

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 654.16

DOI: 10.37890/jwt.vi72.300

Влияние гелио-геофизической активности на надежность коротковолновой связи на транспорте

Ф.И.Выборнов¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9406-9214>

О.А.Шейнер²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5745-3308>

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра на характеристики ионосферы. Для анализа используются ионосферные данные станции вертикального зондирования CADI (г. Васильсурск, Нижегородская область) и данные ЛЧМ-станций наклонного зондирования ионосферы на разных трассах Евразийского региона России: трех субавроральных (Ловозеро-Васильсурск, Соданкюля-Васильсурск и Салехард-Васильсурск) и одной среднеширотной (Горьковская, Ленинградская область-Васильсурск). Рассмотрен комплекс параметров космической погоды (тип и скорость корональных выбросов массы, высокоскоростная скорость солнечного ветра), что позволило выявить доминирующие физические связи между динамикой ионосферы и этими двумя солнечными явлениями, которые определяют надежность коротковолновой радиосвязи между морскими судами и берегом, особенно в районе северного морского пути.

Ключевые слова: космическая погода, гелиогеофизическая активность, коротковолновая радиосвязь, техносферная безопасность, морской транспорт, ионосфера, ионосферные возмущения, вертикальное зондирование, наклонное зондирование

Helio-geophysical activity impact on reliability of transport short-wave communication

Fedor I. Vybornov¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9406-9214>

Olga A. Sheiner²

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5745-3308>

¹*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Radiophysical Research Institute UNN, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. The results of studies of the influence of coronal mass ejections and high-velocity solar wind streams on the characteristics of the ionosphere are presented. The authors used for the analysis ionospheric data from the CADI vertical sounding station (Vasilsursk,

Nizhny Novgorod region) and data from chirp stations for oblique ionospheric sounding on different paths of the Eurasian region of Russia: three subauroral (Lovozero-Vasilsursk, Sodankylä-Vasilsursk and Salekhard-Vasilsursk) and one mid-latitude (Gorky, Leningrad region-Vasilsursk). A set of space weather parameters (type and speed of coronal mass ejections, high-speed solar wind speed) is considered, which made it possible to reveal the dominant physical relationships between the ionospheric dynamics and these two solar phenomena, which determine the reliability of short-wave radio communication between ships and the coast, especially in the area of the northern sea way.

Keywords: space weather, heliogeophysical activity, shortwave radio communication, technosphere safety, naval transport, ionosphere, ionospheric disturbances, vertical sounding, oblique sounding

Введение

Несмотря на широкое распространение спутниковых и сотовых систем связи и глобализацию их применения, магистральная радиосвязь в коротковолновом диапазоне не только не утратила свою актуальность, но и привлекает все большее внимание. Так, например, наиболее рациональным и экономически выгодным решением задачи обеспечения автотранспорта Крайнего Севера радиосвязью является вариант коротковолновой радиосвязи. Передача данных по коротковолновым каналам связи обходится в десятки и даже сотни раз дешевле, чем их передача с помощью спутниковых систем связи.

Основным преимуществом радиосвязи является ее мобильность, способность передавать различную информацию в движении, не ограничивая свободу действий платформы, на которой установлена радиостанция: автомобиля, самолета, судна.

Сегодня корабли используют радио, радиолокационные и электронные системы для точного определения местоположения своего судна и других судов для обеспечения безопасной навигации. Они также используют радиосвязь для оперативного использования, а радиосигналы бедствия – для оповещения поисково-спасательных служб в случае чрезвычайной ситуации.

Одна из возможностей повышения эффективности КВ-радиосвязи – это применение метода наклонного зондирования ионосферы, что позволит выбирать оптимальные рабочие частоты. Коротковолновая радиосвязь, использующая дальней распространение радиоволн за счет их отражения от ионосферы, имеет недостаток, вытекающий из физической природы среды распространения радиоволн и самого принципа радиосвязи – зависимость от состояния ионосферы. Это влияние, главным образом, сводится к эффектам рефракции и запаздывания радиосигнала, приводящим к радиолокационным ошибкам измерения угла места и дальности соответственно [1]. На ионосферу Земли оказывает сильное влияние изменение гелиогеофизической обстановки: меняются критические частоты, наблюдается сильное поглощение радиоволн коротковолнового диапазона.

Согласно современным представлениям, существуют два основных сценария передачи возмущения от Солнца к магнитосфере: первый связан с корональными выбросами массы (СМЕ), второй – с корональными дырами, которые порождают высокоскоростные потоки солнечного ветра на орбите Земли (HSS) [2].

В последние годы активно изучается роль СМЕ и HSS во влиянии на степень возмущенности ионосферы [3] как среду распространения радиоволн, полностью определяющую надежность дальней коротковолновой связи, особенно в районе северного морского пути. Реакция ионосферных характеристик на корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра для отдельных мощных солнечных событий рассмотрена в [4].

В данной работе приводится анализ причин возникновения и степени ионосферных возмущений, влияющих на распространение радиоволн, по результатам экспериментальных исследований, выполненных на трассах наклонного и вертикального зондирования в центральном и северном регионе европейской части России. Проиллюстрировано влияние солнечных корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра на характеристики ионосферных возмущений.

Данные и метод

Для получения параметров ионосферной плазмы можно использовать два типа данных наземного зондирования ионосферы: вертикальное и наклонное зондирование. Данные вертикального зондирования ионосферы дают самую высокую частоту отражения, критическую частоту ионосферного слоя F2 (f^oF_2 , в МГц) при вертикальном распространении радиоволны. Метод наклонного зондирования – это метод, который позволяет в режиме реального времени получать данные о высокочастотном ионосферно-зависимом распространении радиоволн [5]. Максимальная частота, которая еще может отражаться от ионосферы на данной высоте отражения, называется максимальной наблюдаемой частотой (MOF, в МГц) для траекторий наклонного зондирования; она определяется критической частотой ионосферного слоя F2 в точке отражения и геометрией пути.

В данной работе для анализа используются как ионосферные данные станции вертикального зондирования, так и данные трасс наклонного зондирования. Регулярные наблюдения за состоянием ионосферы на разных трассах Евразийского региона России проводились с помощью ЛЧМ-станций на трех субавторальных (Ловозеро-Васильсурск, Соданкюля-Васильсурск и Салехард-Васильсурск) и одной среднеширотной (Горьковская, Ленинградская область-Васильсурск) трассах. Карта с отмеченными пунктами приема-передачи приведена на рис.1, параметры пунктов приема-передачи приведены в таблице 1. Приемно-передающие пункты Горьковская (Ленинградская область) и Соданкюля расположены практически на одной долготе (по середине пути), а приемопередающие пункты Соданкюля, Ловозеро и Салехард расположены почти на одной широте (по середине пути).

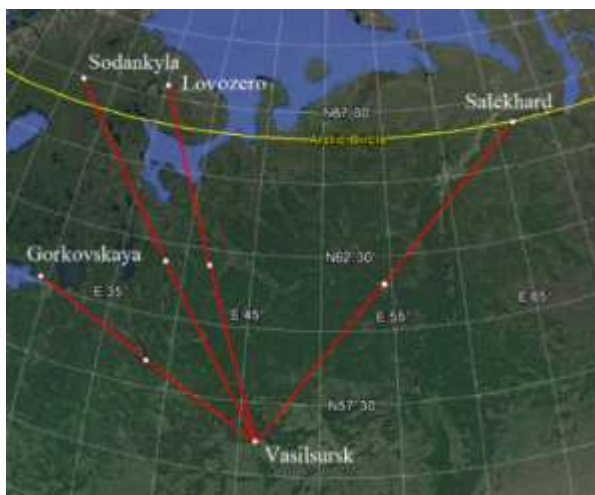


Рис. 1. Карта с изображением пунктов приема-передачи

Параметры пунктов приема-передачи

Трасса	Длина, км	Координаты передающих ЛЧМ-станций
Ловозеро – Васильсурск	1767	68.00°N, 35.02°E
Соданкюля – Васильсурск	1236	67.4°N, 26.6°E
Салехард – Васильсурск	1581	66.52°N, 66.37°E
Горьковская – Васильсурск	1500	60.27°N, 29.38°E

Данные вертикального зондирования ионосферы f^oF2 получены с помощью современного цифрового ионозонда CADI (www.sil.sk.ca) из регулярных наблюдений в обсерватории НИРФИ ННГУ «Васильсурск» (56.15° с.ш., 46.10° в.д., вблизи Нижнего Новгорода), отмечена на рис.1. Васильсурск расположен по долготе между Соданкюлей и Салехардом.

Для исследования возмущений ионосферы по данным вертикального и наклонного зондирования F2 слоя ионосферы использовался метод, описанный в [6]. Он основан на расчете девиации первого порядка временных изменений частот отражения радиосигнала, измеренных с помощью вертикального (Δf^oF2) и наклонного (ΔMOF) зондирования, новом ионосферном индексе [6].

Для данных вертикального зондирования f^oF2 , например, ионосферный индекс определяется, как:

$$\Delta f^oF2_{jk} = f^oF2_{jk} - \overline{f^oF2_j} \tag{1}$$

где $\overline{f^oF2_j} = \sum_{k=1}^N f^oF2_{jk} / N$, f^oF2_{jk} – измеренное значение, j – номер точки в течение дня, k – номер дня в месяце, N – число дней в месяце. Аналогичная процедура используется для анализа данных наклонного зондирования ΔMOF .

Результаты

Для выяснения причин возникновения и степени ионосферных возмущений, влияющих на распространение радиоволн, нами проведено сопоставление отклонений критической частоты ионосферного слоя F2 (Δf^oF2) и данных наклонного зондирования (ΔMOF) с поведением индекса Dst, характеризующего возмущенность магнитного поля, и мощными явлениями солнечной активности. Приведем результаты анализа ионосферных возмущений для каждого рассматриваемого периода.

Май 2017 г.

На рис. 2 представлены результаты совместного анализа ионосферных индексов, поведения индекса Dst, скорости солнечного ветра HSS. Кроме того, на рисунках показано время регистрации CME согласно КАТАЛОГУ CME SOHO LASCO за май 2017 г.

Горизонтальная ось на рис.2 – дни месяца; левая вертикальная ось: на рис.2б – значения скорости в км/с, на рис.2а и 2в-2ж – время суток. Регистрация корональных выбросов показана на рис.2б. Данные пояснения относятся ко всем последующим рисункам.

Как видно из рис. 2а, слабые магнитные возмущения наблюдались 20.05.17. Тем не менее, как на среднеширотной трассе Горьковская-Васильсурск, так и на 252

субавроральной трассе прослеживается сильное уменьшение на несколько МГц (синий цвет) мгновенных Δf_{OF2} и ΔMOF . При этом можно заметить незначительное увеличение уровня депрессии в продольном направлении (см. рис. 3в-3ж).

Обратим внимание на то, что на субавроральной и среднеширотной трассах временная задержка по широте или долготе отсутствует. Сильная магнитная буря ($Dst_{max} = -125$ нТл) началась 27.05.17 примерно в 23 UT с главной фазой 28.05.17 в 07 UT. Фаза восстановления продолжалась до начала июня (см. рис. 2а). На всех трассах также фиксируется сильное уменьшение на несколько МГц (синий цвет) мгновенных Δf_{OF2} и ΔMOF . Более того, увеличение на несколько МГц (оранжевый и красный цвета) мгновенных Δf_{OF2} и ΔMOF совпадает по времени с увеличением значений Dst , и этот факт можно охарактеризовать как своего рода ионосферный предвестник сильной магнитной бури.

Сильные понижения Δf_{OF2} и ΔMOF в мае 2017 г. (рис.2в-2ж), коррелированные с геомагнитной бурей 20.05.2017 г., наблюдаются при высокой скорости HSS (около 700 км/с), тогда как сильные понижения Δf_{OF2} и ΔMOF коррелируют с большой геомагнитной бурей 28.05.2017, наблюдаемой при умеренных скоростях HSS около 300 км/с. Но сравнение со временем регистрации CME позволяет предположить, что второе снижение может быть связано с корональным выбросом масс, произошедшим за 2 дня до этого.

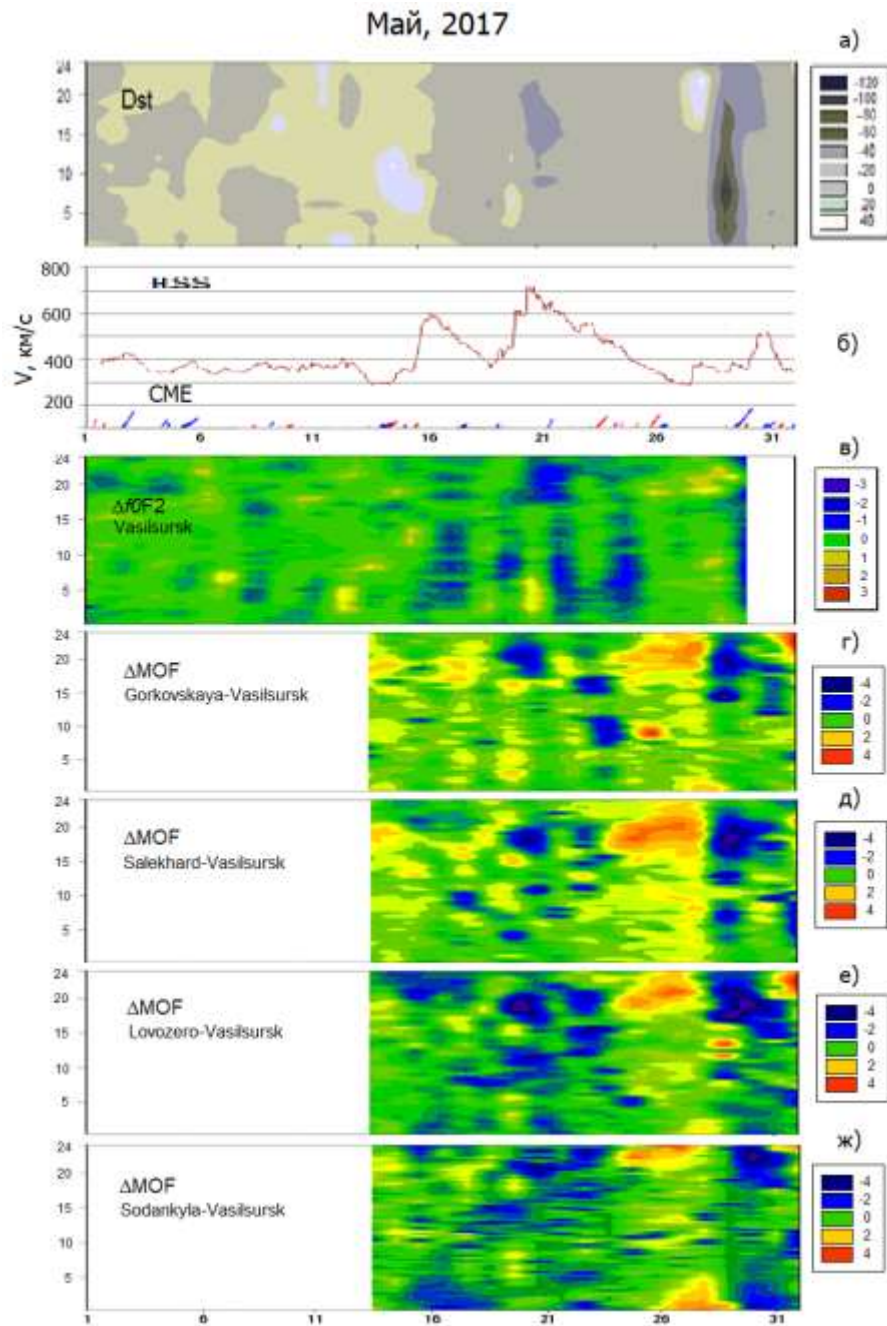


Рис. 2. Результаты совместного анализа данных за май 2017 г.

Июль 2017 г.

На рис. 3, представлены результаты совместного анализа ионосферных индексов, поведения индекса Dst, скорости солнечного ветра HSS и времени регистрации CME согласно КАТАЛОГУ CME SOHO LASCO за июль 2017 г.

В июле 2017 г. наблюдались как слабые магнитные возмущения (9-10, 27 июля), так и умеренная буря (см. рис. 3а). Геомагнитная буря началась 16 июля (начало в 06 UT), Dst-индекс достиг минимального значения -72 нТл в 15 UT, фаза восстановления продолжалась до 20 июля.

На всех трассах видно уменьшение на несколько МГц мгновенной ΔMOF во время умеренного шторма (см. рис. 3в-ж), а увеличение наблюдается на этапе восстановления и перед умеренным штормом. Аналогичный отклик наблюдается и для суббурь, причем увеличение $\Delta f_{\text{O}F2}$ отмечается в начале каждой суббури (см. рис. 3в).

В июле 2017 г. (рис. 3б) скорость HSS не превышает 600 км/с в течение всего месяца. А понижения $\Delta f_{\text{O}F2}$ и ΔMOF , коррелированные с геомагнитной бурей 20.07.2017, соответствуют нескольким СМЕ, зарегистрированным LASCO C2.

Август 2018 г.

На рис. 4, представлены результаты совместного анализа ионосферных индексов, поведения индекса Dst, скорости солнечного ветра HSS и времени регистрации СМЕ согласно КАТАЛОГУ СМЕ SOHO LASCO за август 2018 г.

Слабые возмущения геомагнитного поля зарегистрированы 15–17 августа, когда индекс Dst достигал значений до -37 нТл. Наблюдались сильные магнитные бури, начавшиеся с увеличения индекса Dst в 03 UT 25.08.18. Основная фаза длилась с 18 UT 25.08.18 до 07 UT 26 августа, когда Dst-индекс достиг своего минимального значения -174 нТл (см. рис. 4а). Фаза восстановления наблюдалась до конца августа 2018 года.

Как и в другие рассматриваемые периоды, на всех трассах прослеживается умеренное уменьшение для слабой геомагнитной бури и сильное уменьшение мгновенных $\Delta f_{\text{O}F2}$ и ΔMOF для сильной бури.

Не совсем понятно, чем вызваны понижения $\Delta f_{\text{O}F2}$ и ΔMOF , коррелированные со слабой геомагнитной бурей 15-16 августа 2018 г. (рис. 4в-4ж): скорость высокоскоростных потоков солнечного ветра умеренная (около 500 км/с), СМЕ регистрируется за 2 дня до бури. Что касается крупной магнитной бури 26 августа 2018 г., то коррелированные с ней понижения $\Delta f_{\text{O}F2}$ и ΔMOF также могут быть реакцией на высокоскоростные потоки солнечного ветра.

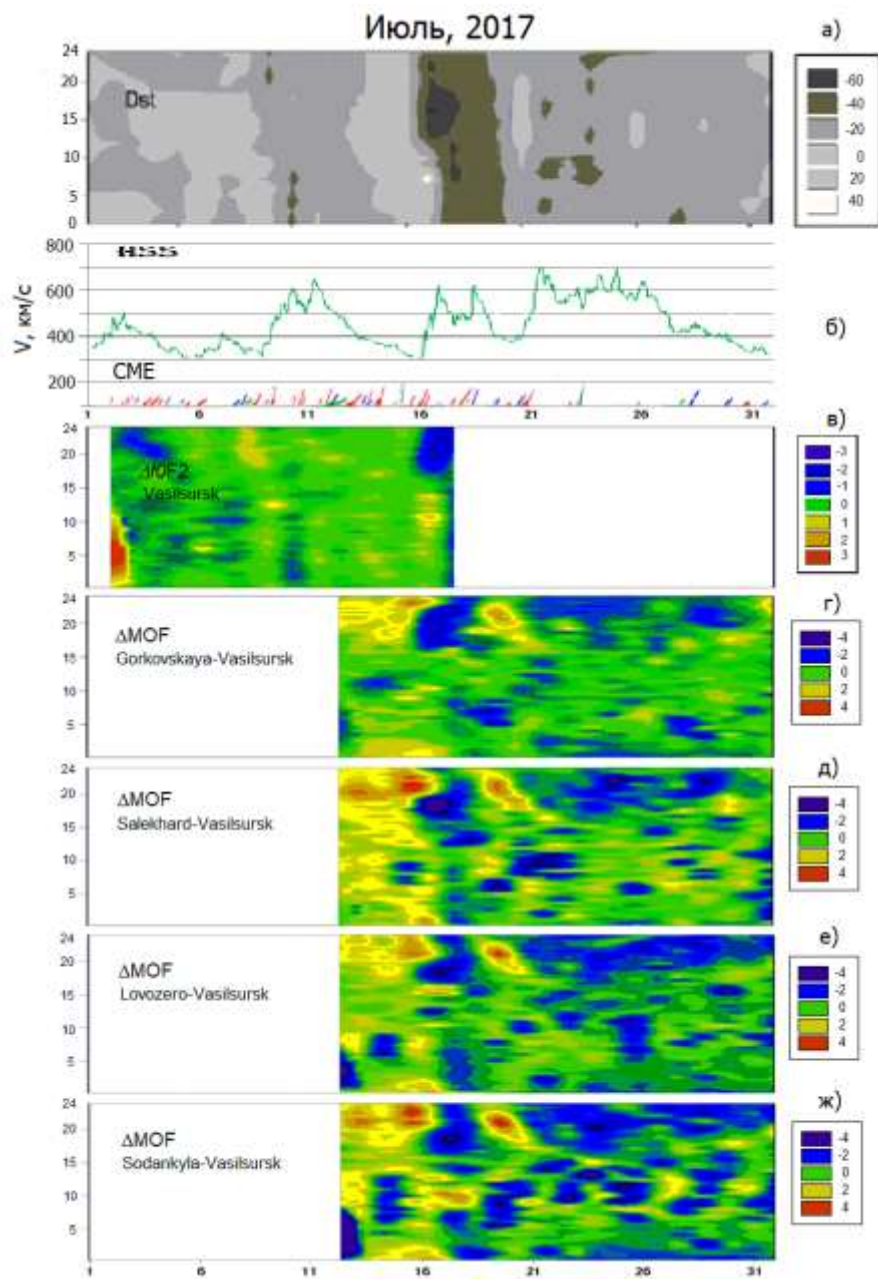


Рис. 3. Результаты совместного анализа данных за июль 2017 г.

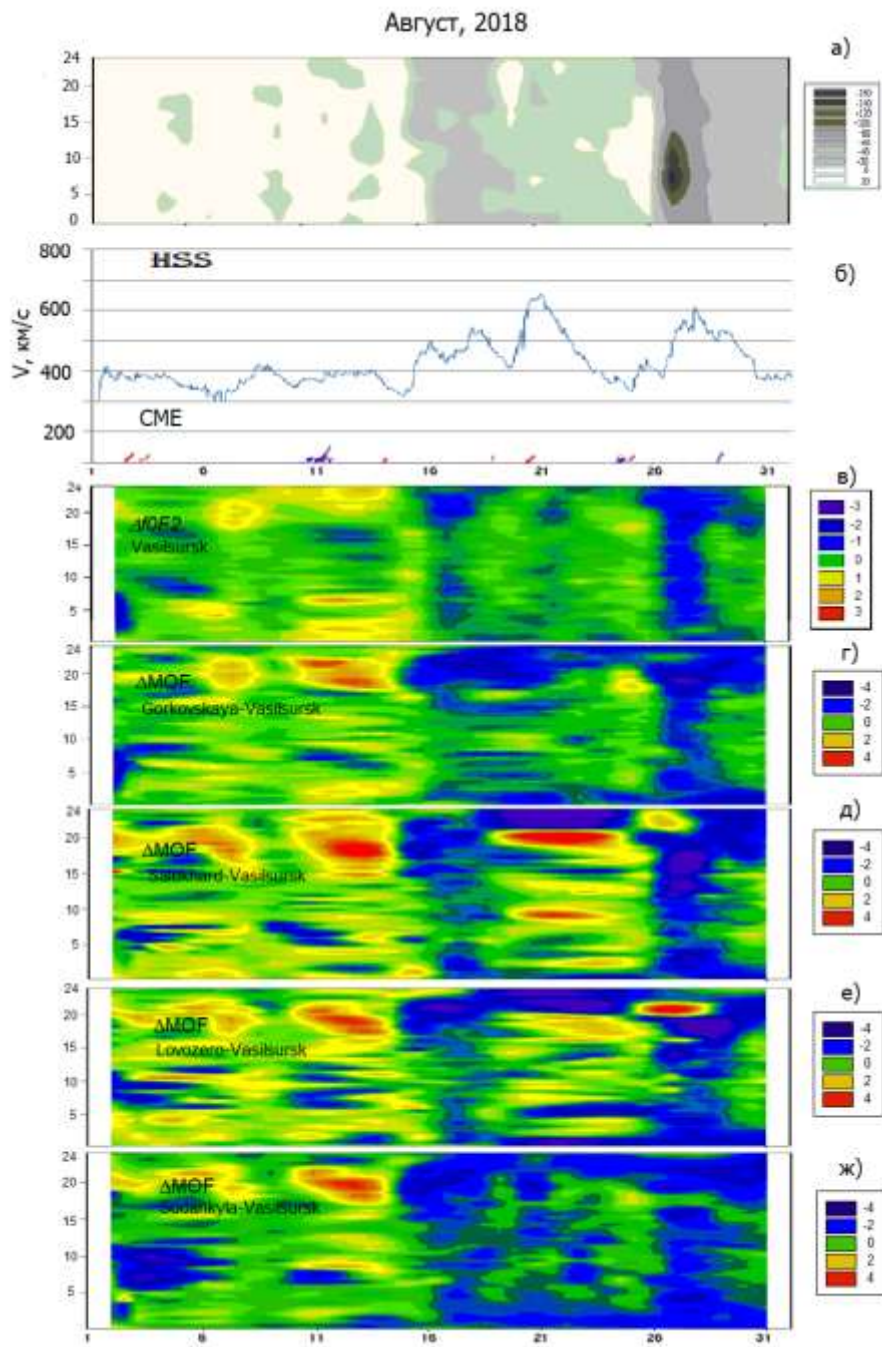


Рис. 4. Результаты совместного анализа данных за август 2018 г.

Заключение

В начале и середине XX века основным потребителем информации о космической погоде стала отрасль радиосвязи. Негативные последствия воздействия факторов

космической погоды – это и помехи в работе наземной и космической связи, и дальней радиолокации. Состояние ионосферы, среды распространения коротких радиоволн, совокупность причин и физических процессов, формирующих условия для возникновения возмущений – все это главная проблема при решении задачи надежности радиосвязи, в том числе, и на транспорте.

Одной из причин возникновения возмущений в ионосфере, определяющих само наличие возмущений и их уровень, как показали исследования, являются мощные солнечные события: корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки солнечного ветра.

В статье приведены результаты эксперимента на трех субавроральных (Ловозеро-Васильсурск, Соданкюля-Васильсурск, Салехард-Васильсурск) и одной среднеширотной (ст. Горьковская Ленинградской области-Васильсурск) трассах, полученные в спокойных и возмущенных условиях, которые подтверждают и дополняют ранее полученные результаты исследований распространения коротковолновых сигналов на высокоширотных трассах при магнитно-ионосферных возмущениях различной интенсивности [7].

Отметим, показана четкая временная корреляция отклика всех процессов на магнитные бури на субавроральных трассах, которая выражается в наличии отчетливых предвестников в течение нескольких дней (увеличение Δf_{OF2} и ΔMOF) и их уменьшение во время магнитной бури. Отмечается запаздывание отклика увеличения или уменьшения Δf_{OF2} в Васильсурске относительно остальных трасс.

Сравнительный анализ данных станции вертикального зондирования CADI (г. Васильсурск) и данных, полученных на трассах Ловозеро-Васильсурск, Соданкюля-Васильсурск, Салехард-Васильсурск и Горьковская, Ленинградская область-Васильсурск, позволяет констатировать, что наклонное зондирование ионосферы является более предпочтительным для применения используемого метода анализа ионосферных данных.

На наш взгляд, хорошее совпадение результатов обработки на разных трассах свидетельствует о быстром распространении ионосферных возмущений в рассматриваемых интервалах времени.

Экспериментальные исследования, выполненные на трассах наклонного и вертикального зондирования в центральном и северном регионе европейской части России, в сочетании с анализом зарегистрированных в эти периоды солнечных корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра показали исключительную роль мощных солнечных явлений в создании возмущенных условий в ионосфере. Указанное сильное влияние HSS и CME на параметры ионосферы ограничивает надежность коротковолновой радиосвязи и может повлиять на степень техносферной безопасности в районах морского судоходства.

Исследования выполнены по проекту № 0729-2020-0057 Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Обработка данных ЛЧМ станции наклонного зондирования ионосферы в Васильсурске выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-17-00050 (Ф.И. Выборнов).

Список литературы

1. Кравцов Ю.А., Фейзулин З.И., Виноградов А.Г. *Прохождение радиоволн через атмосферу Земли*. Москва: Радио и связь, 1983. 224 с.
2. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: Аспекты космической погоды // Геофиз. Проц. и Биосф. 2009. Т. 8. № 1. С. 5-35.
3. *Rodriguez-Zuluaga J., Radicella S.M., Nava B., Amory-Mazaudier C., Mora-Paez H., Alazo-Cuartas K.* Distinct responses of the low-latitude ionosphere to CME and HSSWS: The role

- of the IMF Bz oscillation frequency // *J. Geophys. Res. Space*. 2016. Vol. 121. – Pp. 11528–11548.
4. *Rakhlin A., Sheiner O., Vybornov F., Pershin A.* About factors of solar radiation influenced on the ionosphere // *Proceedings IAU Symposium 335 “Space Weather on the Heliosphere: Processes and Forecasts”*. 2018. P. 171–174.
 5. *Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradova E.G.* Influence of an inhomogeneous structure of the high-latitude ionosphere on the long-distance propagation of high-frequency radio waves // *Radiophys. Quantum Electron*. 2012. Vol. 55. – Pp. 232–240.
 6. *Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F.* New ionospheric index for Space Weather service // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 66. – P. 1415.
 7. *Uryadov V.P., Vybornov F.I., Kolchev A.A., Vertogradov G.G., Sklyarevsky M.S., Egoshin I.A. et al.* Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels // *Advances in Space Research*. 2018. Vol. 61. – Pp. 1837-1849.

References

1. *Kravtsov Yu.A., Feiszulin Z.I., Vinogradov A.G.* The passage of radio waves through the Earth's atmosphere. Moscow: Radio and communications, 1983. 224 p.
2. *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu.* Solar and interplanetary sources of geomagnetic storms: Space weather aspects // *Geophysical Processes and Biosphere*. 2009. Vol. 8, N 1. Pp. 5-35.
3. *Rodriguez-Zuluaga J., Radicella S.M., Nava B., Amory-Mazaudier C., Mora-Paez H., Alazo-Cuartas K.* Distinct responses of the low-latitude ionosphere to CME and HSSWS: The role of the IMF Bz oscillation frequency // *J. Geophys. Res. Space*. 2016. Vol. 121. – Pp. 11528–11548.
4. *Rakhlin A., Sheiner O., Vybornov F., Pershin A.* About factors of solar radiation influenced on the ionosphere // *Proceedings IAU Symposium 335 “Space Weather on the Heliosphere: Processes and Forecasts”*. 2018. P. 171–174.
5. *Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradova E.G.* Influence of an inhomogeneous structure of the high-latitude ionosphere on the long-distance propagation of high-frequency radio waves // *Radiophys. Quantum Electron*. 2012. Vol. 55. – Pp. 232–240.
6. *Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F.* New ionospheric index for Space Weather service // *Advances in Space Research*. 2020. Vol. 66. – P. 1415.
7. *Uryadov V.P., Vybornov F.I., Kolchev A.A., Vertogradov G.G., Sklyarevsky M.S., Egoshin I.A. et al.* Impact of heliogeophysical disturbances on ionospheric HF channels // *Advances in Space Research*. 2018. Vol. 61. – Pp. 1837-1849.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Выборнов Федор Иванович, д.ф.-м.н., доцент, зав. кафедры Физики, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

Fedor I. Vybornov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physics, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Шейнер Ольга Александровна, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский радиопизический институт ННГУ им. Н.И.Лобачевского (НИРФИ ННГУ), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская д.25/12А, e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

Olga A. Sheiner, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Radiophysical Research Institute UNN, 25/12A, B.Pecherskaya st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 16.05.2022; опубликована онлайн 20.09.2022.
Received 16.05.2022; published online 20.09.2022.