

УДК 523.31-853:523.62.726

ДОЛГОТНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ СУПЕРСУББУРЬ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 9 МАРТА 2012 г.

© 2021 г. И. В. Дэспирак^{1, *}, А. А. Любич¹, Н. Г. Клейменова²,
Л. И. Громова³, С. В. Громов³, Л. М. Малышева²

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Троицк, Россия

*E-mail: despirak@gmail.com

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

На основе глобальных геомагнитных данных (планетарных сетей SuperMAG, INTERMAGNET и скандинавского профиля IMAGE) детально исследованы пространственные особенности двух очень интенсивных суббурь (суперсуббурь) во время магнитной бури 9 марта 2012 г. Обнаружено, что суперсуббури развивались в глобальном по долготе масштабе — от предполуночного, через ночной и утренний, до дневного сектора.

DOI: 10.31857/S0367676521030108

ВВЕДЕНИЕ

Недавно были начаты исследования очень интенсивных суббурь, т.е. сильных магнитных возмущений с амплитудой больше 1500 нТл, так называемых “суперсуббурь” (supersubstorms – SSS) [1]. В первых работах, которые были выполнены по данным глобальной сети наземных магнитометров SuperMAG, SSS определялись как события с очень низкими значениями SML — индекса геомагнитной активности ($SML < -2500$ нТл) [1, 2, 3]. В дальнейшем были исследованы различные аспекты космической погоды, при которых могут появляться SSS. Было показано, что SSS наблюдаются при южном направлении межпланетного магнитного поля (ММП) и часто связаны со скачками плотности и импульсами давления в солнечном ветре [1, 2]. Анализ появления SSS в зависимости от крупномасштабных типов солнечного ветра для 23 и 24 циклов солнечной активности показал, что их появление связано с определенными потоками солнечного ветра, а именно, с межпланетными корональными выбросами массы [4]. Как известно, наиболее распространенной классификацией потоков солнечного ветра является их разделение на квазистационарные высокоскоростные потоки из корональных дыр, спорадические потоки, связанные с коро-

нальными выбросами массы (СМЕ — coronal mass ejections) и медленный солнечный ветер (SLOW — slow solar wind) [5, 6]. В работе [4] была использована классификация типов солнечного ветра, которая представлена в каталоге [6]. Гистограммы распределения SSS по разным типам солнечного ветра для периода с 1998 по 2016 годы показаны на рис. 1 (взят из работы [4]). Как видно из рис. 1, появление SSS связано с магнитными облаками (MC) и областями сжатой плазмы перед ними (SHEATH), т.е. с теми же структурами солнечного ветра, которые обычно вызывают магнитные бури [7]. Логично было бы предположить, что такие интенсивные суббури — суперсуббури — наблюдаются во время очень интенсивных геомагнитных бурь, так называемых “супербурь”. Однако было показано, что суперсуббури не всегда связаны с очень интенсивными бурями, а могут наблюдаться во время менее интенсивных ($-100 \text{ нТл} \geq D_{st} > -250 \text{ нТл}$) и умеренных ($-50 \text{ нТл} \geq D_{st} > -100 \text{ нТл}$) магнитных бурь, и даже в небуревых условиях ($D_{st} > -50 \text{ нТл}$) [1, 4].

Недавно были проведены исследования распределения авроральных возмущений во время SSS, которые показали особенное развитие сияний, отличающееся от классической схемы [8]: в ночном секторе не наблюдался брейкап, не было

развития авроральной выпуклости, но интенсивные сияния были зарегистрированы в предполуденном и утреннем секторах MLT [9]. Кроме того, разное развитие авроральной выпуклости во время бурь и во время обычных условий, в зависимости от изменяющихся условий в солнечном ветре, отмечалось ранее в работах с использованием данных спутника Polar. Это проявлялось, в том числе, и в разных соотношениях широтного и долготного размеров авроральной выпуклости [10–12]. В работе [13] было показано, что в магнитовозмущенных условиях западный электроджет может регистрироваться в большом интервале долгот от вечернего до предполуденного сектора, т.е. от ~ 17 MLT до ~ 11 MLT. Недавно был проведен анализ долготного распределения западного электроджета во время суперсуббурь, наблюдавшихся на фоне развития двух сильных магнитных бурь ($D_{st} \sim -150$ нТл) 7–8 сентября 2017 г. и было показано, что западный электроджет во время SSS развивался в глобальном масштабе по долготе — от вечернего сектора, через ночной, до дневного сектора [14]. В этой работе авторы проанализировали только два события, следовательно, необходимо проверить, так ли это для SSS во время других бурь. Была выбрана сильная магнитная буря 9 марта 2012 года ($D_{st} \sim -140$ нТл), которая была вызвана магнитным облаком в солнечном ветре [15].

Целью нашей работы является анализ долготного пространственного распределения геомагнитных возмущений во время двух случаев SSS, наблюдавшихся на фоне развития этой бури, по данным глобальных сетей магнитометров SuperMAG, INTERMAGNET, скандинавского профиля IMAGE и спутников AMPERE.

ДАННЫЕ

Работа основана на анализе наземных наблюдений на глобальных сетях магнитометров проекта SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>) [16], INTERMAGNET (<https://www.intermagnet.org/>) [17] и на меридиональной сети станций скандинавского профиля IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) [18]. Суперсуббури определялись с помощью геомагнитного индекса SML ($SML \leq -2200$ нТл). Отметим, что в более ранних работах был использован более жесткий критерий отбора SSS ($SML < -2500$ нТл) [1], однако, это значение было выбрано произвольно [2]. На наш взгляд, события с $SML \leq -2200$ нТл являются достаточно интенсивными суббуриями и могут быть отнесены к суперсуббуриям. В отличие от известного AL -индекса, SML -индекс рассчитывается по глобальной сети магнитометров SuperMAG, которая, кроме авроральных станций включает в себя также информацию многих других наземных станций, расположенных как в более низких, так и в более высоких широтах [16].

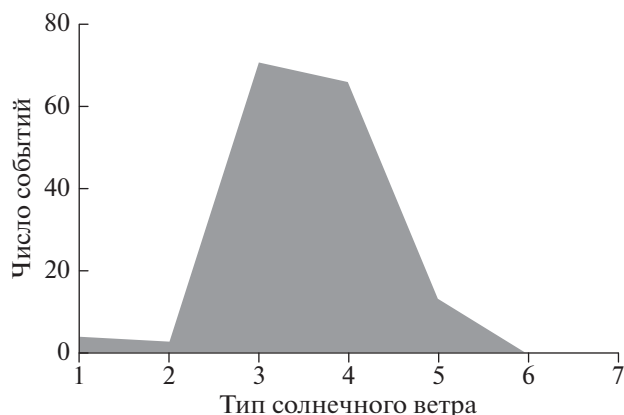


Рис. 1. Гистограммы распределения суперсуббурь по разным типам солнечного ветра. По вертикальной оси — число событий, по горизонтальной — типы солнечного ветра согласно [6]: 1 — CIR, 2 — FAST, 3 — SHEATH, 4 — MC, 5 — EJECTA, 6 — SLOW, 7 — без потоков (рисунок взят из работы [4]).

Глобальное пространственное распределение западного электроджета во время SSS определялось по картам векторов магнитного поля, полученных по наземным наблюдениям магнитометров сети SuperMAG, а также по картам распределения магнитных векторов возмущений и их сферического гармонического анализа в ионосфере (на высоте 680 км), полученных по данным спутников связи Iridium системы AMPERE (Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment, <http://ampere.jhuapl.edu>). Проект AMPERE включает одновременную регистрацию магнитного поля на 66 спутниках, находящихся на 12 меридиональных профилях [19, 20]. Карты строятся за каждые 2 мин с осреднением в 10 мин. Магнитные вектора на картах AMPERE представлены в явном виде, в отличие от SuperMAG карт, где они повернуты на 90° , для того чтобы показать направление электрических токов. Условия в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле (ММП) перед началом SSS определялись с помощью базы данных CDAWeb OMNI (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Межпланетные условия во время магнитной бури 9 марта 2012 года

Буря 9 марта 2012 года является частью события 7–17 марта, во время которого произошло несколько последовательных магнитных бурь [15]. Эти бури были вызваны сложным комплексом явлений в солнечном ветре: приходом к Земле межпланетных корональных выбросов массы с ударными волнами, а также высокоскоростного потока, которые следовали друг за другом и частично

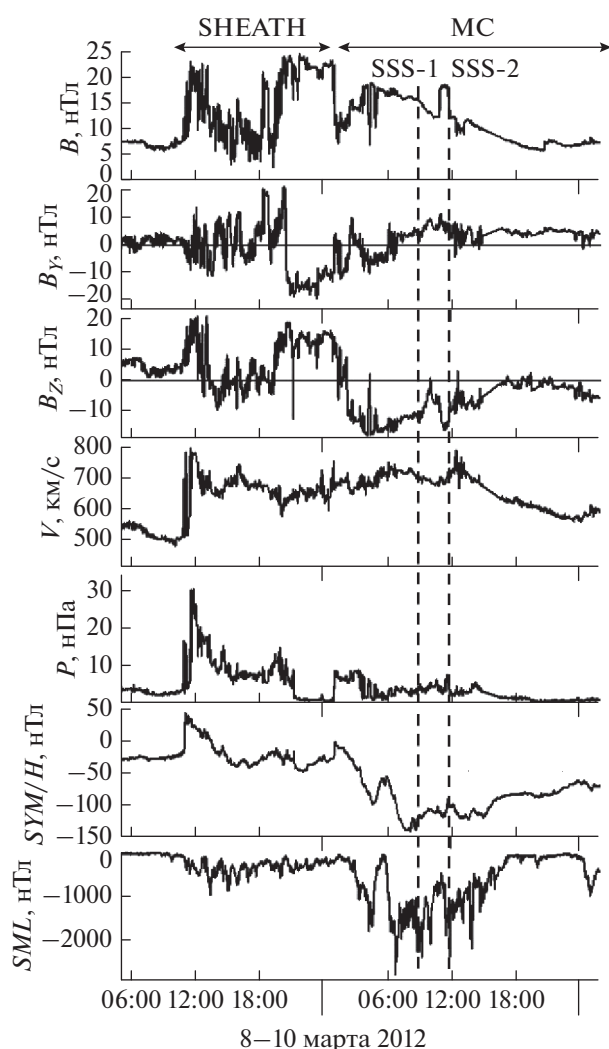


Рис. 2. Параметры солнечного ветра и ММП, геомагнитные индексы с 05 UT 8 марта по 02 UT 10 марта 2012. Сверху вниз: магнитуа магнитного поля B , B_y и B_z -компоненты ММП, скорость и динамическое давление солнечного ветра, геомагнитные индексы SYM/H и SML . Границы магнитного облака (MC), и области сжатой плазмы SHEATH обозначены горизонтальными стрелками, моменты наблюдения SSS-1 и SSS-2 — вертикальными штриховыми линиями.

перекрывались [15]. В нашей работе мы будем рассматривать только наиболее сильную из них — магнитную бурю 9 марта 2012 года ($D_{st} \sim -140$ нТл), которая была связана с магнитным облаком (MC). На рис. 2 представлены данные о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) за период с 05 UT 8 марта по 02 UT 10 марта 2012 г. Границы магнитного облака (MC) и области сжатой плазмы (SHEATH) перед ним обозначены горизонтальными стрелками вверху рисунка. Видно, что в начале MC наблюдалось усиление южной компоненты ММП (-14 нТл), которое происходило на фоне высокой скорости солнечного ветра (700–750 км/с), что и привело к

развитию магнитной бури, пик интенсивности которой ($SYM/H \sim -140$ нТл) был зарегистрирован в $\sim 08:00$ UT 9 марта.

На нижнем графике рис. 2 показаны вариации SML-индекса, которые представляют интегрированные по широте вариации интенсивности западного электроджета. Видно, что на главной фазе магнитной бури, в $\sim 06–16$ UT 9 марта, наблюдалось резкое возрастание западного электроджета в виде последовательности суббурь, причем часто фаза развития одной суббури происходила на восстановительной фазе предыдущей, что привело к сложной картине возмущений, из которой трудно выделить отдельные суббури. На рис. 2 видны, по крайней мере, 4 минимума в SML-индексе: ~ -2800 , ~ -2500 , ~ -2370 и ~ -2200 нТл, соответствующие развитию четырех SSS. В данной работе будут рассмотрены две из них, в 09:19 UT (SSS-1) и в 11:57 UT (SSS-2), во время которых американские станции были расположены в ночном и раннем утреннем секторах, а станции меридиональной цепочки IMAGE — в околополуночном секторе. На рис. 2 эти события отмечены вертикальными штриховыми линиями и обозначены как SSS-1 и SSS-2; оба события наблюдались во время MC, на фазе восстановления бури, близко к минимуму SYM/H индекса. Ниже мы рассмотрим пространственное поведение магнитных возмущений во время SSS-1 и SSS-2.

Глобальное развитие западного электроджета

Для исследования глобального пространственного распределения магнитных возмущений на земной поверхности во время развития SSS-1 и SSS-2 были использованы карты магнитных векторов сети SuperMAG (рис. 3а) с указанием положения некоторых наземных станций сети INTERMAGNET и IMAGE, магнитограммы которых показаны далее на рис. 4. Карты, представленные на рис. 3а, были построены для минимумов SSS-1 и SSS-2, при этом магнитные вектора повернуты на 90 градусов по часовой стрелке, чтобы они совпадали с направлением ионосферного тока. Как видно из рис. 3, в обоих событиях авроральный электроджет наблюдался практически в глобальном масштабе с наибольшей интенсивностью в послеполуночном секторе, где располагались станции американского сектора. В то же время видно, что западный электроджет продолжался и на дневную сторону, но со значительно меньшей (в $\sim 5–6$ раз) интенсивностью. При этом в ночном секторе геомагнитные возмущения наблюдались в большом интервале широт — от авроральных до полярных, а в утреннем (Гренландия) и дневном (Скандинавия) секторах геомагнитная активность переместилась в более высокие, полярные широты.

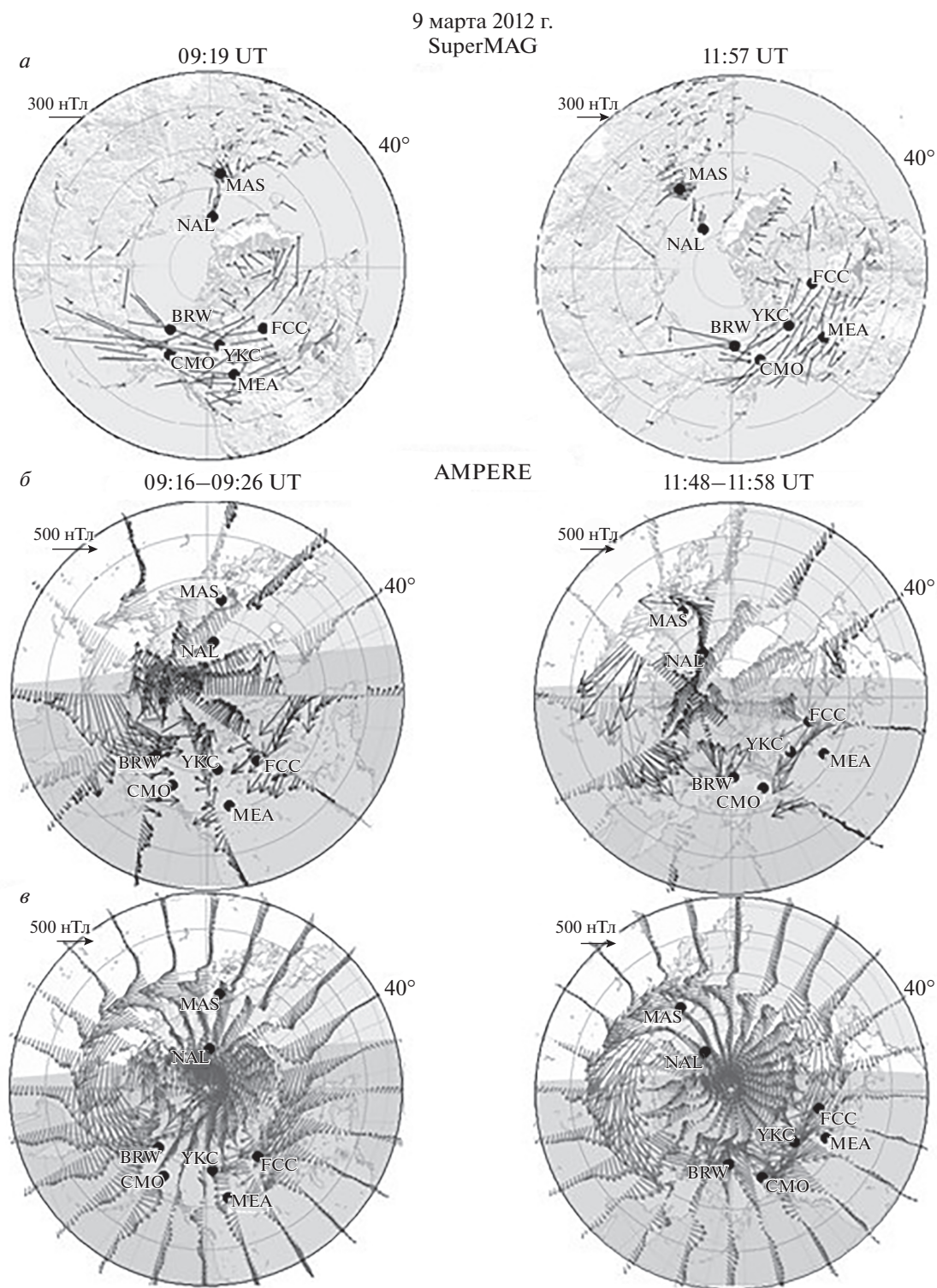


Рис. 3. Карты магнитных возмущений для SSS-1(слева) и SSS-2 (справа) в исправленных геомагнитных координатах: мгновенные (09:19 UT и 11:57 UT) карты магнитных векторов, полученные по наземным магнитометрам сети SuperMAG с указанием наземных станций (черные точки) (а); карты магнитных векторов на высоте спутников AMPERE за два временных интервала 09:16–09:26 UT (слева) и 11:48–11:58 UT (справа) (б); результаты сферического гармонического анализа возмущений, представленных на рис. 3б (в). На картах полночь находится внизу рисунка, полдень — вверху.

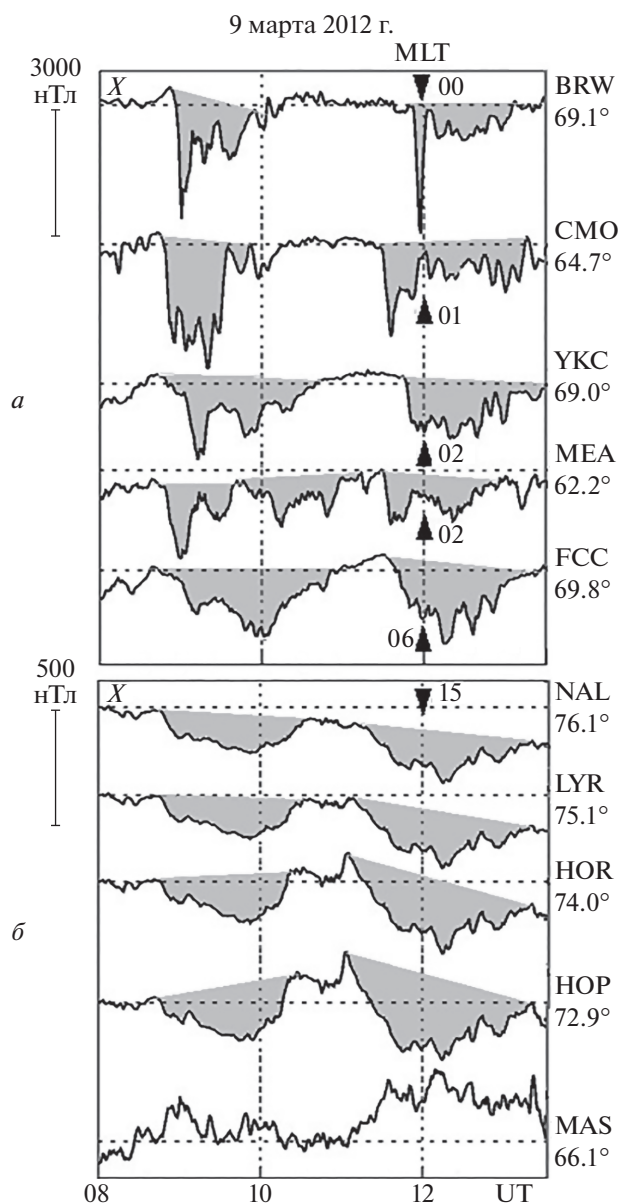


Рис. 4. Вариации X-компоненты магнитного поля наземных магнитных станций с 08 по 13:30 UT 9 марта 2012: а) по сети INTERMAGNET; б) по сети IMAGE. Рядом с названием станций приведены их геомагнитные координаты (CGLAT).

Следует заметить, что на земной поверхности из-за очень редкой сети магнитных станций и нерегулярных наблюдений на огромной территории Сибири нет данных о развитии геомагнитных возмущений в большой области долгот от околополуденных до вечерних часов для SSS-1 и от послеполуденных до полуночных часов для SSS-2. Кроме того, отсутствуют данные о геомагнитных возмущениях в большом диапазоне широт утреннего сектора, где расположены Тихий и Атлантический океаны. Таким образом, по наземным наблюдени-

ям не получается построить полную картину глобального распределения магнитных возмущений.

Чтобы дополнить картину глобального распределения магнитных возмущений, мы использовали данные магнитных наблюдений в ионосфере на высоте 680 км на спутниках AMPERE. На рис. 3б показаны осредненные за 10 мин карты горизонтальных магнитных векторов возмущений, измеренных магнитометрами, установленными на каждом из одновременно работающих 66 спутников [19, 20]. Основание каждой стрелки (вектора) на картах соответствует положению спутника, на котором проводились измерения. Детальное описание методики получения этих данных приведено на сайте <http://ampere.jhuapl.edu>. На рис. 3в приведены результаты их сферического гармонического анализа для интервалов, близких к минимумам SSS-1 и SSS-2. Эти карты AMPERE свидетельствуют о развитии западного электроджета в глобальном масштабе от околополуденных до околополуденных часов местного времени и подтверждают результаты, полученные по картам наземных наблюдений SuperMAG (рис. 3а). В послеполуденном секторе геомагнитные возмущения отмечаются в авроральных широтах, а в утреннем и дневном секторах — в полярных. Отметим, что неожиданной особенностью ионосферных токов во время SSS было развитие интенсивного восточного электроджета в раннем вечернем секторе (~17–20 MLT), что четко видно на картах AMPERE (рис. 3б и 3в) над восточной Сибирью, где нет наземных геомагнитных наблюдений.

Развитие магнитных возмущений

На рис. 4 показаны магнитные возмущения с 08:00 по 13:30 UT 9 марта 2012, зарегистрированные на наземных магнитометрах INTERMAGNET и IMAGE: рис. 4а — для станций Северной Америки (BRW, CMO, YKC, MEA, FCC), расположенных в авроральной зоне (от ~62.2° до ~69.8° CGLAT), рис. 4б — для станций Скандинавии (MAS, HOP, HOR, LYR, NAL), находящихся в авроральной зоне и в полярных широтах (от ~66.1° до 76.1° CGLAT). На американских станциях, находящихся в авроральной зоне, в полуночном и послеполуденном секторах MLT видны сильные вариации магнитного поля (~2500 нТл) около моментов регистрации SSS-1 и SSS-2 (~09:00 UT, ~11:50 UT). Таким образом, наиболее сильные геомагнитные возмущения были сосредоточены в ночном и послеполуденном секторах, на геомагнитных широтах авроральной зоны. Однако, как видно из рис. 4б, одновременно на скандинавских станциях в дневном и послеполуденном секторах MLT наблюдались небольшие магнитные возмущения (~200 нТл). На нижней панели рис. 4б представлена для сравнения магнитограм-

ма станции MAS, которая расположена в авроральной зоне ($\sim 66.1^\circ$ CGLAT) и видно, что на ней вместо отрицательных магнитных бухт наблюдаются небольшие положительные возмущения (восточный электроджет). Следовательно, в дневном секторе западный электроджет наблюдался только в полярных широтах и его интенсивность была значительно ниже, чем в ночном секторе.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При исследованиях SSS событий важным вопросом является вопрос о том, имеют ли SSS все признаки классических суббурь или являются просто интенсификациями западного тока? В нашей работе мы называем такие явления “суперсуббурями” (supersubstorms – SSS) вслед за предыдущими исследователями [1–3]. В этих работах авторы суббурей называют любую отрицательную магнитную бухту (т.е. усиление западной струи). Это оправданно для случаев SSS, поскольку: а) не всегда могут быть данные о сияниях (метеоусловия); б) то, что типично для изолированных суббурь (предварительная фаза и т.д.), в последовательных суббурях, когда начало одной происходит на фазе восстановления или даже развития предыдущей (а именно такими является подавляющее большинство SSS), как правило не наблюдается.

Надо отметить так же, что недавно было показано [9], что во время SSS наблюдается нетипичное развитие сияний – отсутствуют предварительная фаза суббури и брейкап сияний на ночной стороне. Но эти исследования были выполнены всего для двух событий SSS. Также имеются работы (например, [14]), где рассмотрены особенности развития электроджета во время единичных случаев SSS. Таким образом, вопрос о том, все ли SSS являются суббурями в классическом понимании, пока остается нерешенным.

Наш анализ двух событий SSS 9 марта 2012 года показал, что западный электроджет наблюдался в очень большой долготной области, от полуночного до полуденного секторов MLT: интенсивные возмущения были сосредоточены в послеполуночном секторе на авроральных широтах, значительно меньшие возмущения наблюдались в полярных широтах в утреннем и дневном секторах. Подобное протяженное по долготе развитие полярных сияний отмечалось ранее по наблюдениям на спутнике Polar во время прохождения магнитных облаков солнечного ветра [12] и области сжатой плазмы SHEATH перед MC [11]. Подобное глобальное по долготе развитие суперсуббурь во время сильных магнитных бурь 7–8 сентября 2017 г. обсуждалось в недавней работе [14].

Можно предположить, что во время больших магнитных бурь вторжения интенсивных потоков

заряженных частиц из хвоста магнитосферы создают особые условия, приводящие к развитию суперсуббурь, характеризующихся не только огромными амплитудами, но и чрезвычайно большим азимутальным протяжением западного электроджета.

Особенностью ионосферных токов во время рассмотренных событий SSS было развитие интенсивного восточного электроджета в раннем вечернем секторе. Этот интересный факт требует дальнейшего отдельного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Западный электроджет во время SSS-1 и SSS-2 развивался в глобальном по долготе масштабе, от околополуночных до околополуденных часов местного времени, через утренний сектор. В ночном секторе геомагнитные возмущения отмечались в авроральных широтах, а в утреннем и дневном секторах – в полярных широтах. Наибольшая интенсивность электроджета наблюдалась в авроральных широтах в послеполуночное время. Особенностью ионосферных токов во время SSS было развитие интенсивного восточного электроджета в раннем вечернем секторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. // *Ann. Geophys.* 2015. V. 33. No. 5. P. 519.
2. Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E. et al. // *J. Geophys. Res.* 2016. V. 121. No. 8. P. 7805.
3. Adhikari B., Baruwal P., Chapagain N.P. // *Earth Space Sci.* 2017. V. 4. P. 2.
4. Дэспирак И.В., Любич А.А., Клейменова Н.Г. // *Геомагн. и аэроном.* 2019. № 2. С. 183.
5. Feldman U., Landi E., Schwadron N.A. // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Art. No. A07109.
6. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. // *Косм. исслед.* 2009. Т. 47. № 2. С. 99.
7. Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N. et al. // *Planet. Space Sci.* 2005. V. 53. No. 1/3. P. 189.
8. Старков Г.В., Фельдштейн Я.И. // *Геомагн. и аэроном.* 1971. Т. 11. С. 560.
9. Hajra R., Tsurutani B.T. // *Astrophys. J.* 2018. V. 858. P. 123.
10. Hoffman R.A., Gjerloev J.W., Frank L.A., Sigwarth J.W. // *Ann. Geophys.* 2010. V. 28. P. 1183.
11. Дэспирак И.В., Любич А.А., Колева П.Т. // *Косм. исслед.* 2014. Т. 52. № 1. С. 39.
12. Despirak I.V., Lubchich A.A., Yahnin A.G. et al. // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1.
13. Feldstein Y.I., Prigancova A., Vorobjev V.G. et al. // *Proc. XXX Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”*. (Apatity, 2007). P. 55.
14. Дэспирак И.В., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. и др. // *Геомагн. и аэроном.* 2020. Т. 60. № 3. С. 308.

15. *Tsurutani B.T., Echer E., Shibata K. et al.* // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4. Art. No. A02.
16. *Newell P.T., Gjerloev J.W.* // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. No. A12. Art. No. A12211.
17. *Love J.J.* // Phys. Today. 2008. V. 61. No. 2. P. 31.
18. *Viljanen A., Häkkinen L.* // In: ESA publications SP-1198, 1997. P. 111.
19. *Anderson B.J., Takanashi K., Toth B.A.* // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. No. 24. P. 4045.
20. *Clausen L.B., Baker J.B.H., Ruohoniemi J.M. et al.* // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. No. A6. Art. No. A06233.

Longitude geomagnetic effects of the supersubstorms during the magnetic storm on March 09, 2012

**I. V. Despirak^{a,*}, A. A. Lubchich^a, N. G. Kleimenova^b, L. I. Gromova^c,
S. V. Gromov^c, L. M. Malysheva^b**

^a*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Moscow, 123995 Russia*

^c*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Moscow, 108840 Russia*

*e-mail: despirak@gmail.com

Based on geomagnetic data (SuperMAG and INTERMAGNET global networks and IMAGE Scandinavian profile), the spatial features of two very intense substorms (supersubstorms—SSS) during the magnetic storm on March 9, 2012 were investigated in detail. It is shown that supersubstorms developed on a global scale in the longitude—from the pre-midnight to the daytime sector.