

УДК 533.951

МАГНИТНАЯ БУРЯ 25–26 АВГУСТА 2018: ДНЕВНЫЕ ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ И ПУЛЬСАЦИИ

© 2019 г. Н. Г. Клейменова^{1, 2, *}, Л. И. Громова^{3, **}, С. В. Громов³, Л. М. Мальшева¹¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия²Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: kleimen@ifz.ru

**e-mail: gromova@izmiran.ru

Поступила в редакцию 10.04.2019 г.

После доработки 26.04.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Рассмотрены особенности дневных высокоширотных геомагнитных возмущений и геомагнитных пульсаций во время недавней сильной магнитной бури 25–26 августа 2018 г., произошедшей в конце фазы спада 24-го цикла солнечной активности при очень низком уровне вспыхивающей активности Солнца. Как правило, в эту фазу цикла солнечной активности магнитные бури вызываются высокоскоростными потоками солнечного ветра из коронарных дыр, однако магнитные бури на спаде 24-го цикла были вызваны корональными выбросами массы (СМЕ). Показано, что, несмотря на очень слабые возмущения на Солнце и низкую скорость солнечного ветра, в августе 2018 г. в магнитосфере Земли произошла достаточно сильная магнитная буря ($Dst = -171$ нТл). Внезапное начало бури (SC) с незначительным (~ 25 нТл) скачком в Dst -индексе вызвало возбуждение достаточно интенсивных дневных геомагнитных пульсаций $ipcl$ на широтах возможного положения дневного полярного каспа. Особенностью восстановительной фазы этой бури было развитие магнитосферной суббури в глобальном масштабе, т.е. появление отрицательной магнитной бухты, зарегистрированной синхронно в авроральном ночном секторе и в полярных широтах дневного сектора. Рассмотрена возможная интерпретация.

DOI: 10.1134/S0016794019060075

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что наиболее сильные магнитные бури обычно происходят в начале фазы спада цикла солнечной активности (СА). Так происходило и в начале фазы спада 24-го цикла СА, когда в 2015–2017 гг. было зарегистрировано несколько больших магнитных бурь: 17–18 марта 2015 г. ($Dst = -223$ нТл), 22–23 июня 2015 г. ($Dst = -204$ нТл), 20–21 декабря 2015 г. ($Dst = -155$ нТл), 27–28 мая 2017 г. ($Dst = -125$ нТл), 07–08 сентября 2017 г. ($Dst = -124$ нТл). Последней в этом ряду стала большая магнитная буря 25–26 августа 2018 г. ($Dst = -171$ нТл). Все перечисленные бури были вызваны корональными выбросами массы (Coronal Mass Ejection – СМЕ), приходу которых к Земле предшествовала область сжатия (Sheath). Известно [например, Richardson et al., 2001; Denton et al., 2006; Borovsky and Denton, 2006], что СМЕ-бури типичны для фазы максимума СА. На фазе спада солнечной активности магнитные бури обычно вызываются не корональными выбросами массы, а быстрыми потоками солнечно-

го ветра из корональных дыр. За счет взаимодействия быстрого потока солнечного ветра с медленным образуется область сжатия (Corotating Interaction Region – CIR), подход которой к магнитосфере вызывает развитие рекуррентной магнитной бури [Tsurutani et al., 2006]. Именно такие бури типичны для спада цикла СА. Однако в 24 цикле этого не произошло, а наблюдалась ситуация, типичная для максимума цикла СА. Таким образом, развитие фазы спада 24-го цикла СА оказалось нетипичным, хотя и сопровождалось появлением нескольких больших бурь. Заметим, что магнитные бури, вызванные СМЕ и CIR, отличаются не только по своему происхождению, но и по характеру развития [например, Borovsky and Denton, 2006; Yermolaev et al., 2010]. Некоторые отличия имеются и в наблюдаемых на земной поверхности геомагнитных пульсациях $Pc5$ [Козырева и Клейменова, 2008, 2010]. Так, во время CIR-бурь наиболее интенсивные дневные $Pc5$ геомагнитные пульсации наблюдались преимущественно на геомагнитных широтах выше

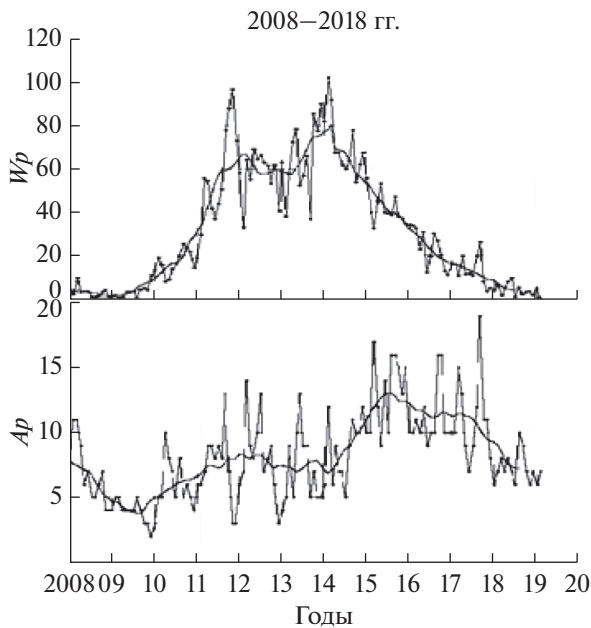


Рис. 1. Вариации солнечной (W_p) и планетарной геомагнитной (A_p) активности во время 24-го цикла солнечной активности.

70°, в то время как в CME-бурях – на широтах ниже 70°.

На рисунке 1 показан временной ход солнечной активности (индекс W_p) и геомагнитной активности (планетарный A_p -индекс) в течение 24-го цикла CA (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>). Хорошо видно значительное возрастание геомагнитной возмущенности на фоне быстрого спада CA, при этом каждый резкий выброс на графике магнитной активности (магнитная буря) соответствует всплескам солнечной активности. Наиболее сильной бурей по наземной геомагнитной возмущенности (A_p -индекс) в фазу спада 24-го цикла CA была магнитная буря 07–08 сентября 2017 г., хотя по величине Dst -индекса ($Dst = -124$), характеризующего интенсивность кольцевого тока, она занимает одно из последних мест в этой серии бурь. Линейной связи между величиной Dst -индекса отдельных бурь и уровнем геомагнитной активности (A_p -индекс) не наблюдается. Следовательно, геоэффективность магнитной бури не определяется величиной Dst -индекса.

На рисунке 1 видно, что после 2015 г. начался резкий спад CA, и к 2018 г. уровень солнечной активности стал близким к уровню предыдущего минимума 2008 г. Небольшой пик в ходе CA в первой половине 2018 г. не привел к развитию какой-либо магнитной бури и сопровождался лишь небольшими геомагнитными возмущениями по A_p . Однако относительно слабое возмущение на Солнце в августе 2018 г. неожиданно вызвало раз-

витие достаточно сильной ($Dst = -171$ нТл) магнитной бури 25–26 августа после прихода аномально геоэффективного коронального выброса вещества от сверхмалой, но длительной вспышки без значимого высокоскоростного потока солнечного ветра 20 августа 2018 г. Сформировавшийся в юго-восточном секторе видимого диска Солнца корональный выброс вещества может быть определен как slow-moving CME (<http://izmiran.ru/services/saf/archive/ru/2018/>).

Целью данной работы является исследование высокоширотных геомагнитных вариаций и пульсаций во время магнитной бури 25–26 августа 2018 г. На рисунке 2 приведены вариации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) по 1 мин данным базы OMNI (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), сверху вниз: вариации индекса $SymH$ (1-минутный аналог часового Dst -индекса интенсивности кольцевого тока магнитной бури), скорости, плотности и динамического давления солнечного ветра, а также V_y - и B_z -компонент ММП. Видно, что в предшествующие 5 дней космическая погода была очень спокойной, и скорость солнечного ветра постепенно уменьшалась от ~650 км 20 августа до ~350 км 24 августа.

Наши исследования основаны на анализе данных наземных магнитных наблюдений с 10 с-разрешением на скандинавском профиле IMAGE, состоящем из 44 станций, расположенных на геомагнитных широтах от 47° до 76° в интервале геомагнитных долгот 87°–115°. Геомагнитный полдень на этом профиле станций около 09 UT. Эти цифровые данные наблюдений доступны на сайте (<http://www.space.fmi.fi/IMAGE>), где приведены также полные названия станций, их международные коды, карта и географические и геомагнитные координаты. Ниже будут использоваться только международные коды станций и их геомагнитная широта с точностью до одного градуса.

2. НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА БУРИ

Согласно наземным наблюдениям магнитная буря началась около 08 UT 25 августа с появлением внезапного начала (SC), вызванного подходом к Земле резкого всплеска плотности солнечного ветра (с 5 до 20 см⁻³) и, соответственно, динамического давления с ~2 нПа до ~8 нПа (рис. 2, 3), величина скачка в $SymH$ -индексе была небольшой, около 25 нТл. Однако, поскольку SC наблюдалось на фоне северного ММП (положительная B_z -компонента), и этому предшествовал длительный (более 5-ти дней) очень спокойный период, значительных геомагнитных возмущений во время SC не наблюдалось, и ночных суббурь не отмечалось (AL -индекс был ~-100 нТл).

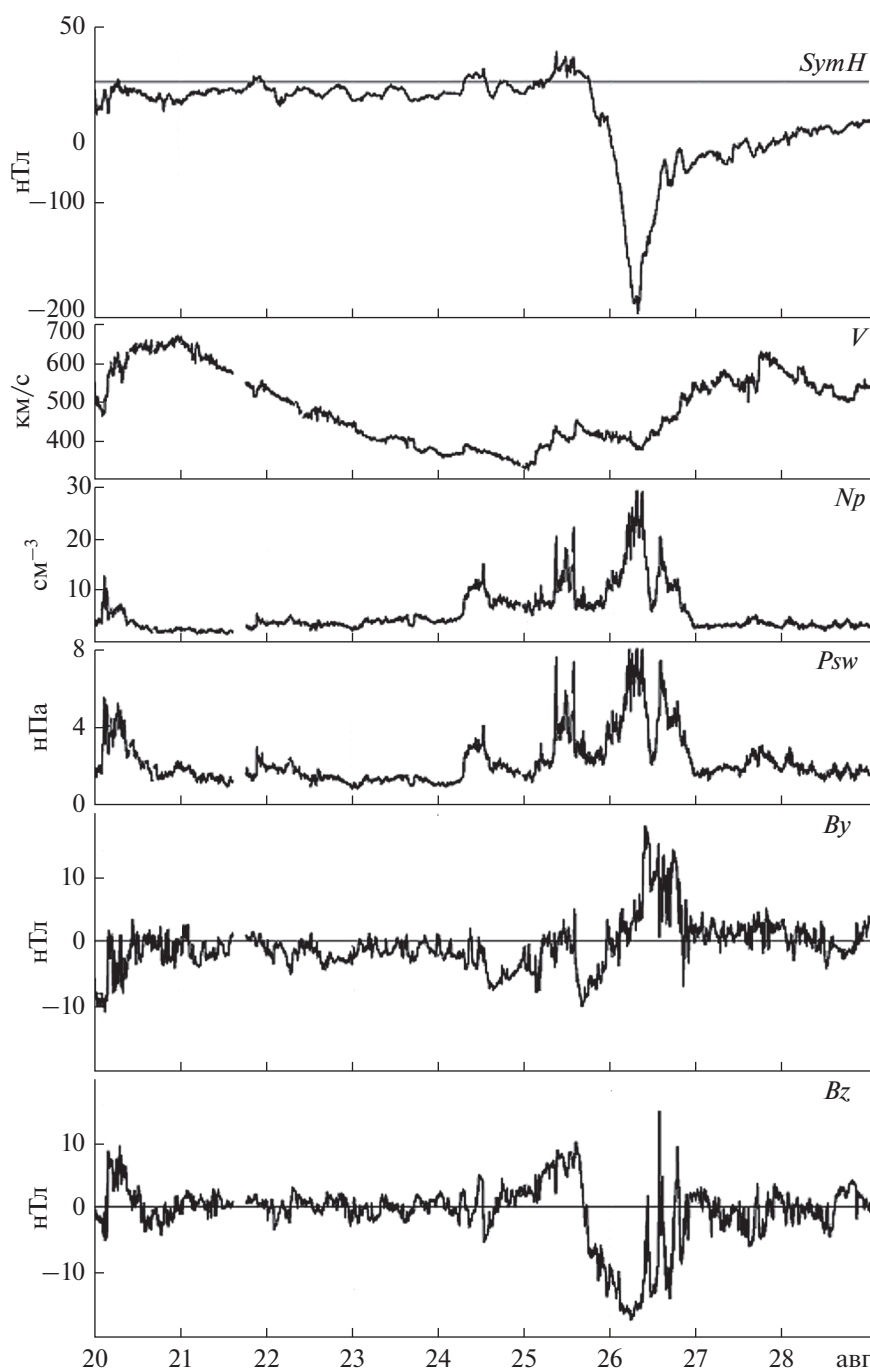


Рис. 2. Вариации параметров солнечного ветра и ММП во время бури 25–26 августа 2018 г. (подробности в тексте).

Однако в дневном полярном секторе на скандинавском меридиональном профиле магнитометров IMAGE были зарегистрированы всплески иррегулярных длиннопериодных геомагнитных пульсаций диапазона $Pc5-6$ (рис. 3) с амплитудой до ~ 100 нТл, появление которых явно было вызвано всплесками динамического давления солнечного ветра. Наибольшая амплитуда пульсаций наблюдалась на геомагнитных широтах выше 71° ,

их можно отнести к введенному В.А. Троицкой [Троицкая, 1977; Troitskaya, 1985] типу пульсаций *ipcl* (irregular pulsations at the cusp latitudes). В работах [Большакова и Троицкая, 1977; Troitskaya and Bolshakova, 1977] было установлено, что эти пульсации типичны для широт дневного полярного каспа.

На рисунке 3а показаны магнитограммы высокоширотных станций IMAGE и вариации ди-

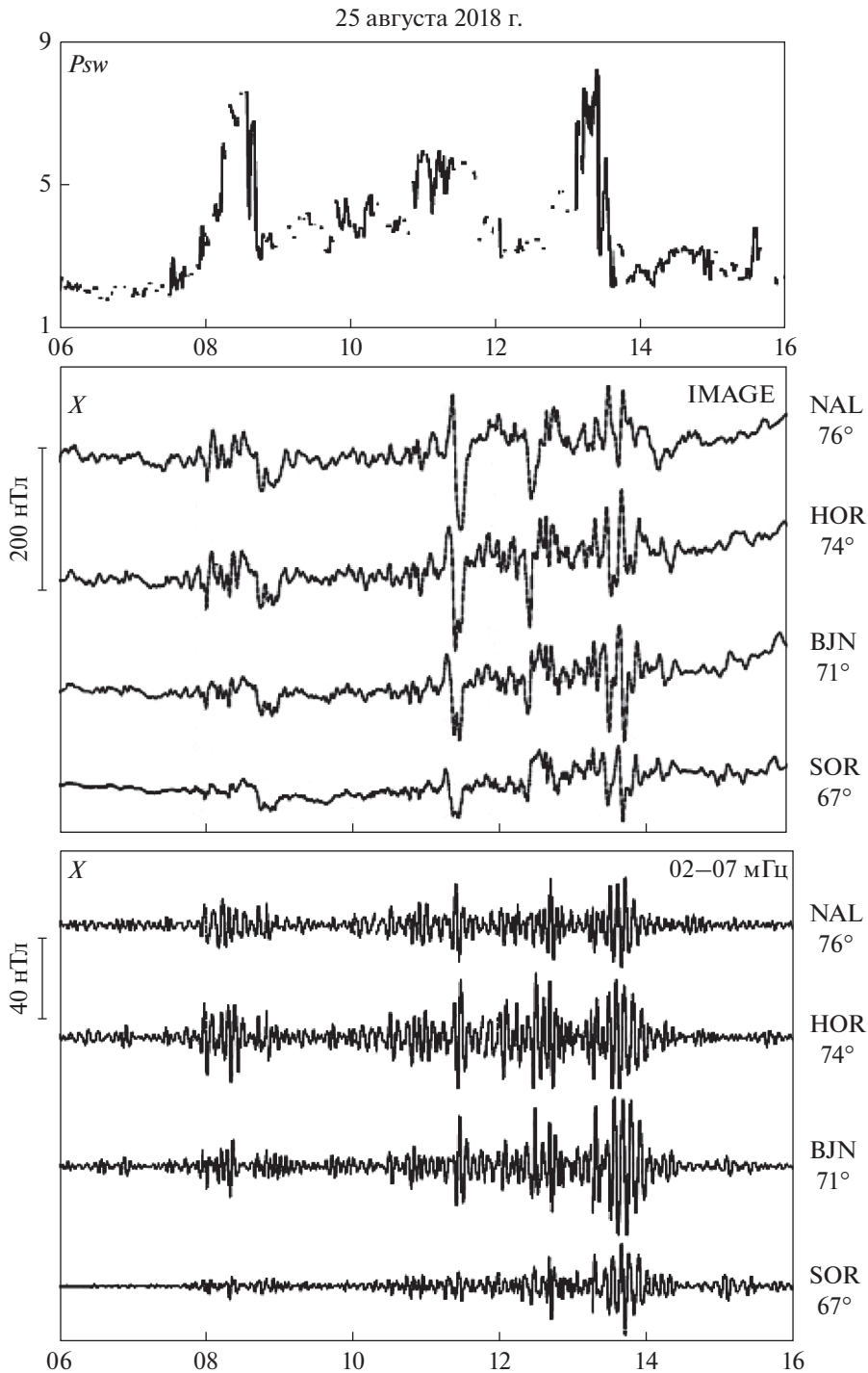


Рис. 3. Вариации динамического давления солнечного ветра (а); высокоширотные геомагнитные вариации (б) и $Pc5$ пульсации (в) в начальную фазу магнитной бури 25–26 августа 2018 г.

намического давления P_{sw} . Видно четкое совпадение начала всплеска $ipcl$ пульсаций с резким возрастанием динамического давления солнечного ветра. На рисунке 3б приведены данные этих магнитных наблюдений, отфильтрованные в более узкой частотной полосе, соответствующей

геомагнитным пульсациям $Pc5$ [Троицкая, 1977], т.е. в полосе 2–7 мГц. Пульсации в дополуночное время (до 09 UT) наблюдались только на высоких широтах (BJN – NAL, 71°–75° MLAT) на частоте около 3.0–3.3 мГц и, по-видимому, представляли собой тонкую структуру $ipcl$, в то время как после-

полуденные $Pc5$ отмечались в большом диапазоне широт с амплитудой, уменьшающейся с уменьшением геомагнитной широты. Всплеск $Pc5$ пульсаций с одинаковой формой наблюдался одновременно в большом диапазоне широт. Частота пульсаций была несколько меньше допуденных колебаний — порядка 2.2–2.5 мГц с характерным возрастанием фазы колебаний в направлении с юга на север. По морфологическим характеристикам эти пульсации можно отнести к хорошо известным резонансным колебаниям силовых линий геомагнитного поля.

Одновременно с высокоширотными $Pc5$ –6 пульсациями в более низких, авроральных широтах (SOD — IVA, 64°–66° MLAT) были зарегистрированы всплески геомагнитных пульсаций $Pc1$ на частоте около 1 Гц, генерация которых вызвана ионно-циклотронной неустойчивостью протонов кольцевого тока. Генерация $Pc1$ пульсаций во время внезапного начала магнитной бури — достаточно известный факт, например, [Пархомов, 1990, Kangas et al., 1998], однако в предшествующих бурях 2015 и 2017 гг. появление SC не сопровождалось геомагнитными пульсациями $Pc1$.

3. ГЛАВНАЯ ФАЗА БУРИ

Главная фаза бури началась 25 августа с поворотом ММП к югу около 15 UT, когда знак Bz -компоненты ММП изменился с положительного на отрицательный. Это привело к развитию суббурь в ночном секторе. С началом главной фазы магнитной бури генерация $Pc5$ геомагнитных пульсаций в дневном секторе практически прекратилась. Развитие суббуревых возмущений в ночном секторе соответствовало типичному сценарию главной фазы бури. Максимальная суббуревая активность с AL -индексом порядка -2000 нТл наблюдалась в максимуме магнитной бури в интервале 07:30–08:30 UT. В ночном секторе авроральных широт (SOD-IVA) на скандинавском меридиане IMAGE геомагнитные пульсации $Pc1$ сменились типичными для суббурь всплесками иррегулярных геомагнитных пульсаций $Pi1$ с шумовым спектром. В более низких широтах (NUR, MLAT = 57°) наблюдался всплеск геомагнитных пульсаций типа КУП (IPDP), свидетельствующий о вторжении энергичных электронов.

Значительных дневных геомагнитных возмущений в высоких широтах в это время не отмечалось, как и $Pc5$ геомагнитных пульсаций, что типично для главной фазы бури.

4. ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ ФАЗА БУРИ

Восстановительная фаза бури началась 26 августа около 09 UT (рис. 2) с поворотом ММП к северу (знак Bz -компоненты ММП стал положительным). Однако примерно через час знак

Bz -компоненты ММП изменился на отрицательный. Далее в течение этого дня Bz -компонента еще дважды меняла знак и становилась отрицательной в интервалы 10–13 UT, 14–17 UT и ~19–20 UT, что показано на рис. 4а. При этом Bu -компонента ММП оставалась положительной (рис. 2). Все три интервала отрицательных значений Bz ММП сопровождалось появлением суббурь, что четко проявляется в вариациях индекса авроральной активности AL (рис. 4б). Магнитные суббури в это время наблюдались не только в авроральной зоне, но регистрировались и на более высоких широтах. На рис. 4в показаны магнитограммы обсерваторий сети INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org/>): BRW (MLAT = 70°, геомагнитная полночь в 12 UT), находящейся в послеполуночном секторе, и YKC (MLAT = 69°, геомагнитная полночь в 09 UT), находящейся в утреннем секторе. В BRW видны три большие суббури, первая в местную полночь, вторая и третья — утром. В послеполуночном секторе Земли (скандинавский профиль IMAGE) после 09 UT (магнитный полдень) в приполярных широтах (HOR-NAL) в 10:30–13:30 UT было зарегистрировано большое бухтообразное возмущение с амплитудой ~–250 нТл (рис. 4г). Это время совпало с поворотом Bz -компоненты ММП к югу (отрицательные значения) и развитию ночных суббурь. На рисунке 4 видно, что появление дневной магнитной бухты в полярных широтах Скандинавии сопровождается большой отрицательной магнитной бухтой в антиподной области (вблизи местной магнитной полночи) в высокоширотной обсерватории BRW.

Подобная картина развития магнитосферных суббурь в глобальном масштабе, т.е. одновременное появление отрицательных магнитных бухт в ночном и дневном секторе, было характерно для всех трех интервалов появления южного ММП во время восстановительной фазы магнитной бури.

Начало восстановительной фазы бури сопровождалось также генерацией $Pc1$ геомагнитных пульсаций, наблюдаемых в дневном секторе авроральных широт на профиле IMAGE. Эти пульсации продолжались с 09 UT почти до 15 UT. Результаты этих наблюдения в виде цветных спектрограмм (динамических спектров) находятся на сайте обсерватории Соданкюля (<http://www.sgo.fi/>). Перевод цветных спектрограмм в черно-белый вариант приводит к большим искажениям в восприятии спектров волн, поэтому эти спектрограммы в данной работе не приводятся.

Таким образом, основной особенностью восстановительной фазы этой магнитной бури было появление глобальных суббурь, наблюдаемых одновременно в ночном секторе авроральных широт (64°–70° MLAT) и дневном секторе приполярных широт (выше 70° MLAT)

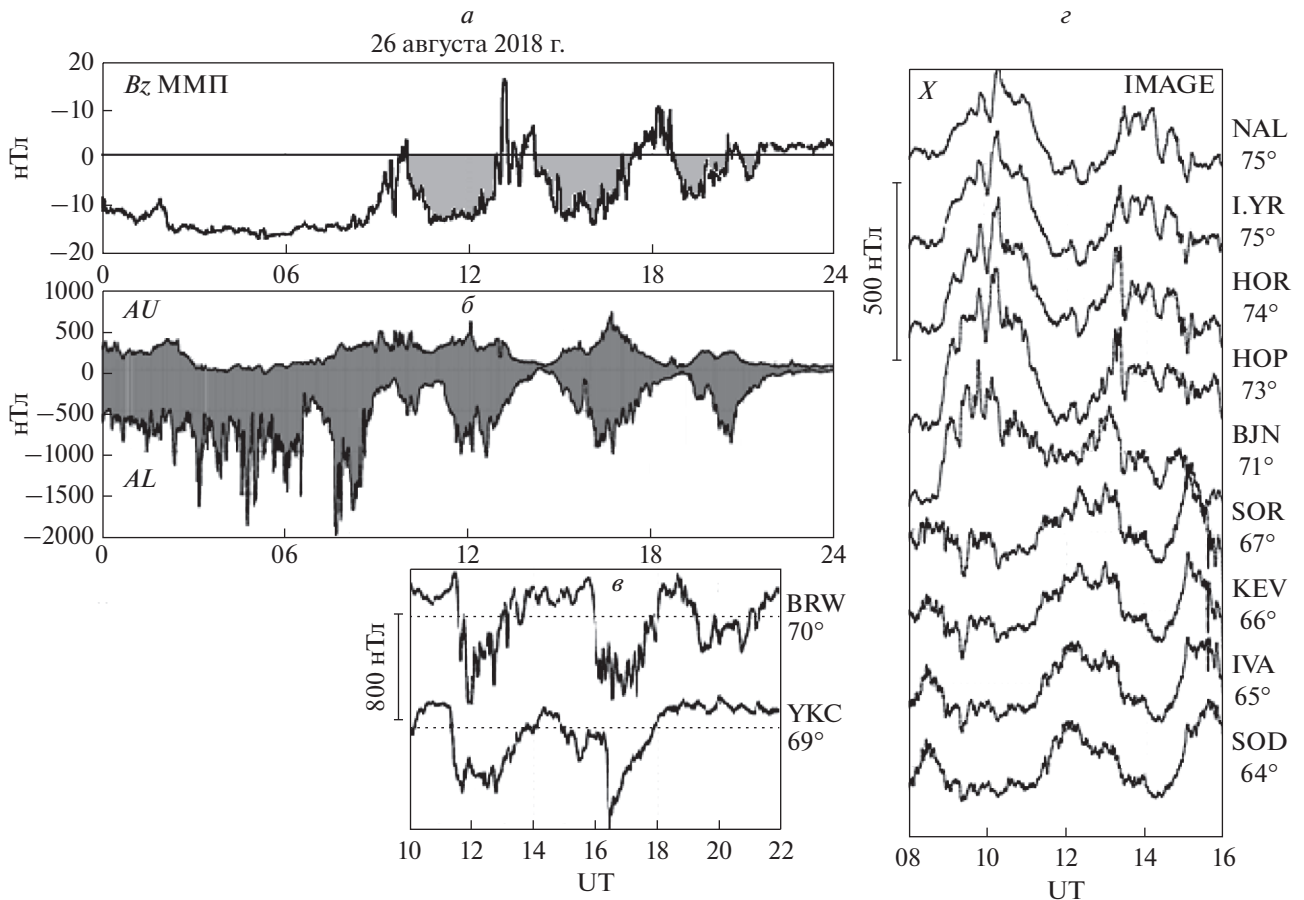


Рис. 4. Высокоширотные геомагнитные вариации в раннюю восстановительную фазу бури: (а) – вертикальная компонента ММП, (б) – вариации индексов авроральной суббуревой активности, (в) – магнитограммы станций BRW и YKC сети ИНТЕРМАГНЕТ, (г) – магнитограмма высокоширотных станций профиля IMAGE.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Обсуждаемая магнитная буря была вызвана очень незначительными возмущениями на Солнце, однако данные регистрации параметров солнечного ветра и ММП, приведенные на рис. 2, показывают, что триггером внезапного начала бури (SC) и ее начальной фазы является подход к магнитосфере Земли низкоскоростной области сжатия (Sheath) на переднем фронте межпланетного магнитного облака. Известно, что внезапное начало магнитной бури нередко сопровождается возбуждением всплесков дневных иррегулярных пульсаций *ipcl* [например, Schott et al., 1998; Клейменова и др., 2000; Козырева и Клейменова, 2008; Куражковская и Клайн, 2016], регистрируемых на земной поверхности на широтах предполагаемой проекции дневного полярного каспа. Это наблюдалось, например, и в начальную фазу большой магнитной бури 21–23 июня 2015 г. [Громова и др., 2016]. В работе [Piliipenko et al., 2015] показано, что максимум интенсивности *ipcl* пульсаций отмечается на несколько градусов южнее экваториальной границы каспа. По-видимо-

му, генерация *ipcl* пульсаций происходит в области входных слоев магнитосферы, где типичным является высокий уровень турбулентности и наличие различных волновых возмущений мультифрактальной структуры, как это обсуждалось в ряде работ, например, [Савин и др., 2001; Россоленко и др. 2008; Savin et al., 2014].

На рисунке 3 показано, что начальная фаза бури 25–26 августа 2018 г. сопровождалась всплесками геомагнитных пульсаций *ipcl*, наблюдаемыми на скандинавском меридиане как в дополуночное, так и в послеполуночное время в виде отдельных резких всплесков, генерация которых в работе [Большакова и Троицкая, 1982] связывается с импульсным пересоединением силовых линий геомагнитного и межпланетного полей.

Иррегулярные *ipcl* пульсации включали в себя также и более узкополосные *Pc5* колебания, генерация которых может быть связана с различными источниками как внутри магнитосферы, т.е. развитием резонансов магнитных оболочек, так и проникновением волн сжатия из солнечного ветра, как это обсуждалось, например, в работе [Kes-

sel, 2008]. В дополуночное время (08–09 UT) $Pc5$ пульсации наблюдались только на широтах выше 70° MLAT, поэтому, скорее всего, могут иметь вне магнитосферное происхождение или быть результатом фильтрации флюктуаций поля в низкоширотном погранслое или на внешней горловине каспа.

В послеполуночное время (13–14 UT) $Pc5$ пульсации регистрировались не только в полярных широтах, но и на широтах значительно ниже 70° MLAT (рис. 3). Фаза колебаний медленно возрастала с увеличением широты. Мы предполагаем, что эти $Pc5$ пульсации представляют собой резонансные колебания в магнитосфере, возбуждающиеся в замкнутой магнитосфере в области так называемого плазменного кольца [Antonova et al., 2013], окружающего Землю. Можно предположить, что полярная граница области возбуждения геомагнитных пульсаций $Pc5$ совпадает с полярной границей плазменного кольца, которая в околополуночном секторе может находиться вблизи магнитопаузы. Однако остается открытым вопрос, что конкретно явилось триггером всплеска $Pc5$ в 13–14 UT.

Восстановительная фаза бури характеризуется, как правило, прекращением ночных возмущений и возбуждением в утреннем и дневном секторах магнитосферы геомагнитных пульсаций типа $Pc5$ [Троицкая и др., 1965; Афанасьева и др., 1977; Posch et al., 2003; Клейменова и Козырева, 2007]. Однако в обсуждаемой магнитной буре интенсивных геомагнитных пульсаций $Pc5$ в раннюю восстановительную фазу не наблюдалось. Вероятно, это обусловлено неоднократным появлением больших (до -10 нТл) отрицательных значений B_z ММП (рис. 4а), что приводило к возникновению больших магнитосферных суббурь (рис. 4б, 4в), регистрируемых в ночном секторе Земли.

Важной особенностью этих суббурь было то, что они наблюдались не только в ночное и утреннее время в авроральных широтах, но и синхронно сопровождалась большими (порядка 250 нТл) отрицательными бухтообразными магнитными возмущениями в дневных полярных широтах (выше 70° MLAT). Время начала и конца ночных и дневных магнитных бухт совпадало (рис. 4в, 4г). Следовательно, суббури в эти интервалы имели глобальный характер. Можно предположить, что западная ионосферная электроструя затекала с утренней стороны далеко на запад в послеполуночный сектор. Такие суббури ранее детально не обсуждались в литературе и требуют дальнейших тщательных исследований.

6. ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности дневных высокоширотных геомагнитных возмущений и геомаг-

нитных пульсаций во время сильной ($Dst = -171$ нТл) магнитной бури 25–26 августа 2018 г., наблюдаемой в конце фазы спада 24-го цикла солнечной активности. Как правило, на фазе спада солнечного цикла генерация магнитных бурь вызывается высокоскоростными потоками солнечного ветра (так называемые CIR-бури). Однако на спаде 24-го цикла все сильнее магнитные бури были вызваны корональными выбросами массы (СМЕ). Причина этого не установлена. Также остается не ясно, почему обсуждаемая достаточно большая магнитная буря 25–26 августа 2018 г. была вызвана очень незначительными возмущениями на видимом диске Солнца при низкой скорости солнечного ветра (ниже ~ 400 км/с).

Показано, что, несмотря на незначительный скачок магнитного поля во время внезапного начала бури (SC), отличительной чертой этой бури, было возбуждение достаточно интенсивных дневных геомагнитных пульсаций $ipcl$ на широтах возможного положения дневного полярного каспа. Некоторые из этих колебаний сопровождалась генерацией резонансных геомагнитных пульсаций $Pc5$ в более низких, авроральных широтах.

Другая особенность этой магнитной бури состоит в том, что в раннюю восстановительную фазу бури не наблюдалось генерации геомагнитных пульсаций $Pc5$, типичных для этой фазы бури. Вероятно, это обусловлено неоднократным появлением больших (до -10 нТл) отрицательных значений B_z ММП, что приводило к развитию больших магнитосферных суббурь, наблюдаемых в глобальном масштабе. При этом отрицательные магнитные бухты были зарегистрированы синхронно в ночных авроральных широтах и в дневных полярных широтах. Насколько нам известно, такие глобальные суббури ранее в литературе детально не обсуждались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева Л.Т., Распопов О.М., Киселев Б.В. Пространственно-временные характеристики геомагнитных пульсаций типа $Pc5$ // Структура магнито-ионосферных и авроральных возмущений, Л.: Наука. С. 108–115. 1977.
- Большакова О.В., Троицкая В.А. Динамика дневного каспа по наблюдениям длиннопериодных геомагнитных пульсаций // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 17. № 6. С. 1076–1082. 1977.
- Большакова О.В., Троицкая В.А. Импульсное пересоединение как возможный источник пульсаций типа $ipcl$ // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 22. № 5. С. 877–879. 1982.
- Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Левитин А.Е., Громов С.В., Дремухина Л.А., Зелинский Н.Р. Дневные геомагнитные возмущения в высоких широтах во время сильной магнитной бури 21–23 июня 2015: Начальная фаза бури // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 56. № 3. С. 302–313. 2016.

- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Биттерли М., Шотт Ж.-Ж. Длиннопериодные (1–6 мГц) геомагнитные пульсации в начальную фазу большой магнитной бури 21 февраля 1994 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 40. № 4. С. 16–25. 2000.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Дневные квазипериодические геомагнитные колебания в восстановительную фазу сильной магнитной бури 15 мая 2005 г. // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 5. С. 616–623. 2007.
- Козырева О.В., Клейменова Н.Г. Оценка уровня дневной волновой геомагнитной активности во время магнитных бурь с помощью нового *ULF*-индекса // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 4. С. 511–519. 2008.
- Козырева О.В., Клейменова Н.Г. Вариации *ULF*-индекса дневных геомагнитных пульсаций во время рекуррентных магнитных бурь // Геомагнетизм и Аэрномия. Т. 50. № 6. С. 799–809. 2010.
- Куражковская Н.А., Клайн Б.И. Геомагнитные импульсы (MIEs) и импульсы внезапных начал магнитных бурь (SSCs) в высокоширотной магнитосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 1. С. 33–45. 2016.
- Пархомов В.А. Осцилляционная структура предварительного импульса внезапного начала бури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. С. 210–215. 1990.
- Россоленко С.С., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И. и др. Турбулентные флуктуации параметров плазмы и магнитного поля в магнитослое и формирование низкоширотного погранслоя: многоспутниковые наблюдения 2 марта 1996 г. // Космич. исслед. Т. 46. № 5. С. 387–397. 2008.
- Савин С.П., Зеленый Л.М., Романов С.А. и др. Турбулентный пограничный слой на границе геомагнитной ловушки // Письма в ЖЭТФ. Т. 74. № 11. С. 620–624. 2001.
- Савин С.П., Амата Э., Будаев В.П. и др. О нелинейных каскадах и резонансах во внешней магнитосфере // Письма в ЖЭТФ. Т. 99. № 1. С. 19–24. 2014.
- Троицкая В.А., Мельникова М.В., Большакова О.В., Рокитянская Д.А., Булатова Г.А. Тонкая структура магнитных бурь // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 6. С. 82–86. 1965.
- Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 1. С. 70–72. 1977.
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Vovchenko V.V. et al. Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances ~ 7 – $10 R_E$, and magnetospheric current systems // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 99. № 7. P. 85–91. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.08.013>
- Borovsky J.E., Denton M.H. Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms // J. Geophys. Res. V. 111. A07S08. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011447>
- Denton M.H., Borovsky J.E., Skoug R.M., Thomsen M.F., Lavraud B., Henderson M.G., McPherron R.L., Zhang J.C., Liemohn M.W. Geomagnetic storms driven by ICME- and CIR- dominated solar wind // J. Geophys. Res. V. 111. A07S07. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011436>
- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and physics of short-period magnetic pulsations // Space Sci. Rev. V. 83. P. 435–512. 1998.
- Kessel R.L. Solar wind excitation of *Pc5* fluctuations in the magnetosphere and on the ground // J. Geophys. Res. V. 113. A04202. 2008
<https://doi.org/10.1029/2007JA012255>
- Pilipenko V., Belakhovsky V., Engebretson M.J., Kozlovsky A., Yeoman T. Are dayside long-period pulsations related to the cusp? // Ann. Geophys. V. 33. P. 1–10. 2015.
<https://doi.org/10.5194/angeo-33-1-2015>
- Posch J.L., Engebretson M.J., Pilipenko V.A., Hughes W.J., Russel C.T., Lanzerotti L.J. Characterizing the long-period ULF response to magnetic storms // J. Geophys. Res. V. 108(A1). P.1029. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009386>
- Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V. Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000 // Geophys. Res. Lett. V. 28. P. 2569–2573. 2001.
- Schott J., Kleimenova N.G., Bitterly J., Kozyreva O.V. The strong *Pc5* geomagnetic pulsations in the great magnetic storm of March 24, 1991 // Earth Planets Space. V. 50. P. 101–106. 1998.
- Troitskaya V.A., Bolshakova O.V. Diurnal latitude variation of the location of the dayside cusp // Planet. Space Sci. V. 25. P. 1167–1169. 1977.
- Troitskaya V.A. ULF wave investigations in the dayside cusp // Adv. Space Res. V. 5. № 4. P. 219–228. 1985.
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Gonzalez A.L.C. et al., Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review // J. Geophys. Res. V. 111. A07S01. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011273>
- Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Specific interplanetary conditions for CIR-, Sheath-, and ICME-induced geomagnetic storms obtained by double superposed epoch analysis // Ann. Geophys. V. 28. № 12. P. 2177–2186. 2010.