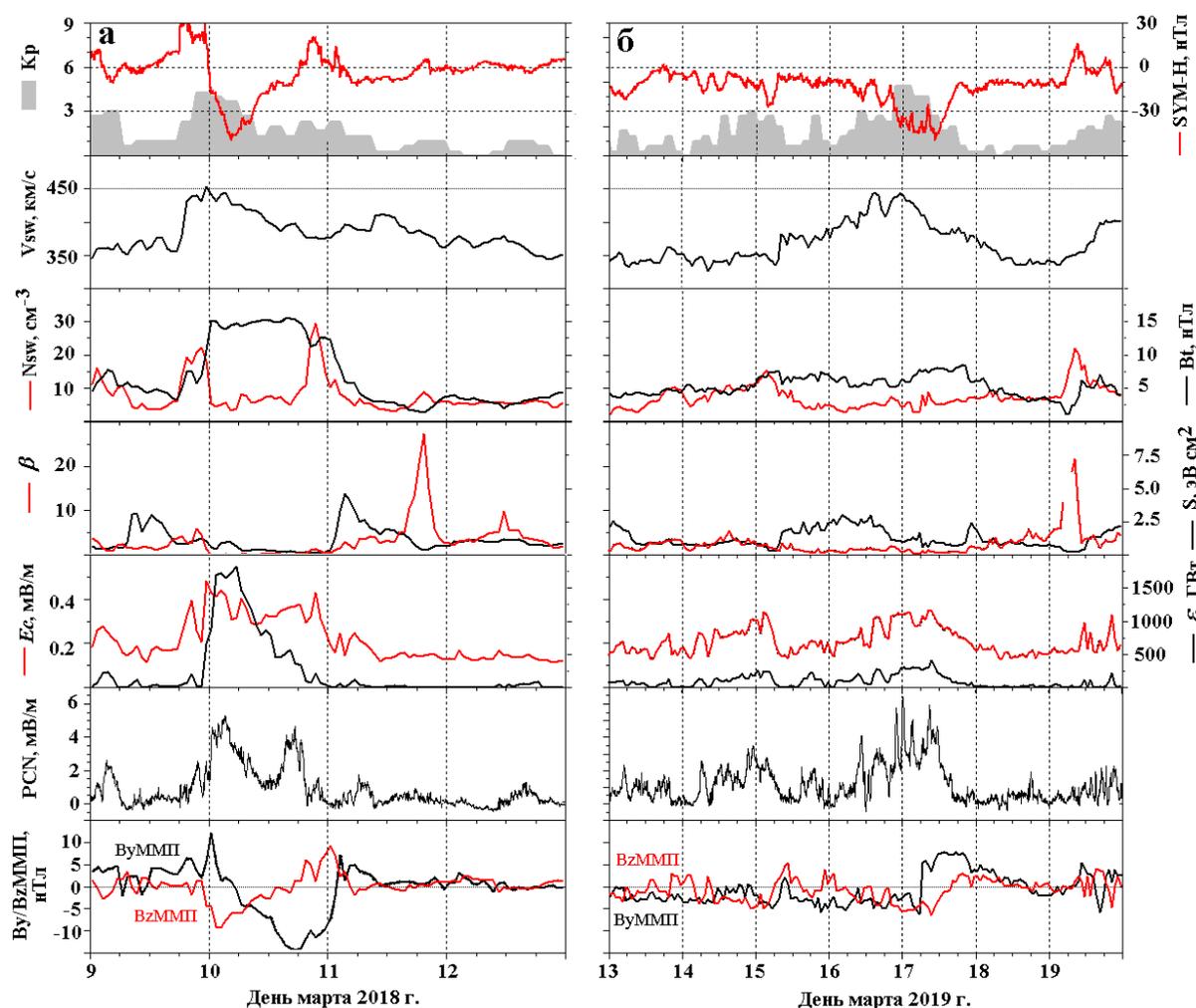


Рис. 2. Сверху вниз показаны изменения: Kp и SYM-H индексов; Vsw; Nsw и Bt; β и S; Ec и ε ; PCN индекса; B_y/B_{zMMPI} и B_z/B_{zMMPI} для 9–12 марта 2018 г. (а); то же для 13–19 марта 2019 г. (б)

Видно, что ICME, связанное с бурей 9–10 марта 2018 г., состояло из явно выраженных оболочки и собственно межпланетного выброса (в данном случае магнитного облака), что соответствует каталогу <http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>. Согласно ему, оболочка (sheath) воздействовала на магнитосферу Земли в 18–23 UT 9 марта, магнитное облако — с 00 UT 10 марта до 00 UT 11 марта 2018 г. Выброс корональной массы, связанный с бурей 16–19 марта 2019 г., влиял на магнитосферно-ионосферную систему с 20 UT 16 марта до 20 UT 17 марта. Сравнивая приведенные на

рисунках 2а и 2б графики, видим, что признаки ICME (большие значения Vt и низкие значения N_{sw} , β и S) выражены в изменениях параметров солнечного ветра и ММП в течение первого события гораздо сильнее, чем во время шестого. Отметим, что тенденции изменения ε , E_s и PCN были подобны в течение этих двух, а также остальных событий.

Графики МНЧ1F2 и foF2, приведенные на рисунках 3а и 3б, показывают, что 9–12 марта 2018 г. наблюдались только положительное ионосферное возмущение (зарегистрировано 10 марта в Иркутске и на трассе Магадан-Иркутск в утренне-полуденном секторе) и усиление колебаний с периодами 0.5–3ч. Во время положительного возмущения, последовавшего за началом главной фазы бури, высота максимума F2 слоя (hmF2) над Иркутском увеличилась от ~ 220 до 250 км (рис. 3в).

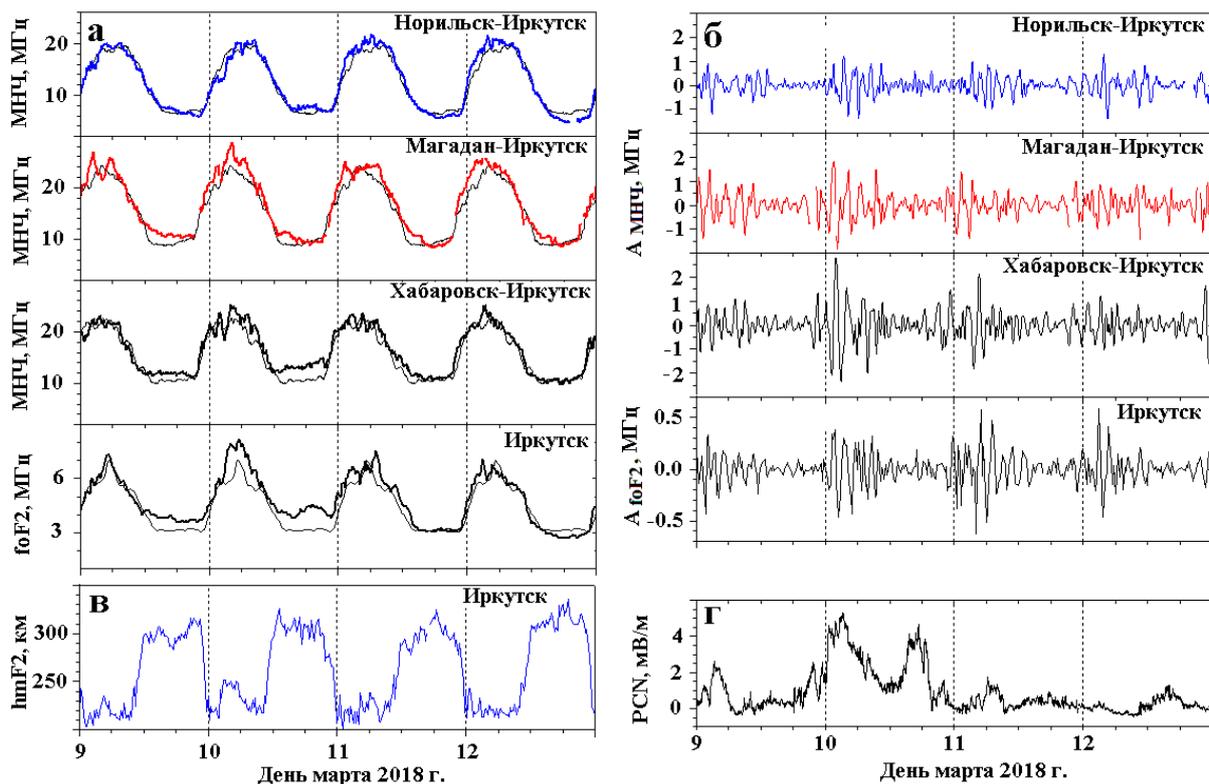


Рис. 3. Показаны вариации: МНЧ1F2 на трех трассах и foF2 в Иркутске (а); амплитуды колебаний этих параметров (АМНЧ, АfoF2) в диапазоне периодов 0.5–3.0 ч (б); высоты максимума F2 слоя (hmF2) над Иркутском(в); PCN индекса(г). На этом и других рисунках тонкими черными линиями показаны фоновые, а толстыми (черными и цветными) текущие значения МНЧ1F2 и foF2

Сопоставляя вариации МНЧ1F2 и foF2 с изменениями PCN индекса (рис. 3г) видим, что активизация волнообразных возмущений ионосферных параметров в дневные часы 10 и 11 марта совпадает по времени с усилением PCN и, соответственно, поля магнитосферной конвекции. Синхронные увеличения foF2 и hmF2, наблюдавшиеся в Иркутске 10 марта 2018 г., тоже совпадают с увеличениями E_s . Судя по расширению экваториальной аномалии, отчетливо видному в это время на картах ПЭС, указанное положительное ионосферное возмущение могло быть вызвано быстро проникающим (promptpenetrating) усиленным полем магнитосферной конвекции (см. рис. 2а), направленным днем на восток.

В отличие от рассмотренной выше бури, буря 16–19 марта 2019 г. была более продолжительной (около 3 суток). В начале главной фазы исследуемая область

находилась в предполуночном секторе. В Иркутске после 18:00 UT (01:00 LT) 16 марта 2019 г. (через ~ 3.5 ч после начала главной фазы) было зарегистрировано ночное положительное ионосферное возмущение (см. рис. 4а). Оно развивалось, как и в случае 10 марта 2018 г., на фоне увеличения $hmF2$ (на рисунке не показана), но не при усилении, а при ослаблении поля конвекции (рис. 4б), направленного в ночные часы на запад. Подобное, но меньшее по амплитуде ночное увеличение $foF2$ во время роста $hmF2$ и уменьшения PCN/ E_s наблюдалось до бури — в ~ 19 –22 UT 15 марта. На рис. 4 совпадающие по времени ночные увеличения $foF2$ и уменьшения PCN индекса выделены серыми прямоугольниками.

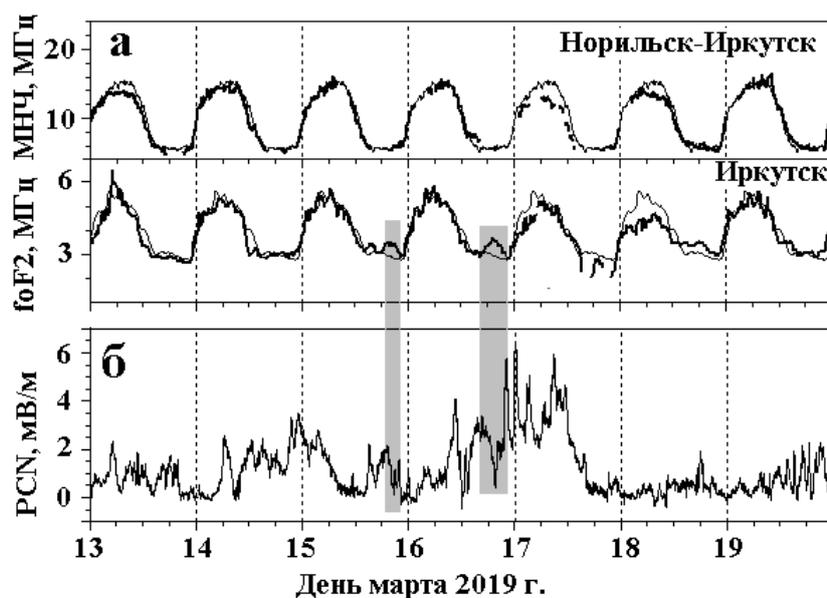


Рис.4. Изменения МНЧ1F2, $foF2$ (а) и PCN индекса (б) в бурю 16–19 марта 2019 г.

На рис. 2 видно, что в бурю 16-19 марта 2019 г. параметр Акасофу был более чем в 3, а напряженности поля конвекции в ~ 1.3 раза меньше, чем в первую бурю. Графики, приведенные на рис. 4, показывают, что, несмотря на это, в дневные часы 17 и 18 марта (в конце главной фазы и в восстановительную фазу) и в ночные часы 17 марта (восстановительная фаза) в Иркутске и на трассе Норильск-Иркутск наблюдались отрицательные возмущения. Глубина дневных понижений МНЧ1F2 и $foF2$ достигала $\sim -25\%$, а ночного $foF2$ в Иркутске $\sim -30\%$. На трассе Норильск-Иркутск в 13:50 UT 17 марта ночные значения МНЧ1F2 были на 25% ниже фоновых, а в последующие 7.5 ч (с 13:55 до 20:25 UT) отражения отсутствовали.

Судя по морфологическим свойствам, дневные понижения $foF2$, наблюдавшиеся в бурю 16–19 марта 2019 г., могли быть связаны с изменениями состава атмосферы, а ночное — со смещением главного ионосферного провала (ГИП). Эти предположения подтвердились при анализе карт ПЭС. Во время дневных отрицательных возмущений 17–18 марта на них видна область ПЭС ≤ 9 TECU, простирающаяся от высоких широт до 50° N, а во время ночного отрицательного возмущения 17 марта — ограниченная по широте область низких ПЭС, подобная, судя по серповидной форме, ГИП. Экваториальная граница этой области на меридиане 105° Е была расположена севернее Иркутска.

Возможная связь ночного отрицательного возмущения со смещением ГИП подтверждается тем, что в 17:15–19:00 UT 17 марта в Иркутске во время понижения $foF2$ до ~ 2 МГц наблюдалось характерное для ГИП увеличение $hmF2$ на 30-40 км. По данным, размещенным на <http://ipg.geospace.ru/graph/ion/>, такие же низкие значения

foF2 (1.8–2.1 МГц) наблюдались в этот день в Магадане в 12:30–20:15 UT и в Новосибирске в 16:15–18:30 UT. Отметим, что для бури 16–19 марта 2019 г. нам не удалось установить связь между усилениями поля конвекции и активизацией ионосферных волновых возмущений (см. рис. 4).

Бури, связанные с СН HSS

Основываясь на информации, размещенной на сайтах, указанных в разделе “Наблюдения и обозначения”, мы отнесли к таким событиям серии бурь, наблюдавшиеся 14–29 марта 2018 г. и 18–31 марта 2020 г.

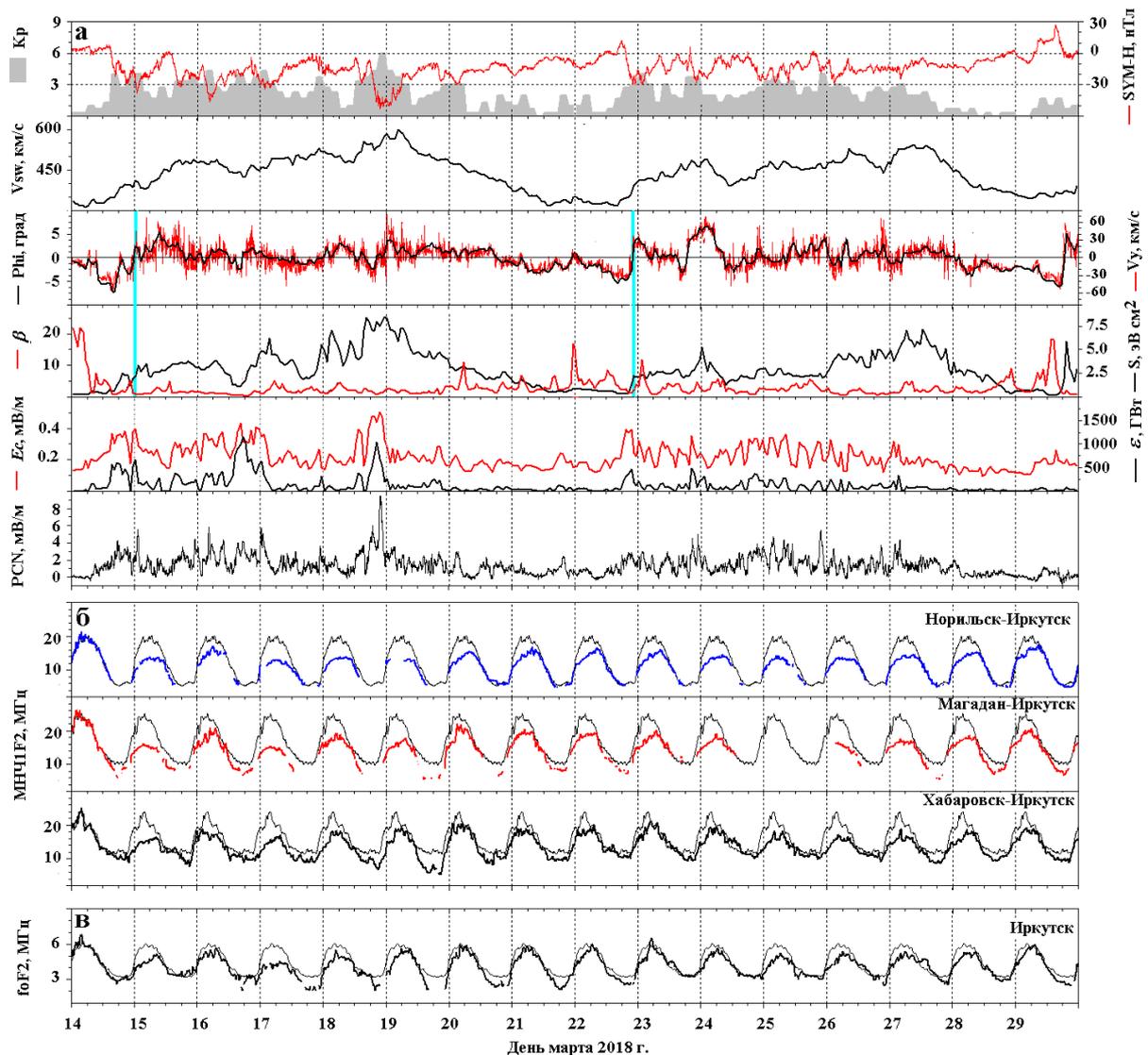


Рис. 5. Сверху вниз показаны изменения: Kp и SYM-H индексов, Vsw, Phi и Vy, β и S, Ec и ϵ , PCN индекса (а); MUF2 на трех трассах (б); foF2 над Иркутском (в)

На второй сверху панели рис. 5а видно, что первая серия бурь (март 2018 г.) развивалась под воздействием двух высокоскоростных потоков плазмы солнечного ветра. Источниками этих потоков были корональные дыры CH857 и CH858 (максимумы Vsw ~ 600 и 540 км/с соответственно). На рис. 5а отчетливо видны такие характерные признаки CHHSS и связанных с ними вращающихся областей взаимодействия (CIR, corotating interaction region), как изменение знака Vy/Phi с

отрицательного на положительный и увеличение S [14]. На рис. 5а моменты смены знака V_y/Φ отмечены голубыми вертикальными линиями.

Сравнивая рисунки 5б и 5в с рис. 3а видим, что если в бурю 9–10 марта 2018 г. преобладали положительные возмущения, то во время серии последующих бурь отклонения $MUF2$ и $foF2$ от фона были преимущественно отрицательными. Детальное сопоставление динамики параметров межпланетной среды, E_s , ε и PCN с изменениями $MUF2$ и $foF2$ показало, что отрицательное возмущение началось в исследуемом регионе сразу после начала бури 14–15 марта, совпадающего по времени с усилением поля конвекции и увеличением параметра Акасофу. С небольшими перерывами оно наблюдалось до конца анализируемого периода и усиливалось до 30–50 % после синхронных увеличений E_s , ε и PCN.

Возмущения 18–31 марта 2020 г. тоже были связаны с двумя СН HSS с максимальными значениями $V_{sw} \sim 530$ км/с (рис. 6). В этот период наблюдались две слабые бури: 18–22 и 29–31 марта. Высокоскоростной поток солнечного ветра из СН955 влиял на околоземное космическое пространство с 17 по 24 марта, из СН956 — с 30 марта до 3 апреля. Во время воздействия этих потоков характеристики распространения КВ-радиоволн на трассах Норильск–Иркутск и Магадан–Иркутск менялись подобно наблюдавшимся 15–29 марта 2018 г.: понижения $MUF2$ днем, резкий спад $MUF2$ и отсутствие принимаемых сигналов ночью.

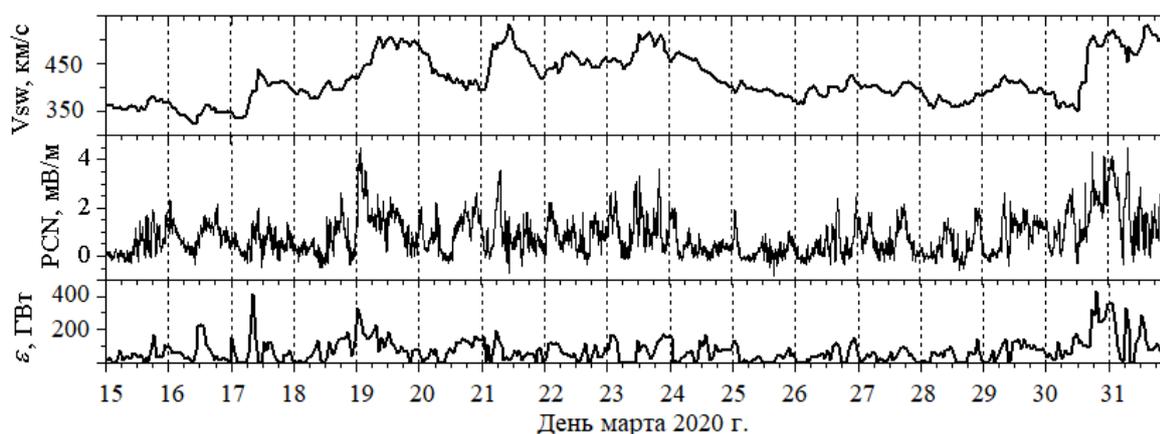


Рис. 6. Сверху вниз показаны изменения V_{sw} , PCN и ε

Дневные уменьшения $MUF2$ на 25–30%, начавшиеся 18 марта (на следующий день после прихода первого из СНHSS к магнитосфере Земли), наблюдались на обеих трассах до $\sim 10:30$ UT 21 марта. Спад $MUF2$ вновь проявился на трассе Магадан–Иркутск 30 марта (на следующий день после начала восьмой бури и за 12 часов до прихода второго СНHSS), а на трассе Норильск–Иркутск на день позже — 31 марта. В ночные часы на трассе Магадан–Иркутск 22–23 и 30 марта отмечались резкий спад $MUF2$ на 30 и 45% соответственно и отсутствие отражений на ионограммах в последующие часы. На трассе Норильск–Иркутск принимаемые сигналы отсутствовали в течение более длительного времени: 20, 22–28 и 30, 31 марта.

Обсуждение и выводы

Проведенное для минимума солнечной активности и месяцев весеннего равноденствия исследование отклика ионосферы на высокоскоростные потоки солнечного ветра, связанные с выбросами корональной массы и корональными дырами, показало, что значительные изменения параметров ионосферы и характеристик распространения КВ-радиоволн наблюдаются даже в тех случаях, когда эти потоки

вызывают лишь слабые геомагнитные возмущения. При этом отклик ионосферы определяется не только такими геоэффективными параметрами потоков, как скорость и плотность солнечного ветра, величина и ориентация межпланетного магнитного поля, но также временем их воздействия на магнитосферно-ионосферно-термосферную систему и ее состоянием во время усиления внешнего воздействия.

Так, например, первая и шестая магнитные бури (9–10 марта 2018 г. и 16–19 марта 2019 г. соответственно) были вызваны, в основном, ICME. В главную фазу относительно короткой первой бури было зарегистрировано четырехчасовое увеличение электронной концентрации и усиление волновых возмущений с периодами 0.5–3 ч. Более продолжительная шестая буря характеризовалась двухдневным спадом электронной концентрации, что привело к уменьшению МНЧ на ~20-30%.

Мы полагаем, что главной причиной различия между откликами ионосферы на два ICME заключалось в продолжительности их воздействия на магнитосферно-ионосферно-термосферную систему. В случае 16–19 марта 2019 г. длительный нагрев ионосферной плазмы в высоких широтах (значения AE индекса ~ 500–1000 нТл в течение ~ 33 часов) вызвал рост коэффициентов рекомбинационных процессов, что привело к изменению состава атмосферы и образованию области низких значений электронной концентрации, которая распространилась на более низкие широты. В бурю 9–10 марта 2018 г. AE индекс повышался до 400–700 нТл только в первые 9 часов 10 марта. В это время изучаемая область ионосферы находилась в дневном секторе, где нагрев атмосферы авроральными электроджетами слаб по сравнению с ночным сектором.

Подобные наблюдавшимся 17–18 марта 2019 г. дневные понижения электронной концентрации происходили во время продолжавшихся несколько суток магнитных возмущений, связанных с CHSS. В этих случаях отрицательные ионосферные возмущения вызвали спад максимальных наблюдаемых частот и, следовательно, уменьшение диапазона рабочих частот в 2–2.5 раза. Отметим, что явления, указывающие на развитие ГИП, наблюдались в ночные часы во время относительно слабых продолжительных геомагнитных возмущений, вызванных как CH HSS, так и ICME. Часть таких явлений могла быть проявлением “кольцевого ионосферного провала”, связанного с остаточным кольцевым током [16].

Результаты получены на базе наблюдений, проводимых с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckprf.ru/ckp/3056>]. Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278).

Литература

1. Иванов-Холодный Г.С., Никольский Г.М. Солнце и ионосфера. – М.: Наука, 1969. 466 с.
2. Buonsanto M.J. Ionospheric storms – a review // Space Sci. Rev. 1999. V. 88. № 3–4. P. 563–601.
3. Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Влияние солнечной и магнитной активности на ионосферный КВ канал по данным наклонного зондирования в сентябре 2017 г. // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLII Annual Seminar, Apatity. 2019. P. 202-205.
4. Благовещенский Д.В. Распространение дециметровых радиоволн во время геомагнитных возмущений – СПб.: ГУАП, 2011. 394 с.
5. Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения (обзор) // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 5. С. 1–33.

6. Полех Н.М., Золотухина Н.А., Романова Е.Б., и др. Ионосферные эффекты магнитосферных и термосферных возмущений 17–19 марта 2015 г. // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2016. Т. 56. № 5. С. 591–605.
7. Polyakova A.S., Chernigovskaya M.A., Perevalova N.P. Ionospheric effects of sudden stratospheric warmings in eastern Siberia region // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 120. P. 15-23.
8. Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.M., et al. Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north-eastern region of Asia during the minimum of 23rd cycle of solar activity // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 2008. V. 70. № 18. P. 2346–2357.
9. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. New ionospheric index for Space Weather services // *Adv. Space Res.* 2020. V. 66. № 6. P. 1415-1426.
10. Шейнер О.А., Выборнов Ф.И. О роли солнечных корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра в динамике характеристик ионосферы // “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XLIII Annual Seminar, Apatity. 2020. С. 142-145.
11. Куркин В.И., Полех Н.М., Золотухина Н.А. Влияние слабых магнитных бурь на характеристики распространения КВ-радиоволн // *Геомагнетизм и аэрномия*. 2022. Т.62. №2. С. 245-256.
12. Kurkin V.I., Podlesnyi A.V., Cedrik M.V. Time variations of polarization characteristics of HF radiosignals during vertical and near-vertical incidence sounding of the ionosphere // Proc.- 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC 2020): Russia, Moscow, November 25-27. 2020. P. 253-256. doi: 10.1109/RMC50626.2020.9312263.
13. 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. V. 69. № 3. P. 279–287.
14. 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.* 2010. V.115. A10101.
15. Akasofu S.I. Energy coupling between the solar wind and the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* 1981. V. 28. № 2. P. 121–190.
16. Karpachev A.T. Statistical analysis of ring ionospheric trough characteristics // *J. Geophys. Res.* 2021. V. 126. № 10. e2021JA029613.