

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.008

СУПЕРСУББУРЯ 20 ДЕКАБРЯ 2015 ГОДА: МАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ

А.А. Любич¹, И.В. Дэспирак¹, Н.Г. Клейменова², Р. Вернер³

¹ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

²Институт Физики Земли (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

³Институт Космических Исследований и Технологий (ИКИТ), БАН, г. Стара Загора, Болгария

Абстракт. Анализируется суперсуббуря (очень интенсивная суббуря с SML индексом ~ 2100 нТл), наблюдавшаяся 20 декабря 2015 года (с началом в 16:13 UT) во время интенсивной магнитной бури, вызванной воздействием на магнитосферу магнитного облака с устойчивым южным направлением ММП. Показано, что ионосферные токи, соответствующие этой суперсуббуре, развивались в глобальном масштабе – от поздне-утреннего до вечернего секторов. Во время ее развития наблюдался очень интенсивный западный электроджет с максимумом в утреннем секторе (~ 06 MLT). В вечернем секторе (~ 18 MLT) наблюдался восточный электроджет. Во время взрывной фазы суббури в вечернем секторе наблюдались вариации магнитного поля, соответствующие появлению дополнительного токового клина обратного направления. Развитие суббури сопровождалось появлением большой положительной вариации X-компоненты магнитного поля на геомагнитных широтах от $\sim 60^\circ$ до $\sim 50^\circ$, что могло привести к наблюдаемому импульсу MPV-индекса (Midlatitude Positive Bay index).

Введение

Схема развития суббури впервые была разработана более полувека назад (Акасофу, 1971; Старков и Фельдштейн, 1971; Исаев и Пудовкин, 1972). За прошедшие годы многократно проводилась классификация суббурь по различным характерным признакам, выделялись их отдельные типы, разрабатывались физические модели суббурь, в общем, происходило накопление и анализ новых фактов. Этим вопросам посвящен огромный пласт литературы. Не будем его здесь вскрывать, а сразу перейдем к интересующему нас вопросу. Относительно недавно в отдельный класс были выделены суперсуббури (Tsurutani et al., 2015). Суперсуббуриями (SSS) были названы интенсивные суббури, во время которых SML индекс опускался ниже -2500 нТл. Напомним, что изначально для оценки геомагнитной активности был предложен AL-индекс, рассчитываемый по геомагнитным станциям, расположенным в авроральной зоне. Однако, в очень возмущенные периоды, например, во время магнитных бурь, геомагнитная активность может сильно смещаться по широте, отдаляясь от «традиционных» авроральных станций. Чтобы, в частности, лучше учесть такие смещения был предложен SML индекс, рассчитываемый по большему числу станций SuperMAG, включая станции, расположенные экваториальнее и полярнее авроральных широт (Newell and Gjerloev, 2011; Gjerloev, 2012). Отметим, что выбранный критерий суперсуббурь $SML < -2500$ нТл не имеет четких физических обоснований, то есть, является, в некотором смысле, произвольным. Иногда суперсуббуриями называют и чуть менее интенсивные события. Например, Дэспирак и др. [2021] использовали более мягкий критерий $SML < -2200$ нТл. Zong et al. [2021] суббури с $1000 < AE < 2000$ нТ называли сильными, а для SSS – $AE > 2000$ нТ. Установлено, что SSS обычно наблюдаются во время прохождения магнитных облаков (MC) солнечного ветра (СВ) или предшествующей им переходной области (Sheath), при высоких плотностях солнечного ветра (СВ) и больших отрицательных значениях B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) (Hajra et al., 2016). До сих пор ученые спорят, являются ли SSS просто очень интенсивными суббуриями или они обладают специфическими особенностями, отличающими их от обычных суббурь, или даже представляют собой вообще особый класс явлений.

Еще на заре исследования суббурь предполагали, что с ними связаны свои ионосферные токовые системы (например, Пудовкин и др. [1977]). Токовую систему суббури DP_1 разделяли на две части - DP_{11} и DP_{12} . Система DP_{12} является относительно стабильной, существующей на всех фазах суббури, системой. С ней связаны западный (в утреннем секторе) и восточный (в вечернем секторе) электроджеты. Ее можно назвать реальной токовой системой, так как с ней связаны реальные ионосферные токи, например, токи растекания, текущие в ионосфере средних широт и полярной шапки. Токовая система DP_{11} , в свою очередь, связана с взрывной фазой суббури и обычно приводит к усилению западного электроджета в ночном секторе. Ее считают эквивалентной токовой системой, так как она обычно не связана с реальными токами, а является двумерным отражением трехмерной магнитосферно-ионосферной токовой системой. Таковую трехмерную систему часто называют токовым клином суббури (SCW) (McPherron et al., 1973). Zong et al. [2021], Fu et al.

[2021] пришли к выводу, что во время суперсуббурь, в отличие от обычных суббурь, в вечернем секторе образуется дополнительный токовый клин обратного направления (втекающий ток расположен западнее вытекающего), приводящий к усилению восточного электроджета.

Следствием развития токового клина суббури является появление положительной бухты в X-компоненте геомагнитного поля на средних широтах (McPherron et al., 1973). В развитие этой идеи недавно был предложен МРВ (Midlatitude Positive Bay) индекс (Chu et al. [2015], McPherron and Chu [2016, 2018]). На данный момент методика его вычисления продолжает шлифоваться. Существуют два слегка отличающихся списка МРВ индекса за период примерно с 1982 года. Их можно найти в дополнительной информации к интернет-версии статьи McPherron and Chu [2018]. Различия в методиках расчета описаны, например, в работе McPherron and Chu [2016]. Главное для нас различие: список McPherron получен по данным 36 станций с геомагнитной широтой λ_{mag} между -50° и 50° , тогда как список Chu составлен по данным 41 станции северного и южного полушарий с $20^\circ < |\lambda_{mag}| < 52^\circ$.

Мы проанализируем суперсуббурю, наблюдавшуюся 20 декабря 2015 года. Определим, имеет ли она особенности в развитии, отличающие ее от типичной суббури. Заодно рассмотрим, какие возмущения она создает на средних широтах.

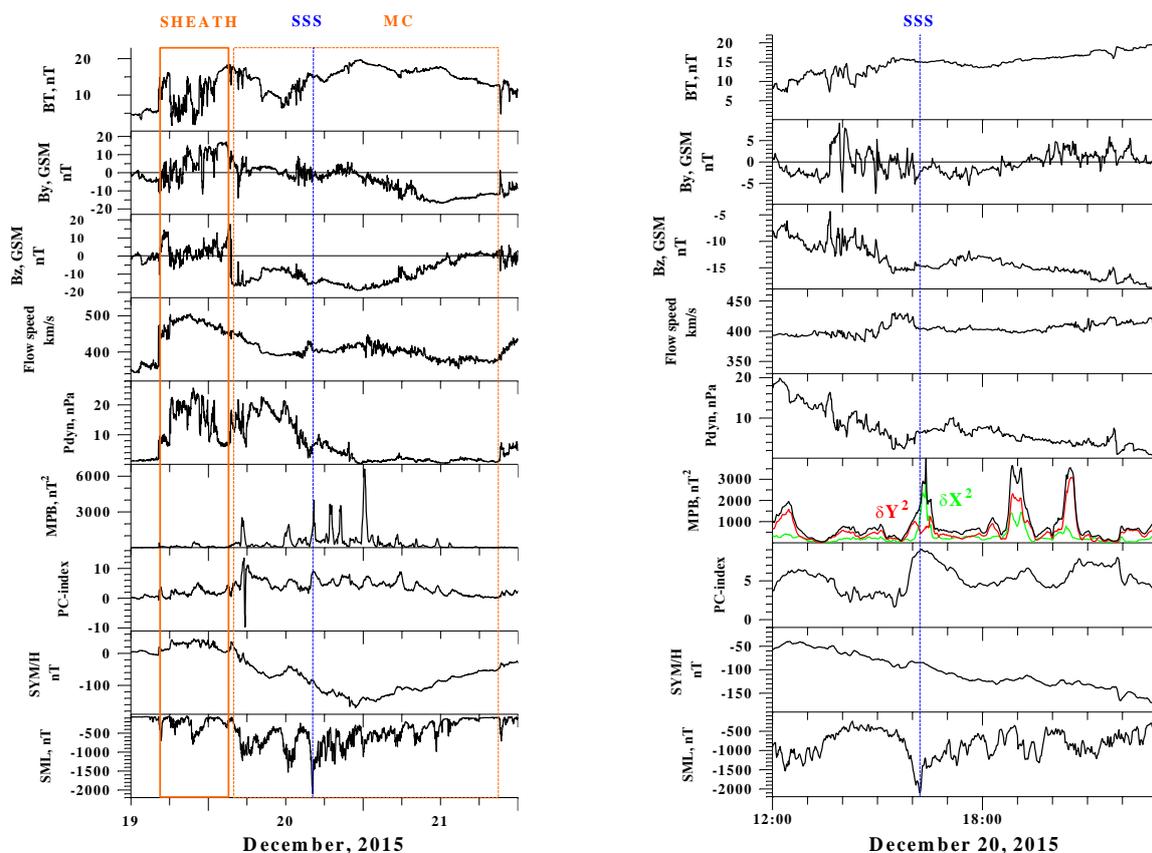


Рисунок 1. Модуль ММП, B_Y и B_Z компоненты ММП (в системе GSM), скорость и динамическое давление СВ, геомагнитные индексы МРВ, PC, SYM/H и SML за период с 12 UT 19 декабря до 24 UT 21 декабря 2015 года (слева) и с 12:00 до 23:00 UT 20 декабря (справа).

Описание события

Посмотрим на Рис. 1, где показано поведение ММП, некоторые параметры СВ и геомагнитные индексы за интервал с 12 UT 19 декабря до конца 21 декабря 2015 года (слева). Детальней показан период с 12 до 23 UT 20 декабря (справа). Мы видим прохождение мимо Земли магнитного облака, перед которым располагается переходная область (Sheath). СВ является относительно медленным, его скорость максимальна в переходной области и не превышает 505 км/с. В этом событии наблюдается очень высокая плотность солнечного ветра (до ~ 50 частиц в см^3 в переходной области и до ~ 70 частиц в см^3 в начале MC), за счет чего имеем высокое динамическое давление СВ. В магнитном облаке наблюдается устойчиво отрицательная B_Z компонента магнитного поля (опускается до -19 нТл). За счет высокой плотности СВ и отрицательной B_Z -компоненты ММП наблюдается большой приток энергии в магнитосферу. В результате на Земле разыгралась магнитная буря (Dst индекс достигал -155 нТл, SYM/H опускался до -170 нТл, что соответствует интенсивной магнитной буре согласно, например, Hajra et al. [2016]). Во время магнитной бури наблюдалось несколько

суббури. Во время одной из них, в 16:13 UT, SML-индекс опустился до ~ -2100 нТл, в этот момент AE-индекс был равен 1946 нТл. Это событие чуть-чуть не дотягивает до суперсуббури согласно «мягкому» критерию Дэспирак и др. [2021] ($SML < -2200$ нТл) и попадает почти точно на границу между сильными суббуриями и SSS согласно Zong *et al.* [2021] ($AE = 2000$ нТл). Не будем здесь заниматься «крючкотворством» и отнесем это событие к суперсуббуре. Во время магнитной бури наблюдалось несколько всплесков среднеширотного MPB-индекса. Во время суперсуббури, в 16:23 UT, этот индекс, являющийся средней суммой квадратов вариаций горизонтальных компонент магнитного поля на станциях в ночном секторе, достигал ~ 4000 нТл². Здесь мы использовали список Chu (*McPherron and Chu* [2018]). Максимум был достигнут в основном за счет вариаций δX^2 (зеленая линия на правом графике). Наблюдаемое значение MPB индекса намного превышает минимальное пороговое значение (25 нТл²), используемое при отборе событий при анализе связи индекса с суббуревой активностью (*McPherron and Chu* [2016, 2018]). Отметим, что во время прохождения магнитного облака были и другие всплески MPB индекса, вплоть до 6600 нТл²; прямой связи между величиной MPB индекса и амплитудой вариации SML индекса здесь не наблюдается.

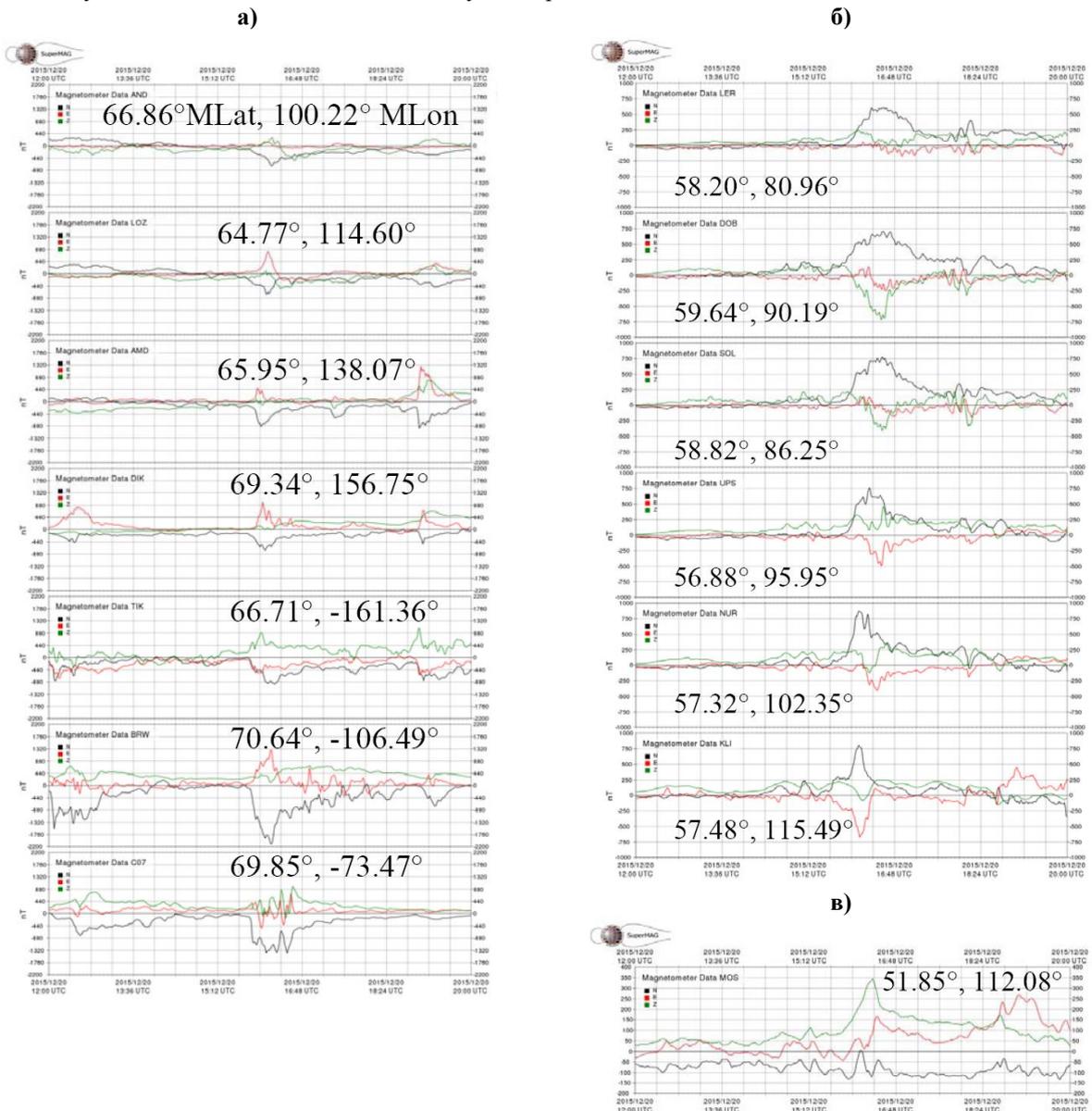


Рисунок 2. Магнитограммы станций сети SuperMAG с 10:00 до 20:00 UT 20 декабря 2015 года. **а)** На геомагнитных широтах $\sim 65 - 70^\circ$ (геомагнитные широта и долгота указаны на графиках) для станций Andenes (AND), Ловозеро (LOZ), Амдерма (AMD), Диксон (DIK), Тикси (TIK), Barrow (BRW) и Norman Wells (C07) [диапазон изменений по оси Y от -2200 до +2200 нТл]; **б)** На геомагнитных широтах $\sim 56 - 60^\circ$ для станций Lerwik (LER), Dombas (DOB), Solund (SOL), Uppsala (UPS), Nurmijärvi (NUR) и Климовская (KLI) [диапазон по оси Y от -1000 до +1000 нТл]; **в)** На станции Москва (MOS) [диапазон по оси Y от -200 до +400 нТл].

Вариации магнитного поля на земной поверхности и на низкой околоземной орбите

Рассмотрим Северное полушарие. Во время суперсуббури (минимум SML индекса был зарегистрирован в 16:13 UT) цепочка станций IMAGE располагалась в вечернем секторе, MLT ~ 17-18 часов. Над Канадой и Аляской было утро, MLT ~ 5-7 часов, в Сибири была ночь. Анализ данных цепочки IMAGE показал, что на северных станциях, от Ny-Ålesund ($\lambda_{\text{mag}} \approx 75.3^\circ$) до Oulujärvi ($\lambda_{\text{mag}} \approx 61.0^\circ$), наблюдалась отрицательная бухта в X-компоненте магнитного поля (самая глубокая бухта ~ -850 нТл была зарегистрирована в Ranua, $\lambda_{\text{mag}} \approx 62.1^\circ$). В это время южнее, от Mekrijärvi ($\lambda_{\text{mag}} \approx 59.1^\circ$) до Birzai ($\lambda_{\text{mag}} \approx 52.3^\circ$) видна положительная бухта, имеющая максимум также ~850 нТл на $\lambda_{\text{mag}} \sim 57^\circ$. Цепочка станций IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) имеет высокую плотность магнитометров, хорошее временное разрешение (10 с), но ограничена в пространстве. Для анализа поведения магнитного поля на разных долготах удобнее использовать базу данных SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). На Рисунке 2 показаны магнитограммы на разных долготах. От вечернего до утреннего секторов, от севера Норвегии (AND) через Сибирь до северо-запада Канады (C07), почти одновременно видна отрицательная бухта в X-компоненте. Возмущения максимальны в утреннем секторе, на Аляске (BRW). В это же время при $\lambda_{\text{mag}} \sim 56 - 60^\circ$ видна положительная бухта в X-компоненте от севера Шотландии (LER) через юг Скандинавии до юга Архангельской области (KLI). Видна ли эта бухта восточнее, за Уралом – неизвестно, нет данных на нужных широтах. При движении на запад импульс расширяется, а время регистрации немного возрастает. Положительный импульс виден и на широтах ~52°, в Москве, Казани и около Екатеринбурга. В Москве амплитуда импульса превышает 100 нТл. Отметим, что Москва попадает в диапазон широт, используемый Chu (*McPherron and Chu* [2018]) для расчета МРВ-индекса, хотя и не входит в его список используемых станций.

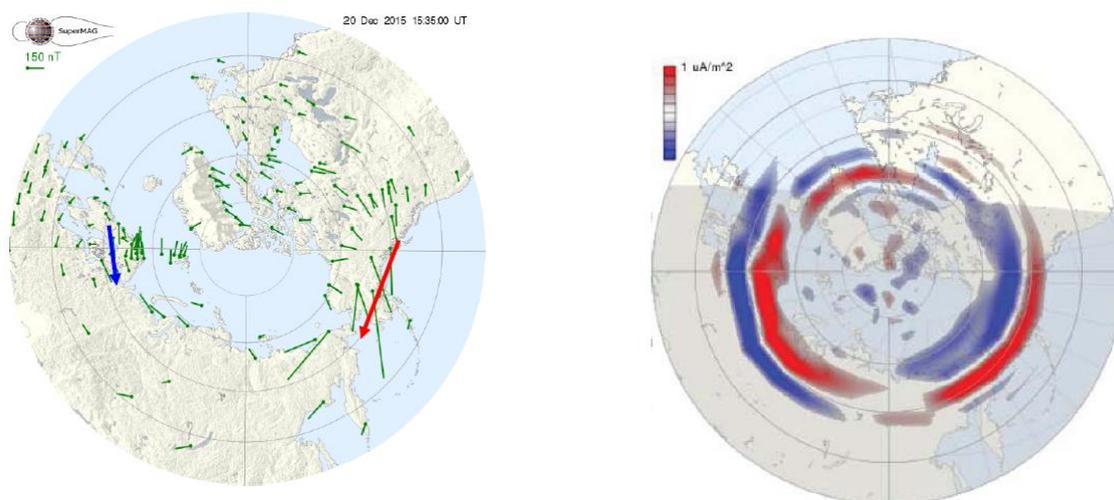
С помощью данных магнитометров сети SuperMAG можно получить пространственную картину вариаций магнитного поля. На сайте <http://supermag.jhuapl.edu/>, используя измерения магнитного поля с одноминутным разрешением, строят мгновенную карту векторов в Северном и/или Южном полушарии. Мы использовали карту векторов магнитного поля, повернутых на 90° градусов по часовой стрелке, в геомагнитных координатах для Северного полушария. В предположении, что вариации магнитного поля создаются токами растекания в ионосфере, такие повернутые вектора указывают направление ионосферного тока. Длина вектора соответствует величине вариаций магнитного поля (или плотности тока). Вначале, на предварительной фазе суббури, мы видим западный (в утреннем секторе) и восточный (в вечернем секторе) электроджеты. На рис. 3а слева электроджеты схематически показаны красной и синей стрелками. На взрывной фазе суббури сильно возрастает величина западного электроджета, восточный электроджет также усиливается. На рис. 3б (и 3в) слева восточный электроджет схематически показан синей стрелкой. Затем в вечернем секторе начинает наблюдаться вращение векторов вокруг восточного электроджета. Южнее (севернее) электроджета поворот осуществляется по (против) часовой стрелки. На рис. 3в области поворота векторов схематически отмечены синими овалами с указанием их долготных размеров. Наблюдаемая картина соответствует появлению в вечернем секторе дополнительного токового клина суббури, что подтверждает выводы *Zong et al.* [2021] и *Fu et al.* [2021]. Затем, на фазе восстановления, возмущения начинают затухать.

Сеть SuperMAG дает, так сказать, взгляд на ионосферу снизу, с земной поверхности. Но можно посмотреть на ионосферу и сверху, с низкой околоземной орбиты. Такую возможность предоставляет, например, проект AMPERE (Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment). Используя измерения магнитного поля на спутниках связи Iridium, имеющих круговую полярную орбиту высотой около 780 км, получают карту распределения вариаций горизонтальных компонент магнитного поля на этой высоте. Решая обратную задачу, восстанавливают вертикальные токи, способные создать наблюдаемые вариации. Используемая математическая процедура и описание создаваемого научного продукта приведены, например, в работах *Anderson et al.* [2014], *Waters et al.* [2020]. Карты распределения вариаций магнитного поля и вертикальных токов доступны на сайте <http://ampere.jhuapl.edu/>. Для трех рассмотренных выше моментов времени карты эквивалентных вертикальных токов показаны на рис. 3 в правой колонке. Карты пространственного распределения втекающих и вытекающих токов, в целом, неплохо согласуются со схемой, показанной в работе *Iijima and Potemra* [1978]. В вечернем секторе, в области появления дополнительного токового клина, на карте токов появляется дополнительная область втекающего тока (правая часть рис. 3в). Этот дополнительный втекающий ток на картах AMPERE наблюдается в интервале 16:00 – 16:30 UT (карты строятся за 10-минутный интервал) на широтах ~50-55°.

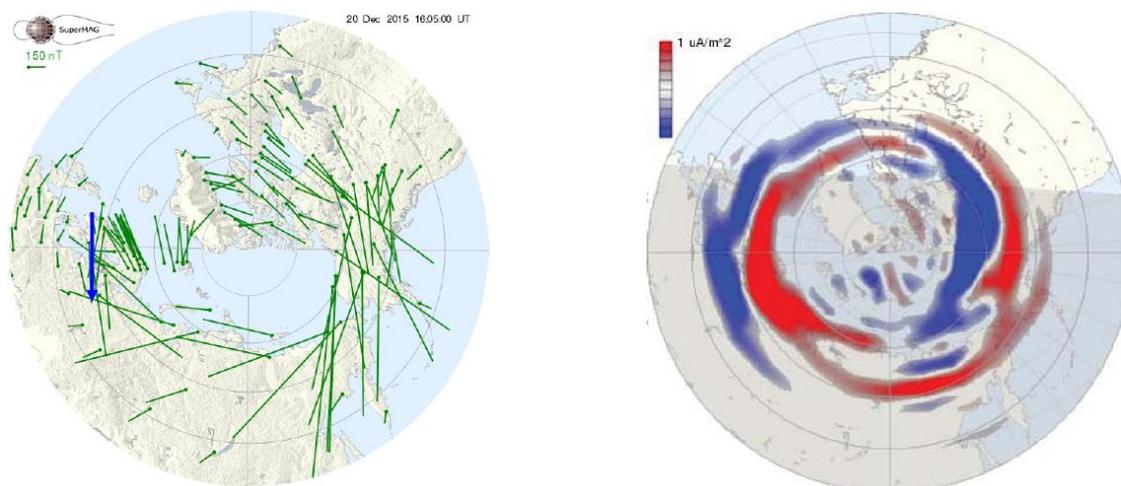
Результаты и их обсуждение

Подведем итоги анализа суперсуббури, наблюдавшейся 20 декабря 2015 года в ~16:13 UT. Суперсуббурия наблюдалась во время прохождения мимо Земли магнитного облака при устойчиво южном направлении межпланетного магнитного поля (в момент SSS B_z ММП ~ -15 нТл). В это время на Земле была зарегистрирована интенсивная магнитная буря. Согласно результатам работы *Hajra et al.* [2016] комбинация условий (южное ММП, МС и магнитная буря) были благоприятны для возникновения суперсуббурии.

а)



б)



в)

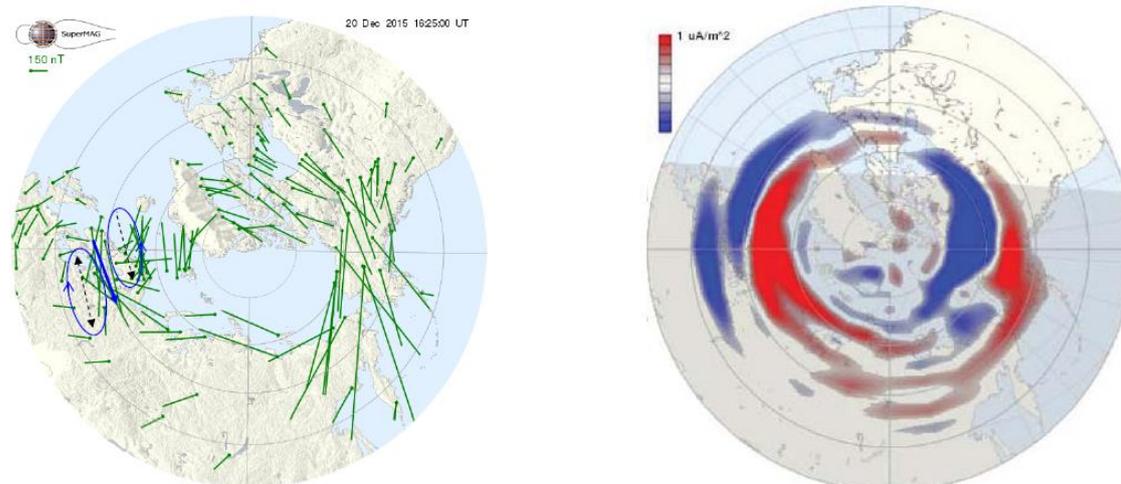


Рисунок 3. Слева показана карта вариаций магнитного поля по данным сети SuperMAG. На карте вектора магнитного поля повернуты на 90 по часовой стрелке, показывая направление эквивалентных ионосферных токов. Справа построена карта втекающих (синий цвет) и вытекающих (красный цвет) ионосферных токов по данным проекта AMPERE. Карты построены в геомагнитных координатах для северного полушария для трех моментов времени: 15:35 (а), 16:05 (б) и 16:25 UT (в). Начальная широта - 40° градусов. Полдень вверху карты, полночь – внизу, 06 MLT – справа и 18 MLT – слева.

В ионосфере суперсуббури развивалась в глобальном масштабе: от поздне-утреннего до вечернего сектора. Во время ее развития наблюдался очень интенсивный западный электроджет, максимум которого отмечался в утреннем секторе (~06 MLT). В вечернем секторе (~18 MLT) наблюдался восточный электроджет. Во время взрывной фазы суббури в вечернем секторе наблюдалась токовая структура, соответствующая появлению дополнительного токового клина обратного направления. Эти факторы (глобальный масштаб и дополнительный токовый клин в вечернем секторе) отличают SSS от обычной суббури. Наблюдаемый характер развития суперсуббури согласуется с результатами *Zong et al.* [2021], *Fu et al.* [2021], *Дэспирак и др.* [2021].

Во время суперсуббури наблюдался интенсивный импульс МРВ-индекса (~ 4000 нТл²). В это время наблюдался положительный импульс в X-компоненте геомагнитного поля на геомагнитных широтах от ~60 до ~50°. В Москве, на широте ~52°, амплитуда вариации X-компоненты превышала 100 нТл. Можно предположить, что большая амплитуда МРВ-индекса может быть связана со смещением к экватору во время магнитной бури ионосферных проекций многих магнитосферных структур, таких как авроральный овал, плазмопауза и другие. В это время станция, обычно находящаяся на средних широтах (в геомагнитном смысле), может попасть в субавроральные или даже в авроральные широты.

Благодарности. Параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индекса магнитной активности взяты на сайте <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>. Карты распределения втекающих и вытекающих ионосферных токов взяты с сайта <http://ampere.jhuapl.edu/>. Авторы благодарны создателям баз магнитных данных IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/>) и SuperMAG (<http://supermag.jhuapl.edu/>). Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект No. 20-55-18003_Болг_а и Национальным Научным Фондом Болгарии (NSFB), проект номер КП-06-Русия/15.

Литература

- Акасофу С.-И., Полярные и магнитосферные суббури. М.: Мир, 1971, 316 с.
- Дэспирак И.В., Любчик А.А., Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М., Долготные геомагнитные эффекты суперсуббури во время магнитной бури 9 марта 2012 г., Известия РАН. Серия физическая, 2021, Т.85, №3, С.346-352. doi: 10.31857/S0367676521030108 [Despirak I.V., Lyubchich A.A., Kleimenova N.G., Gromova L.I., Gromov S.V., Malysheva L.M., Longitude geomagnetic effects of the supersubstorms during the magnetic storm of March 9, 2012, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2021, V.85, No.3, P.246–251. doi: 10.3103/S1062873821030096]
- Исаев С.И., Пудовкин М.И., Полярные сияния и процессы в магнитосфере Земли. Л.: Наука, 1972, 244 с.
- Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л., Трошичев О.А., Чертков А.Д., Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. М.: Наука, 1977, 312 с.
- Старков Г.В., Фельдштейн Я.И., Суббури в полярных сияниях. Геомагнетизм и аэрномия, 1971, Т. 11, С. 560-562.
- Anderson B.J., Korth H., Waters C.L., Green D.L., Merkin V.G., Barnes R.J., Dyrud L.P., Development of large-scale Birkeland currents determined from the Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment. Geophysical Research Letters, 2014, V.41, No.9, P.3017-3025. doi: 10.1002/2014GL059941
- Chu X., McPherron R.L., Hsu T.-S., Angelopoulos V., Solar cycle dependence of substorm occurrence and duration: Implications for onset. JGR Space Physics, 2015, V.120(4), P.2808–2818. <https://doi.org/10.1002/2015JA021104>
- Fu H., Yue C., Zong Q.-G., Zhou X.-Z., Fu S., Statistical characteristics of substorms with different intensity. JGR Space Physics, 2021, V.126, No.8, e2021JA029318. <https://doi.org/10.1029/2021JA029318>
- Gjerloev J.W., The SuperMAG data processing technique. JGR, 2012, V.117, No.A9, A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Hajra R., Tsurutani B.T., Echer E., Gonzalez W.D., Gjerloev J.W., Supersubstorms (SML < -2500nT): Magnetic storm and solar cycle dependences. JGR, 2016, V.121, No.8, P.7805-7816. doi:10.1002/2015JA021835
- Iijima T., Potemra T.A., Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. JGR, 1978, V.83, No.A2, P. 599-615. <https://doi.org/10.1029/JA083iA02p00599>
- McPherron R.L., Chu X., The mid-latitude positive bay and the MPB index of substorm activity. Space Science Reviews, 2016, V.206 (1–4), P.91–122. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0316-6>
- McPherron R.L., Chu X., The midlatitude positive bay index and the statistics of substorm occurrence. JGR Space Physics, 2018, V.123, P.2831–2850. <https://doi.org/10.1002/2017JA024766>
- McPherron R.L., Russell C.T., Aubry M.P., Satellite studies of magnetospheric substorms on August 15, 1968; 9. Phenomenological model for substorms. JGR, 1973, V.78, No.16, P. 3131-3149.
- Newell P.T., Gjerloev J.W., Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power, JGR, 2011, V.116, A12211. doi:10.1029/2011JA016779
- Tsurutani B.T., Hajra R., Echer E., Gjerloev J.W. Extremely intense (SML ≤ -2500 nT) substorms: isolated events that are externally triggered? Ann. Geophys., 2015, V.33, P.519–524.
- Waters C.L., Anderson B.J., Green D.L., Korth H., Barnes R.J., Vanhamäki H., Science Data Products for AMPERE. In: Dunlop M., Lühr H. (eds) Ionospheric Multi-Spacecraft Analysis Tools. ISSI Scientific Report Series, 2020, vol 17. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26732-2_7
- Zong Q.-G., Yue C., Fu S.-Y., Shock induced strong substorms and super substorms: Preconditions and associated oxygen ion dynamics. Space Science Review, 2021, V.217:33. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00806-x>