

УДК 523.31.853:523.62.726

## ПОЛЯРНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И АВРОРАЛЬНЫЕ СУББУРИ В МАГНИТНУЮ БУРЮ 20 АПРЕЛЯ 2020 г.

© 2022 г. Л. И. Громова<sup>1</sup>, \*, Н. Г. Клейменова<sup>2</sup>, И. В. Дэспирак<sup>3</sup>,  
С. В. Громов<sup>1</sup>, А. А. Любчик<sup>3</sup>, Л. М. Мальшева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова  
Российской академии наук”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
“Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

\*E-mail: gromova@izmiran.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

После доработки 15.08.2022 г.

Принята к публикации 22.08.2022 г.

Исследованы высокоширотные геомагнитные возмущения ( $MLAT > 70^\circ$ ) во время магнитной бури 20 апреля 2020 г. — первой бури нового солнечного цикла. Основываясь на наблюдениях наземных магнитометров глобальных сетей SuperMAG, INTERMAGNET и IMAGE, показана высокая геоэффективность бури несмотря на низкую скорость магнитного облака, ее вызвавшую. В высоких широтах обнаружены вихри геомагнитного поля, свидетельствующие о локальной интенсификации продольных токов.

DOI: 10.31857/S0367676522120110

### ВВЕДЕНИЕ

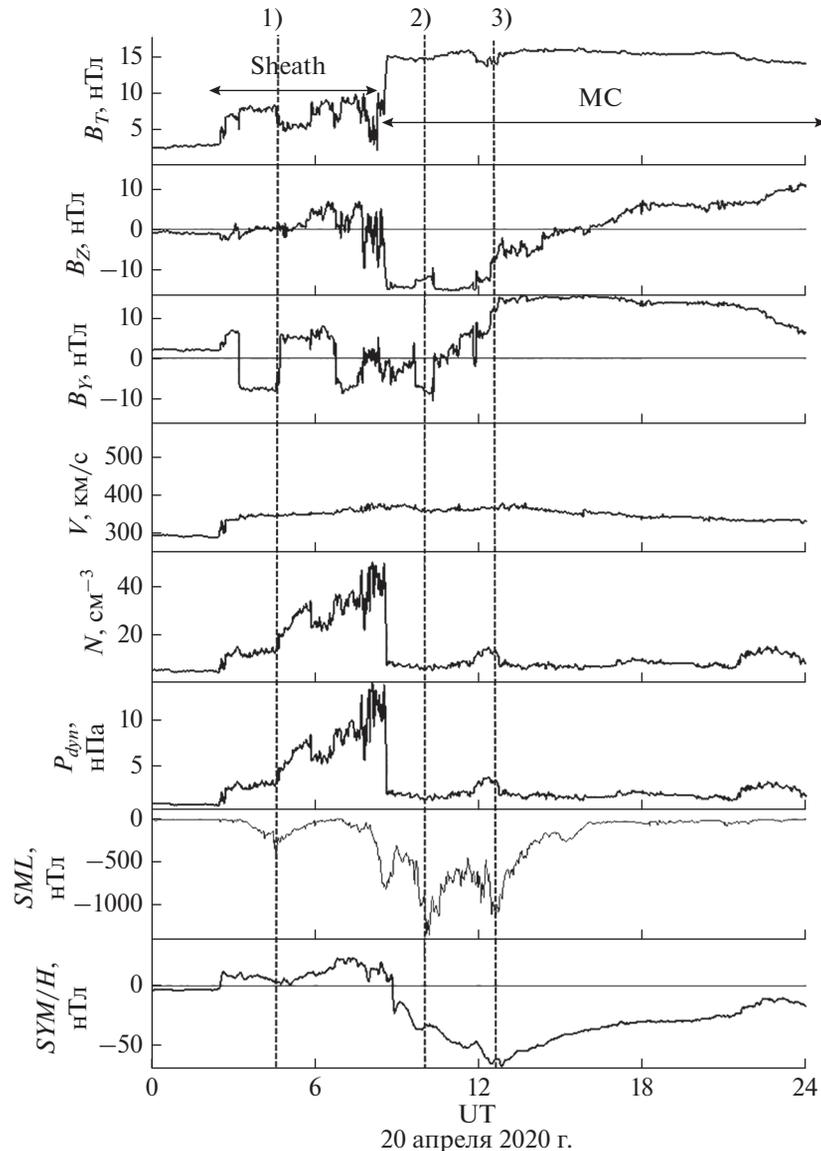
Новый, 25-й цикл солнечной активности, начался в январе 2020 г. [1]. Первой магнитной бурей этого цикла была умеренная буря 20 апреля 2020, вызванная приходом к орбите Земли медленного магнитного облака (magnetic cloud, MC), источником которой был корональный выброс массы (Coronal Mass Ejection, CME). Начальная скорость рассматриваемого CME около Солнца оценивалась в  $\sim 330$  км/с. Особенности возмущений на Солнце, вызвавшие CME и эту бурю, подробно обсуждены в работах [2, 3].

Вариации параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра 20 апреля 2020 г., приведенные на рис. 1, показывают низкую скорость солнечного ветра и большие значения напряженности ММП. На рис. 1 видно, что подошедшее магнитное облако характеризовалось значительной амплитудой вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля южного направления ( $B_z$  ММП достигало  $-15$  нТл), наблюдавшаяся в течение около 4 ч. По-видимому, это и привело к развитию в магнитосфере Земли умеренной магнитной бури с минимальным значением  $SUM/H \sim -70$  нТл.

Обычно геоэффективность медленных магнитных облаков невелика [4], они не вызывают интенсивных бурь, поэтому и неудивительно, что магнитная буря 20 апреля 2020 г. была небольшой.

Изучению интенсивных магнитных бурь, вызванных быстрыми магнитными облаками, посвящено множество работ, например, [5–8], магнитным бурям, связанным с медленными магнитными облаками, — лишь незначительное число публикаций, например, [9], их высокоширотные геомагнитные эффекты практически не исследовались. Низкая, практически не изменяющаяся во время бури, скорость солнечного ветра ( $\sim 350$ – $400$  км/с) позволяет, с одной стороны, выявить геомагнитные возмущения, не связанные со скоростью солнечного ветра, а, с другой стороны, рассмотреть влияние на них компонент ММП.

Целью данной работы было исследование высокоширотных геомагнитных возмущений во время обсуждаемой магнитной бури для выявления их особенностей в условиях медленного солнечного ветра. Работа была основана на анализе данных наблюдений наземных магнитометров глобальных сетей SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>), INTERMAGNET (<https://www.intermag-net.org/>) и IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>).



**Рис. 1.** Космическая погода 20 апреля 2020 года. Вариации параметров: полного межпланетного магнитного поля (ММП)  $B_T$ ,  $B_Z$  и  $B_Y$ -компонент ММП, скорости  $V$ , плотности  $N$  и динамического давления  $P_{dyn}$  солнечного ветра, а также  $SYM/H$ -индекса геомагнитной активности, и  $SML$ -индекса суббуревой активности. Горизонтальными линиями со стрелками обозначены границы крупномасштабных потоков солнечного ветра: области сжатия (SHEATH) и магнитного облака (MC).

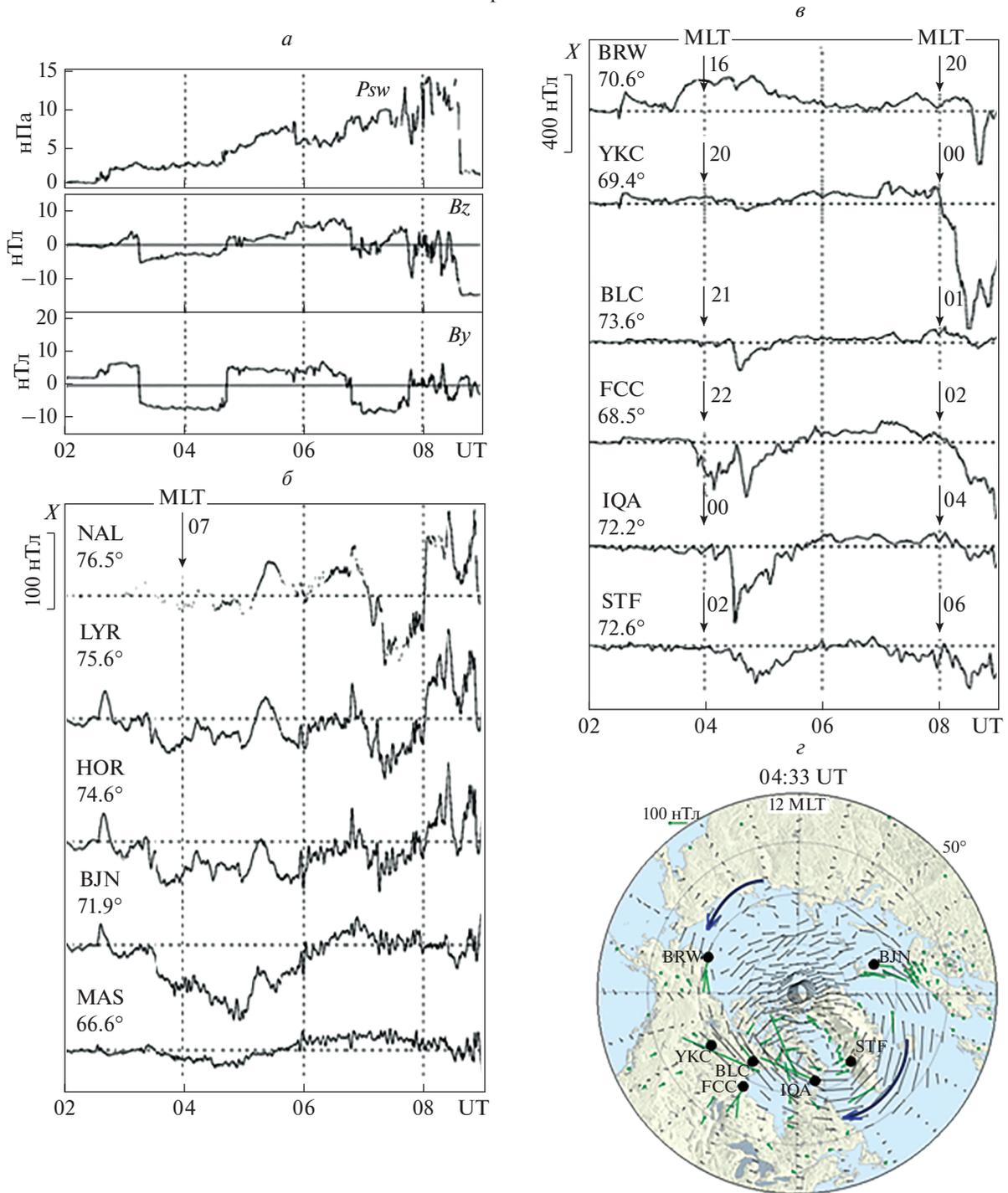
### НАЧАЛЬНАЯ ФАЗА МАГНИТНОЙ БУРИ

Начальная фаза магнитной бури является результатом реакции магнитосферы на подход к ней плотной плазмы передней оболочки магнитного облака (SHEATH), передний фронт которой подошел к Земле 20 апреля 2020 г. при небольших знакопеременных значениях  $B_Z$ -компоненты ММП, и при небольшом динамическом давлении солнечного ветра ( $< 2$  нПа), обусловленном как малой плотностью ( $N < 5$  см $^{-3}$ ), так и небольшой скоростью ( $V < 300$  км/с) солнечного ветра (см. рис. 1). Магнитопауза была удалена от Земли на расстояние  $\sim 13$  Re (по оценке согласно формулам работы [10]).

Во время начальной фазы бури  $B_Z$ - и  $B_Y$ -компоненты ММП варьировались от +5 до  $-5$  нТл и от +6 до  $-7$  нТл соответственно. При практически постоянной скорости солнечного ветра ( $V \sim 350$  км/с) значительно выросла плотность (от 5 до 50 см $^{-3}$ ) и давление солнечного ветра (от 1.5 до 15 нПа). Усиление динамического давления солнечного ветра привело к поджатию магнитосферы, в результате которого магнитопауза значительно, до 7–8 Re, приблизилась к Земле.

На рис. 2а видно, что во время начальной фазы бури наблюдалось два «корытообразных» интервала (в 03:10–04:40 UT и 06:45–07:45 UT) с устойчивыми и почти не изменяющимися отрицательными

20 апреля 2020 г.



**Рис. 2.** Межпланетные параметры и вариации геомагнитного поля в интервале 02–09 UT, в начальную фазу бури: динамическое давление солнечного ветра ( $P_{dyn}$ ),  $B_z$ ,  $B_y$ -компоненты ММП (а); вариации геомагнитного поля на станциях профиля IMAGE, находящихся в утренне-дневном секторе высоких широт (б) и на высокоширотных станциях американского сектора по данным ([https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/plot\\_realtime/quick/202004/](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/plot_realtime/quick/202004/)), находящихся в ночном секторе (в); мгновенная (в 04:33 UT – максимум суббури) карта пространственного распределения магнитных векторов по данным SuperMAG (г); вектора магнитного поля повернуты на 90° по часовой стрелке, чтобы они совпали с направлением ионосферного тока.

ными значениями  $B_y$  ММП  $\sim -(7-8 \text{ нТл})$ . На высокоширотных (выше  $71^\circ$  геомагнитной широты, в дальнейшем – MLAT) станциях скандинавской цепочки IMAGE (рис. 2б), в эти интервалы видны, как и в  $B_y$ -компоненте ММП, небольшие отрицательные бухтообразные магнитные возмущения, т.е. формировался полярный эдектроджет западного направления [11]. При этом первая бухта была более интенсивна на станциях NOR и LYR, а вторая – на более высокоширотных станциях LYR и NAL (рис. 2б). Заметим, что во втором случае динамическое давление солнечного ветра было почти вдвое больше, чем в первом. Следовательно, перемещение второй бухты на более высокие широты может быть результатом расширения дневного полярного каспа с ростом динамического давления солнечного ветра.

Из-за небольшой скорости и плотности солнечного ветра на переднем фронте SHEATH, скачок динамического давления и амплитуда внезапного начала магнитной бури (SSC в 02:31 UT) были незначительными, однако наблюдались при слабых отрицательных значениях  $B_z$  ММП. Это привело к последующему развитию небольшой магнитосферной суббури с максимумом около 04:30 UT, что видно на вариациях  $SML$ -индекса на рис. 1. Магнитограммы станций, находящихся в это время в ночном секторе, представлены на рис. 2в, а карта мгновенного распределения магнитных векторов по данным SuperMAG, на которых показано положение этих станций, – на рис. 2г. Согласно [12] на таких картах вектора магнитного поля даются повернутыми на  $90^\circ$  по часовой стрелке, чтобы они совпадали с направлением ионосферного тока, и по ним можно охарактеризовать глобальное пространственное распределение ионосферного электроджета. В момент максимума суббури на карте видно наличие двух крупномасштабных вихрей магнитного поля с центрами в послеполуночном и послеполуденном секторах.

Перед началом главной фазы бури, в конце SHEATH (в интервале  $\sim 08-09$  UT) на фоне больших значений динамического давления солнечного ветра (до  $\sim 15 \text{ нПа}$ ) в магнитосфере наблюдалось развитие магнитной суббури, вызванной кратковременным экскурсом  $B_z$  ММП от положительных ( $\sim +5 \text{ нТл}$ ) к отрицательным ( $\sim -10 \text{ нТл}$ ) значениям. Детали этой суббури не будут обсуждаться в данной работе ввиду сложного влияния на ее развитие резко изменившихся условий в межпланетной среде на границе между SHEATH и магнитным облаком.

### ГЛАВНАЯ ФАЗА МАГНИТНОЙ БУРИ

Главная фаза бури начинается с момента смены знака  $B_z$  и знака  $Dst$ -вариации (или ее минутного аналога  $SYM/H$ ) с положительного на отри-

цательный. На рис. 1 видно, что это произошло около 09 UT после резкого поворота  $B_z$  ММП к югу и такого же резкого возрастания полного магнитного поля ( $B_T$  ММП), а также и падения плотности ( $N$ ) и, соответственно, динамического давления солнечного ветра ( $P_{dyn}$ ), свидетельствующих о приходе к магнитосфере Земли тела коронального выброса массы – магнитного облака, следующего за областью плотной турбулентной плазмы – SHEATH.

В главную фазу этой магнитной бури наблюдались две очень сильные суббури ( $S1$  и  $S2$  на рис. 3б) с амплитудой в максимумах (т.е., около 10:00 и 12:30 UT) 1300 и 1100 нТл. Карты пространственного распределения электроджетов в это время по данным глобальной наземной сети магнитометров SuperMAG приведены на рис. 3а.

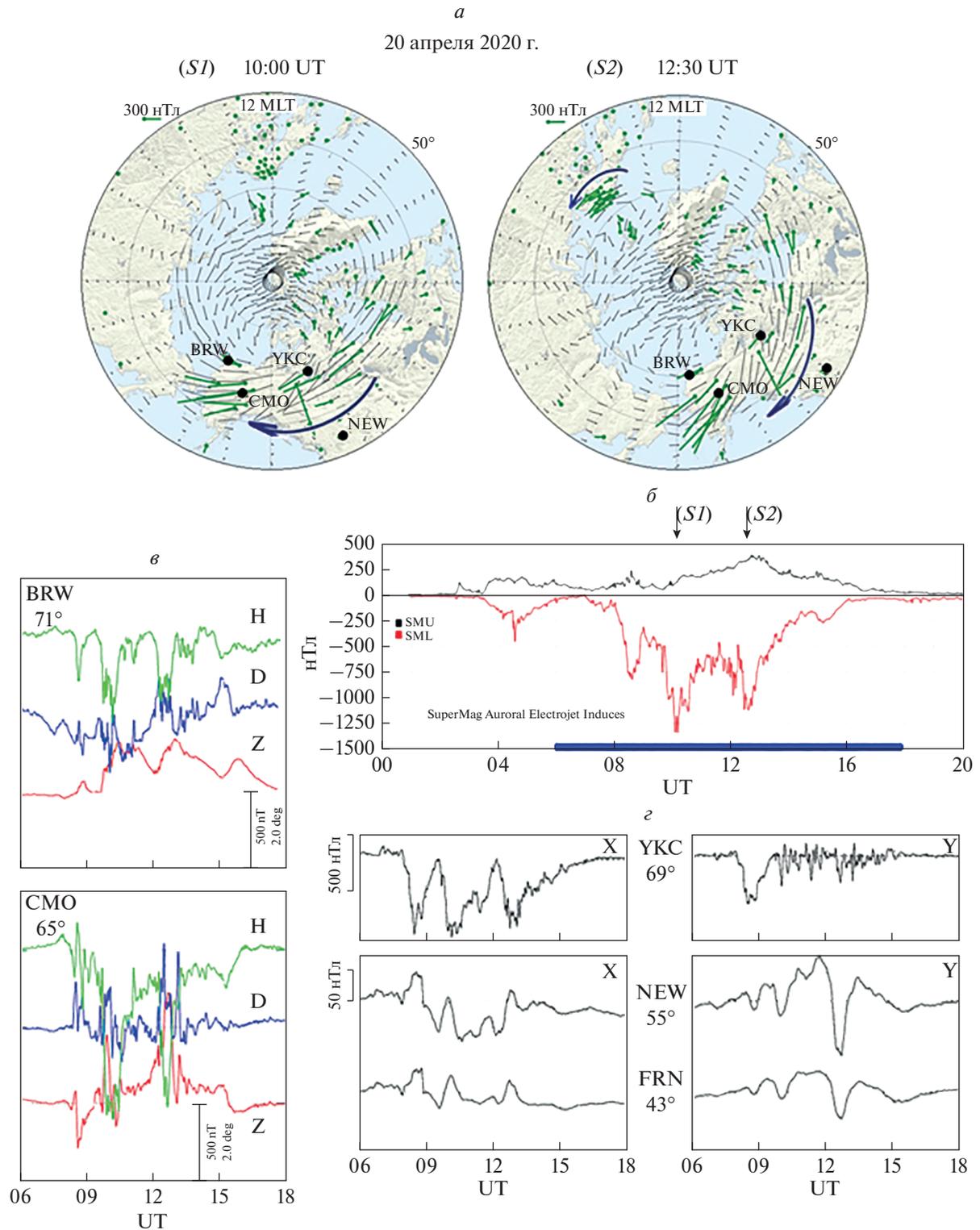
На картах видно, что ионосферный ток в первую суббурю наблюдался с вечерних ( $\sim 21 \text{ MLT}$ ) до ранних утренних ( $\sim 06 \text{ MLT}$ ) часов, а второй суббури – с полуночи до почти 08 MLT. Из магнитограмм на рис. 3в видно, что в обоих событиях центр электроджета наблюдался в околополуночном секторе на широтах ниже  $65^\circ \text{ MLAT}$  (положительные отклонения  $Z$ -компоненты магнитного поля в BRW и в СМО, рис. 3е).

Для исследования возможных среднеширотных эффектов этих суббурь были сопоставлены данные наблюдений на ст. Yellowknife (YKC,  $69^\circ \text{ MLAT}$ ) с данными наблюдений на ст. Newport (NEW,  $55^\circ \text{ MLAT}$ ) и Fresno (FRN,  $43^\circ \text{ MLAT}$ ), расположенными вблизи геомагнитного меридиана YKC (рис. 3а).

Магнитограммы этих трех станций, построенные относительно спокойного уровня данной станции, приведены на рис. 3г. Спокойный уровень выбирался для каждого дня каждой станции как вариация соответствующей компоненты магнитного поля в спокойный день, ближайший к рассматриваемой дате. Четко видно, что обе суббури, показанные на рис. 3б, сопровождалась положительными магнитными бухтами в  $X$ -компоненте магнитного поля в средних широтах. Большие значения  $Y$ -компоненты поля в NEW и FRN во время последней суббури свидетельствуют о том, что эти станции находились на значительном азимутальном расстоянии от меридиана развития суббури, т.е. в долготной области, где отрицательные отклонения  $X$ -компоненты магнитного поля максимальны, а  $Y$ -компонента переходит через нулевую отметку.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Во время начальной фазы бури 20 апреля 2020 г. высокоширотные бухтообразные возмущения наблюдались на профиле IMAGE в утренне-дневном секторе полярных широт (выше  $70^\circ \text{ MLAT}$ ) и



**Рис. 3.** Характеристики суббурь в главной фазе бури: мгновенные карты пространственного распределения магнитных векторов по данным SuperMAG в максимумах суббурь (*a*); вектора магнитного поля повернуты на 90° по часовой стрелке, чтобы они совпали с направлением ионосферного тока; вариации SML-индекса (*б*); вертикальные стрелки отмечают время максимумов суббурь, синяя горизонтальная линия показывает временной интервал (06–08 UT), соответствующий магнитограммам (*в*) и (*г*); магнитограммы *H*-, *D*-, *Z*-компонент геомагнитного поля станций BRW и CMO (*в*) и вариации *X*- и *Y*-компонент магнитного поля высокоширотной станции YKC и среднеширотных станций NEW и FRN (*г*).

контролировались знаком  $B_y$ -компоненты ММП, что согласуется с полученными ранее результатами (см. например [13]).

В главную фазу этой магнитной бури наблюдалось развитие двух достаточно интенсивных (более 1000 нТл) магнитосферных суббурь, первая из которых, практически не повлияла на развитие кольцевого тока (вариации  $SYM/H$ -индекса). Это ставит под сомнение популярную в 60-е годы [14] гипотезу о том, что именно суббури являются источником заметного понижения  $SYM/H$ . Сомнения в правильности этой гипотезы высказывались и ранее в ряде работ, например, [15–17]. Более того, в работах [18–21] рассматривались магнитные бури, в главную фазу которых вообще не было суббурь. Следуя результатам работы [17], можно сделать вывод, что нет четкой связи между развитием суббурь и усилением кольцевого тока в главную фазу магнитной бури. Оба эти явления имеют общую причину – южное направление ММП ( $B_z$  ММП  $< 0$ ), но пока еще не известно, как разделить следствия этих явлений. Однако не следует полностью исключать влияние суббурь на динамику кольцевого тока, поскольку, как показано, например, в работе [23] интенсификация кольцевого тока может определяться комбинацией крупномасштабных электрических полей конвекции и мелкомасштабных импульсных источников, связанных с развитием суббурь.

Следует отметить, что согласно вариациям  $SML$ -индекса (рис. 1) вторая суббуря наблюдалась вблизи минимума  $SYM/H$ , после чего оба явления (буря и суббуря) стали затухать синхронно с уменьшением отрицательных значений  $B_z$  ММП. Это свидетельствует о том, что интенсивность обоих явлений контролируется  $B_z$  ММП.

Представленные на рис. 3а карты пространственного распределения ионосферных электроджетов в максимумах первой и второй рассматриваемых суббурь позволяют отнести ионосферные токи в максимуме первой суббури к одновихревой эквивалентной токовой системе  $DP1$  с центром вихря около полуночи на широтах порядка  $70^\circ$  MLAT. Ионосферные токи в максимуме второй суббури можно рассматривать как двух-вихревую токовую систему  $DP2$ , когда в авроральных широтах развивается одновременно два крупномасштабных вихря – в ранее-утреннем секторе (западный электроджет) и в послеполуночном секторе (восточный электроджет). Детальное представление о развитии таких одно- и двух-вихревых токовых систем приведено, например, в работах [23, 24].

В утренне-дневном секторе высоких широт были выявлены локальные вихревые структуры геомагнитного поля. Они могут быть интерпретированы как индикаторы локальной интенсификации продольных электрических токов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первая умеренная магнитная буря 20 апреля 2020 г. нового цикла солнечной активности, несмотря на низкую скорость солнечного ветра, привела к развитию в магнитосфере Земли значительной геомагнитной активности.

В начальную фазу бури впервые обнаружено развитие двух высокоширотных вихрей магнитного поля с центрами в послеполуночном и послеполуночном секторах, свидетельствующих о локальном усилении продольных токов на фоне практически не меняющейся низкой скорости солнечного ветра. Это позволяет предположить, что интенсификация локальных продольных токов не зависит от скорости солнечного ветра.

В главную фазу бури, при прохождении “тела” магнитного облака с большим значением модуля ММП при неизменно низкой скорости солнечного ветра наблюдались две интенсивные (более 1000 нТл) магнитосферные суббури, по-видимому, вызванные появлением больших амплитуд вертикальной компоненты ММП южного направления.

Показано, что обе суббури сопровождалась положительными магнитными бухтами в средних широтах, что может свидетельствует о развитии токового клина.

Авторы выражают благодарность создателям баз данных OMNI, IMAGE, INTERMAGNET и SuperMAG, МЦД в Киото, а также каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра за возможность использования их в работе.

Работа Громовой Л.И., Клейменово Н.Г., Дэспирак И.В., Любича А.А. выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Национального научного фонда Болгарии № 20-55-18003; работа Громова С.В. выполнена в рамках темы государственного задания ИЗМИРАН; работа Малышевой Л.М. – в рамках темы государственного задания ИФЗ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ишков В.Н. // Астрон. журнал. 2022. Т. 99. № 1. С. 54; Ishkov V.N. // Astronomy Rep. 2022. V. 66. No. 1. P. 48.
2. Davies E.E., Möstl C., Owens M.J. et al. // A&A. 2021. V. 656. Art. No. A2.
3. O’Kane J., Green L.M., Davies E.E. et al. // A&A. 2021. V. 656. Art. No. L6.
4. Richardson I.G., Cane H.V. // J. Space Weather Space Clim. 2012. V. 2. Art. № A01.
5. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F. et al. // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. No. 1. P. 73.
6. Echer E., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T. et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. No. A5. Art. No. A05221.

7. *Kashcheyev A., Migoya-Oru  Y., Amory Mazaudier C. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 2018. V. 123. P. 5000.
8. *Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В. др.* // Геомагн. и аэроном. 2021. Т. 61. № 4. С. 457; *Kliemenova N.G., Gromova L.I., Gromov S.V. et al.* // Геомагн. Аeron. 2021. V. 61. No. 4. P. 520.
9. *Nitta N.V., Mulligan T., Kilpua E.K.* // Space Sci. Rev. 2021. V. 217. Art. No. 82.
10. *Кузнецов С.Н., Суворова А.В., Дмитриев А.В.* // Геомагн. и аэроном. 1998. Т. 38. № 6. С. 7.
11. *Gromova L.I., Förster M., Feldstein Y.I. et al.* // Ann. Geophys. 2018. V. 36. P. 1361.
12. *Gjerloev J.W.* // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. Art. No. A09213.
13. *Громова Л.И., Клейменова Н.Г., Левитин А.Е. и др.* // Геомагн. и аэроном. 2016. Т. 56. № 3. С. 302; *Gromova L.I., Kliemenova N.G., Levitin A.E. et al.* // Геомагн. Аeron. 2016. V. 56. No. 3. P. 281.
14. *Akasofu S-I.* // Front. Astron. Space Sci. 2020. V. 7. Art. No. 604755.
15. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* // J. Geophys. Res. 1975. V. 80. P. 4204.
16. *Iyemori T., Rao D.R.K.* // Ann. Geophys. 1996. V. 14. No. 6. P. 608.
17. *Maltsev Y.P.* // Proc. XXVI Ann. Sem. "Physics of Auroral Phenomena". (Apatity, 2003). P. 33.
18. *Мальков М.В., Сергеев В.А.* // Геомагн. и аэроном. 1991. Т. 31. С. 722.
19. *Yahnin A.G., Malkov M.V., Sergeev V.A. et al.* // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 4039.
20. *Sergeev V.A., Pellinen R.J., Pulkkinen T.I.* // Space Sci. Rev. 1996. V. 75. P. 551.
21. *Золотухина Н.А., Полех Н.М., Рахматулин Р.А., Харченко И.П.* // Геомагн. и аэроном. 1999. Т. 39. № 1. С. 47.
22. *Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., Fritz T.* // Ann. Geophys. 2005. V. 23. P. 579.
23. *Troshichev O.A., Kuznetsov V.M., Pudovkin M.I.* // Planet. Space Sci. 1974. V. 22. P. 1403.
24. *Clauer C.R., McPherron R.L.* // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. No. 19. P. 2811.

## Polar geomagnetic disturbances and auroral substorms in the magnetic storm on April 20, 2020

**L. I. Gromova<sup>a, \*</sup>, N. G. Kleimenova<sup>b</sup>, I. V. Despirak<sup>c</sup>, S. V. Gromov<sup>a</sup>,  
A. A. Lubchich<sup>c</sup>, L. M. Malysheva<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Moscow, 108840 Russia*

<sup>b</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, 123995 Russia*

<sup>c</sup>*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: gromova@izmiran.ru*

The high-latitude geomagnetic disturbances (MLAT > 70°) during the first magnetic storm of the new solar cycle on April 20, 2020 were studied. Basing on the measurements of the ground-based magnetometers of the SuperMAG, Internmaget, IMAGE global networks, it was shown that the geoeffectiveness of the storm was rather high despite the low speed of the magnetic cloud caused the storm. The high-latitude vortices of the geomagnetic field were found that could indicate the local intensification of the field-aligned currents.