

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.037

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕРИОДЫ РЕГИСТРАЦИИ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА КОРОНОГРАФАХ

О.А. Шейнер

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Возможность подготовки и создания мер защиты от природных аномалий и от геоэффективных последствий мощных солнечных явлений в околоземных и земных процессах – актуальная задача современной науки, определяется периодом прогнозирования мощных явлений солнечной активности. Поскольку существуют методы прогнозирования отдельных явлений солнечной активности, в том числе и вызывающих возмущения в околоземном пространстве, можно было бы с определенной степенью уверенности предсказать временные возмущения в ионосфере. Способ прогноза времени регистрации коронального выброса массы был предложен на основе анализа данных солнечного микроволнового излучения, получаемых при наземном круглосуточном мониторинге при сравнительно простых усовершенствованиях методов обработки имеющейся информации. В то же время за проявление геоэффективности СМЕ можно принять длительное снижение значений девиации Δf_0F2 критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы, и прогнозирование состояния ионосферы можно связать с прогнозированием корональных выбросов массы. В данной работе приводятся прогностические оценки f_0F2 на основе данных наблюдений солнечного радиоизлучения в широком диапазоне частот.

Введение

Влияние солнечных процессов на состояние околоземной космической среды является предметом исследований в связи с его актуальностью для современных технологий. При этом следует иметь в виду, что для анализа различных процессов, происходящих в верхних слоях атмосферы Земли и в околоземном космическом пространстве, необходимо использовать полную цепочку физических процессов, происходящих между Солнцем и Землей. Обычно для получения информации о характеристиках ионосферных возмущений, вызванных солнечными явлениями, используют информацию о геомагнитных индексах (Kp, Ap, Dst), рассчитанных по наземным наблюдениям, и вариациях данных околоземного космического пространства, измеренных искусственными спутниками (поток рентгеновского излучения, поток протонов). В последние годы большое внимание уделяется исследованиям геоэффективности физических явлений, возникающих на Солнце и проявляющихся в солнечном ветре, таких, как вспышки, корональные выбросы массы (СМЕ), потоки высокоскоростного солнечного ветра.

Известно, например, что СМЕ характеризуются мощным излучением в широком диапазоне электромагнитных волн, образованием ускоренных заряженных частиц, образованием ударных волн в межпланетном пространстве [1]. Возмущения в магнитосфере и ионосфере Земли, вызванные явлениями СМЕ, приводят к нарушениям функционирования систем ориентации, связи, ряда приборов на борту космических аппаратов, вызывают многочисленные сбои в работе связи, навигации, отслеживания и предупреждения на Земле, могут привести к экстремальным ситуациям в крупных энергетических системах, ускорению процессов коррозии в нефтегазопроводах, а также повлиять на процессы формирования погоды и здоровья человека (см., например, [2-9]).

Возможность подготовки и создания мер защиты от природных аномалий и от геоэффективных последствий мощных солнечных явлений в околоземных и земных процессах и во многих областях деятельности человека – актуальная задача современной науки, и определяется периодом прогнозирования корональных выбросов массы.

Поскольку существуют методы прогнозирования отдельных явлений солнечной активности, в том числе и вызывающих возмущения в околоземном пространстве, можно было бы с определенной степенью уверенности предсказать временные возмущения в ионосфере.

В качестве одного из параметров ионосферы Земли обычно рассматривается поведение во времени критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы, измеряемой с помощью станций вертикального зондирования ионосферы. Как было показано [10,11], для повышения точности предпочтительно анализировать поведение во времени величин отклонения измеренного значения частоты от ее среднего значения Δf_0F2 по

предложенной в [10] методике. При анализе поведения Δf_0F2 и параметров корональных выбросов массы [11] нами была обнаружена корреляция между поведением девиации критической частоты (Δf_0F2) слоя F2 ионосферы и регистрацией корональных выбросов массы. Рисунок 1 иллюстрирует существование отрицательной производной во временном поведении отклонения f_0F2 после начала СМЕ типа петли, (красный квадрат) и без изменений после начала других типов СМЕ (зеленый треугольник). Две правые панели рисунка – разностное изображение СМЕ типа Jet (верхняя панель) и СМЕ типа Loop (нижняя панель) из Каталога СМЕ SOHO LASCO [12].

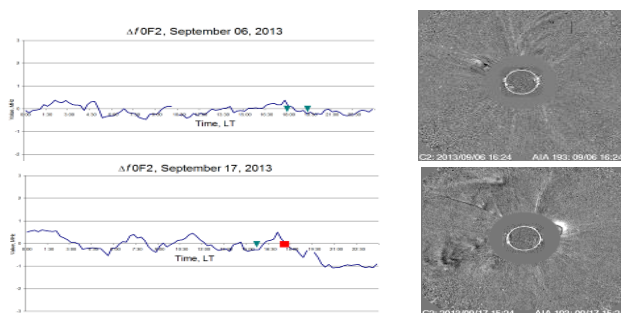


Рисунок 1.

Таким образом, за проявление геоэффективности СМЕ можно принять длительное снижение значений девиации Δf_0F2 критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы. Тогда прогнозирование состояния ионосферы можно связать с прогнозированием корональных выбросов массы.

В данной работе приводятся результаты исследования возможности применения данных наблюдений солнечного радиоизлучения в широком диапазоне частот для прогностических оценок критической частоты f_0F2 слоя F2 ионосферы.

Используемые данные и метод

Способ прогноза времени регистрации коронального выброса массы был предложен в [13, 14] на основе анализа данных солнечного микроволнового излучения, получаемых при наземном круглосуточном мониторинге и размещаемых в сети Интернет в реальном времени, при сравнительно простых усовершенствованиях методов обработки имеющейся информации.

Алгоритм и схема краткосрочного прогнозирования КВМ, разработаны на основе статистического анализа закономерностей солнечного радиоизлучения, наблюдаемого до регистрации «изолированных» солнечных корональных выбросов массы – это события, которые удовлетворяют условиям: ближайшие по времени выбросы не регистрируются в течение, по крайней мере, 8 часов ДО и 6 часов ПОСЛЕ рассматриваемого события. Это связано с тем, что данные Мировой службы Солнца в рассматриваемом диапазоне частот, были получены с помощью радиотелескопов без пространственного разрешения. Поэтому необходимо было быть уверенными в том, что в течение рассматриваемого интервала времени в поле зрения коронографа регистрируется только один, вполне определённый СМЕ, и тогда изменения в наблюдаемом без пространственного разрешения радиоизлучении будут главным образом соответствовать активности, связанной с формированием рассматриваемого коронального выброса.

Ранее было показано, что использование радиоастрономических данных как для выявления особенностей возникновения КВМ, так и для разработки способов прогноза параметров КВМ удобно и перспективно [15]. Фактически, спектральные измерения солнечного радиоизлучения охватывают все высоты солнечной атмосферы; чувствительность и точность измерений позволяют регистрировать даже небольшие изменения энергии. Регистрация радиоизлучения обеспечивается практически всепогодными наземными наблюдениями, а относительная дешевизна получения соответствующей информации обусловлена разработанной и внедренной системой мониторинга наблюдений [16].

Предлагаемый метод, как метод, основанный на эмпирических данных, является классическим сочетанием точечного метода прогнозирования, когда указывается, происходит событие или нет, и вероятностного, поскольку определяется временной интервал для регистрации события. По своей структуре метод основан на опознавательной схеме, простейшим вариантом которой является синоптическая схема, когда по предыстории, по обучающей выборке определяется то сочетание признаков, которое наиболее часто предшествовало прогнозируемому событию, что позволяет предсказывать наличие события на определенном временном интервале [17].

Анализ данных микроволнового излучения, формируемого в нижних слоях солнечной атмосферы, является эффективным методом выявления особенностей, связанных с процессами уже на стадии образования и начального распространения СМЕ. Необходимый мониторинг позволяет идентифицировать

особенности эволюции до эрупции СМЕ (эволюция корональной магнитной топологии до дестабилизации) и их генерации.

Предыдущие исследования привели к открытию явления «радиопредвестников» [18]. Было показано, что значительному количеству СМЕ в течение двухчасового интервала перед их регистрацией на коронографе предшествует спорадическое радиоизлучение, которое, т.о. может быть определено как радиопредвестник коронального выброса массы.

Это явление было использовано для уточнения прогнозируемого времени регистрации явления СМЕ. С этой целью данные станций Службы Солнца потоков радиоизлучения от всего Солнца в микроволновом диапазоне (400 МГц – 15 ГГц), доступного в Интернете в виде временной регистрации радиоизлучения или спектрограммы в реальном времени, сравниваются с данными каталогов СМЕ. При анализе рассматриваемого материала было обнаружено, что если спорадическое радиоизлучение различных типов (радиопредвестники СМЕ в виде импульсного, постепенного или серии всплесков низкой интенсивности с длительностью ≥ 3 мин и потоком, по крайней мере, 1-3 единицы на фоне полного солнечного потока) происходит одновременно и в значительной части диапазона микроволнового излучения (что характерно для локальной активной области образования СМЕ), то событие СМЕ регистрируется на коронографе в интервале ≤ 200 мин.

Рисунок 2 иллюстрирует временные изменения в потоке радиоизлучения S в виде схемы профилей записей солнечного радиопотока для различных станций службы Солнца в спектральном диапазоне наблюдений от 6 до 15 ГГц перед регистрацией СМЕ 12 августа 1989 г. СМЕ типа петля был зарегистрирован на коронографе в 12:59–14:32 UT. Метод, используемый для визуального представления данных, подробно описан в каталогах [19,20].

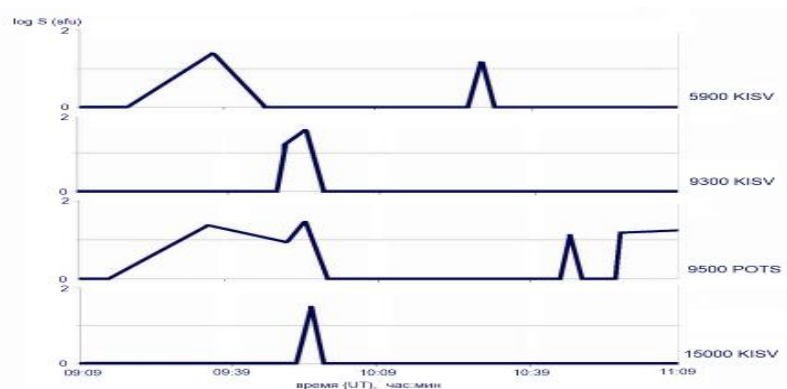


Рисунок 2.

С правой стороны рисунка показана частота наблюдения в МГц и сокращенное название соответствующей обсерватории (данные радиоизлучения Мировой службы Солнца), а с левой – значения потоков в логарифмическом масштабе. Как минимум за 3 часа до регистрации СМЕ типа петля на коронографе SMM (или за 2 часа до СМЕ типа облака) в анализируемой части микроволнового диапазона наблюдается широкополосное спорадическое явление.

Результаты анализа ионосферных данных

Рассмотрим применение предложенной процедуры для анализа состояния ионосферы на примере данных сентября 2017 г. (рис.3).

На рисунке 3 приведены результаты совместного анализа данных спутников GOES и данных вертикального зондирования ионосферы четырех разных ионосферных станций, расположенных на расстоянии друг от друга, за сентябрь 2017 г.; горизонтальная ось – дни месяца; левая вертикальная ось для Δf_0F2 – время суток (UT). Красными стрелками отмечены моменты регистрации геоэффективных СМЕ. Как видно из рисунка 3, наблюдается уменьшение мгновенного Δf_0F2 на несколько МГц (синий цвет) после регистрации указанных СМЕ 8 и 15 сентября. Следовательно, можно предположить, что именно данные СМЕ оказывают влияние на состояние ионосферы.

С другой стороны, подтверждаются установленные закономерности существования радиопредвестников отмеченных корональных выбросов массы.

Корональный выброс массы 7 сентября 2017 г. был зарегистрирован в 15:12:08 UT. Согласно данным мониторинга радиоизлучения Солнца, на двух частотах микроволнового диапазона одновременно регистрируются всплески примерно за 2 часа до момента регистрации СМЕ (см. таблицу 1). Что свидетельствует о выполнении условия прогнозирования СМЕ на интервале 2-3 часа. А значит, и о возможном прогнозировании изменений в ионосфере.

Корональный выброс массы 15 сентября был зарегистрирован в 12:00:05 UT. Как следует из рисунка 4, за 3 часа до регистрации CME на коронографе наблюдаются всплески радиоизлучения в микроволновом диапазоне – условия прогнозирования CME на интервале 2-3 часа выполнены.

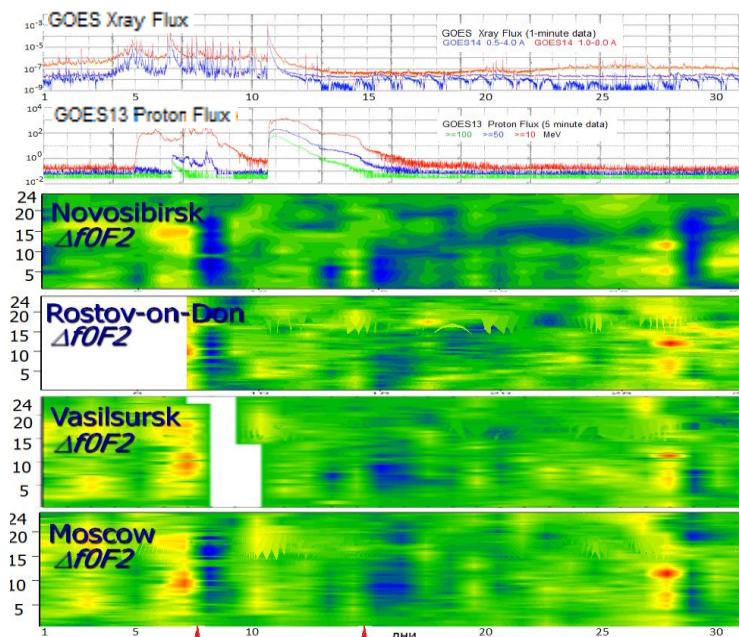


Рисунок 3.

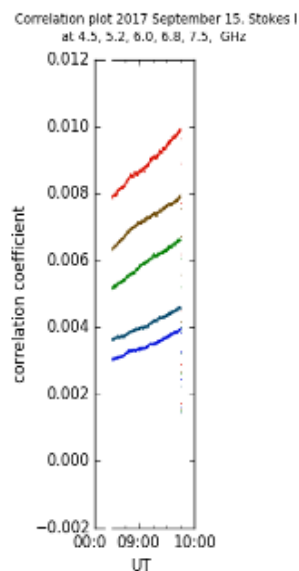


Рисунок 4.

Таблица 1.

Date	Frequency (MHz)	Type	Starting time (UT)	Time of maximum (UT)	Duration (Min.)	Flux density Peak	Flux density Mean	Observatory
07	9350	22GRF	1329.7	1331.6	17.97	7.5	-	KISL
	9350	47GB	1427.6	1433.3	33.77	3100.0	-	KISL
	6150	46C	1429.9	1433.6	14.71	874.8	-	KISL
	6150	4S/F	1445.9	1448.5	9.23	184.5	-	KISL

Выводы

На примере событий 7 и 15 сентября 2017 г. показана возможность прогностической оценки изменений критической частоты ионосферного слоя F2 (Δf_0F2) по поведению солнечного радиоизлучения в широком диапазоне частот.

Благодарности. Работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Список литературы

1. Webb D.F., Howard T.A. Coronal Mass Ejections Observations // Living Reviews in Solar Physics. 2012. V. 9, N 1. art. 3.
2. Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al. Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // Space Weather. 2017. V. 15, N 7. P. 828-856.
3. Kutiev I., Tzagouri I., Perrone L. et al. Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere // J. Space Weather Space Clim. 2013. V. 3, A06. 21p.

4. Kumar P., Uddin W., Taori A. et al. Ionospheric response to the space weather event of 18 November 2003 – an investigation // *Indian J. Radio Space Phys.* 2010. V. 39, N 5. P. 290-295.
5. Tsagouri I., Galkin I., Asikainen T. Long-term changes in space weather effects on the Earth's ionosphere // *Advances in Space Research.* 2017. V. 59, N 1. P. 351-365.
6. Чумаков А.И. Действие космической радиации на интегральные схемы. – М.: Радио и связь, 2004. 320с.
7. Бреус Т.К., Бинги В.Н., Петрукович А.А. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы // *Успехи физических наук.* 2016. Т. 186, N 5. С. 568–576.
8. Гальперин Ю.И., Дмитриев А.В., Зеленый Л.М., Панасюк М.И. Влияние космической погоды на безопасность авиа и космических полетов // *Полёт.* 2001. Т. 3. С. 27-39.
9. Libo L., WeiXing W., YiDing Ch., HuiJun L. Solar activity effects of the ionosphere: A brief review // *Chinese Science Bulletin.* 2011. V. 56, N 12. P. 1202-1211.
10. Sheiner O.A., Fridman V.M., Krupenya N.D. et al. Effect of solar activity on the Earth' environment // *Second Solar Cycle and Space Weather / ed. Huguette Sawaya-Lacoste. Proc. Euroconference ESA SP-477.* 2002. P. 479-481.
11. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. New ionospheric index for Space Weather service // *Advances in Space Research.* 2020. V. 66, N 6. P. 1415-1426.
12. https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/ (дата обращения 2020-09-22).
13. Sheiner O.A., Fridman V.M. On a method to forecast the registration time of a Coronal Mass Ejection with a coronagraph // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* 2019. V. 31, N 3. P. 379-388.
14. Способ краткосрочного прогноза времени регистрации явления коронального выброса массы (КВМ): пат. 2630535 Рос. Федерация: G01T 1/16 / Фридман В.М., Шейнер О.А.; заявитель и патентообладатель ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – N 2016100808; заявл. 12.01.2016.; опубл. 11.09.2017.
15. Fridman V.M., Sheiner O.A. Spectral-Temporal Peculiarities of the Microwave Emission Preceding Geoeffective Coronal Mass Ejections // *Geomagn. Aeron.* 2009. V. 49, N 8. P. 1133-1136.
16. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/solarradio.html> (дата обращения 2020-09-22).
17. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. 448 с.
18. Шейнер О.А., Фридман В.М. Явления в микроволновом солнечном излучении, наблюдаемые во время образования и начального распространения корональных выбросов массы // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика.* 2010. Т. 53, N 5-6. С. 311-328.
19. Дурасова М.С., Тихомиров Ю.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. Каталог явлений солнечной активности за 1998 г., предшествующих регистрации КВМ, по данным Мировой службы Солнца в радиодиапазоне // *Препринт НИРФИ № 483.* Нижний Новгород. 2003.
20. Дурасова М.С., Тихомиров Ю.В., Фридман В.М., Шейнер О.А. Каталог явлений солнечной активности, предшествующих регистрации КВМ, по данным Мировой службы Солнца в радиодиапазоне за 2003 г. // *Препринт НИРФИ № 496.* Нижний Новгород. 2004.