

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.018

ШИРОТНО-ДОЛГОТНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ВОЗМОЖНЫЙ ИСТОЧНИК ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1 ТИПА ШЕВРОН

В.А. Пархомов¹, Б.В. Довбня², Б. Цэгмэд³, В.Г. Еселевич⁴, А.В. Родионов¹

¹Байкальский государственный университет, Иркутск, Россия; e-mail: pekines_41@mail.ru

²Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, Борок, Россия; e-mail: dovbnua@inbox.ru

³Отдел геомагнетизма, института астрономии и геомагнетизма МАН, Улан-Батор, Монголия; e-mail: tseg@iag.ac.mn

⁴Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия; e-mail: esel@iszf.irk.ru

Аннотация

В статье рассматриваются особенности магнитосферного отклика на воздействие диамагнитной структуры солнечного ветра, вызвавшего генерацию геомагнитных пульсаций Pc1 типа шеврон, зарегистрированных на сети магнитометров CARISMA и спутниках THEMIS 07.09.2023. Исследованы их связь с суббурей, широтно-долготные и частотные характеристики. На основе пространственно-временных закономерностей в распространении пульсаций и особенностей связи с суббурей, предложена гипотеза их происхождения в результате выброса суббуревоего плазмоида из хвоста магнитосферы и его движения в системе конвекции магнитосферы западном направлении.

Ключевые слова: геомагнитные пульсации Pc1 типа шеврон, диамагнитная структура солнечного ветра, суббуревой плазмод.

Введение

Геомагнитные пульсации ($f = 5 \div 0.002$ Гц) являются важным геофизическим явлением, так как они отражают процессы взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли [Гульельми и Троицкая, 1973; Гульельми, 1978]. Пульсации разделяются на несколько типов в зависимости от частотных диапазонов и условий генерации. В статье рассматриваются морфологические особенности и возможная природа одного из недавно обнаруженных типов пульсации Pc1, представляющих собой кратковременные всплески с дрейфом по частоте и расщеплением спектра в диапазоне частот от 0.2 до 0.07 Гц, которые получили название «шеvron», благодаря их уникальной спектрограмме, напоминающей шеврон (нашивку) на рукаве военной форме офицеров [Parkhotov et al., 2023]. Пульсации ассоциируются с динамическими процессами, происходящими в магнитосфере под воздействием возмущений, вызванных солнечным ветром. В частотном диапазоне Pc1 по типу динамических спектров выделено более 25 видов излучений [Saito, 1979; Fukunishi et al., 1981; Гульельми, 1979]. Однако ни в монографиях [Гульельми и Троицкая, 1973; Гульельми, 1978], ни в обзорах [Saito, 1979; Fukunishi et al., 1981], мы не нашли упоминаний о всплесках такого вида.

Пульсации Pc1 обычно наблюдаются в субавроральных широтах и имеют связь с изменениями в магнитосфере, вызванными плазмоидами, джетами и электроструями, порожденными солнечным ветром. Недавние исследования пульсаций Pc1, проведенные на основе спутниковых данных CHAMP [Сафаргалеев и Терещенко, 2019] показали, что их частотные и пространственные характеристики могут изменяться в зависимости от солнечных явлений и географической широты. Однако механизмы генерации таких пульсаций, как и их пространственно-временные закономерности, остаются неясными и требуют дальнейшего изучения.

Данные наблюдений и методы анализа

В статье рассматриваются геофизические условия, пространственно-временные закономерности и возможная причина генерации шеврона Pc1, зарегистрированного 07.09.2023 на сети магнитометров CARISMA (<https://www.carisma.ca/>) (Табл. 1,2) и спутниках THEMIS (<http://themis.ssl.berkeley>). Использовались данные сети Intermagnet (https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms), а также записи индукционного магнитометра обсерватории Паратунка <http://www.ikir.ru>. Индексы магнитной активности и векторные диаграммы токов заимствованы с сайтов <https://supermag.jhuapl.edu/indices> и <https://space.fmi.fi/image/www/index.php?>

Таблица 1. Сеть магнитометров CARISMA.

№	Обсерватория	Код	Широта	Долгота	L_{Re}
1	Taloyak	TALO	69.54	260.45	29.96
2	Rankin Inlet	RANK	62.82	267.89	12.44
3	Fort Churchill	FCHU	58.76	265.45	8.18
4	Gilliam	GILL	56.57	265.32	6.66
5	Island Lake	ISSL	53.35	265.34	5.40
6	Pinawa	PINA	50.19	263.36	4.25
7	Fort Chipewy	FCHP	58.77	248.89	6.25
8	Rabbit Lake	RABB	58.22	256.32	6.57
9	Fort Smith	FSMI	60.01	248.05	6.81

Таблица 2. Magnetic observatories.

№	Обсерватория	Код	Широта	Долгота
10	Abisco	ABI	51.61	100.81
11	Lerwik	LER	60.13	358.81
12	Jan Mayen	JAN	70.90	351.31
13	Паратунка	PET	52.94	155.25

Для обработки записей индукционных магнитометров использовались программы спектрально-временного анализа СВАН и узкополосной линейной фильтрации по алгоритму Мармё [Marmet, 1979].

Орбиты спутников, данные которых использованы в работе, приведены на Рис. 1.

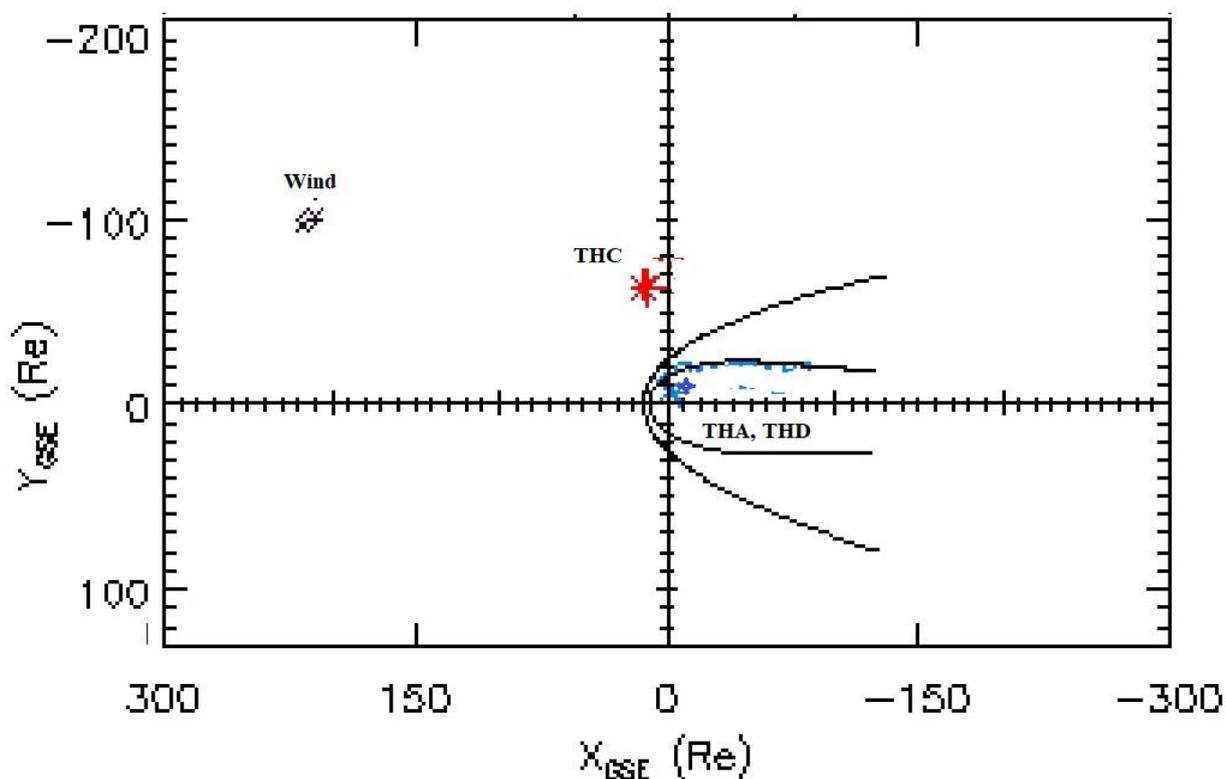


Рисунок 1. Положение спутников 23.09.07 в интервале 20 ÷ 22 UT.

Результаты наблюдений

На Рис. 2 дана спектрограмма исследуемого шеврона и его сравнение с шевроном Pc1 в [Parkhomov *et al.*, 2023]. В приведённом примере видна большая разница в частотных полосах наблюдения пульсаций: $1.6 \div 0.3$ Гц в первом примере и $0.2 \div 0.07$ Гц во втором. Вероятно, такая частотная разница может указывать на сорт ионов, определяющих частоту генерируемых волн в результате циклотронной неустойчивости [Гульельми, 1979; Kangas *et al.*, 1998]. Геомагнитные пульсации типа Pc1, в том числе редкие пульсации типа шеврон, возникают при взаимодействии магнитосферы Земли с солнечным ветром. Основным фактором, определяющим генерацию пульсаций, является резкое усиление авроральной электроструи, что часто связано с выбросами суббуравых плазматидов. Плазматиды, дрейфуя в антиконвекционной струе на запад к дневной стороне магнитосферы, создают условия для возбуждения пульсаций.

Согласно исследованиям, проведенным на основе данных спутников CHAMP и AMPTE/CSE [Сафаргалеев и Терещенко, 2019], генерация Pc1-пульсаций чаще всего происходит в условиях относительно спокойного геомагнитного фона, когда возмущения магнитного поля в основном вызваны изменениями скорости и плотности солнечного ветра, а не крупными магнитными бурями. Однако иногда такие пульсации возникают и в условиях высокой геомагнитной активности, что указывает на сложную природу их возбуждения.

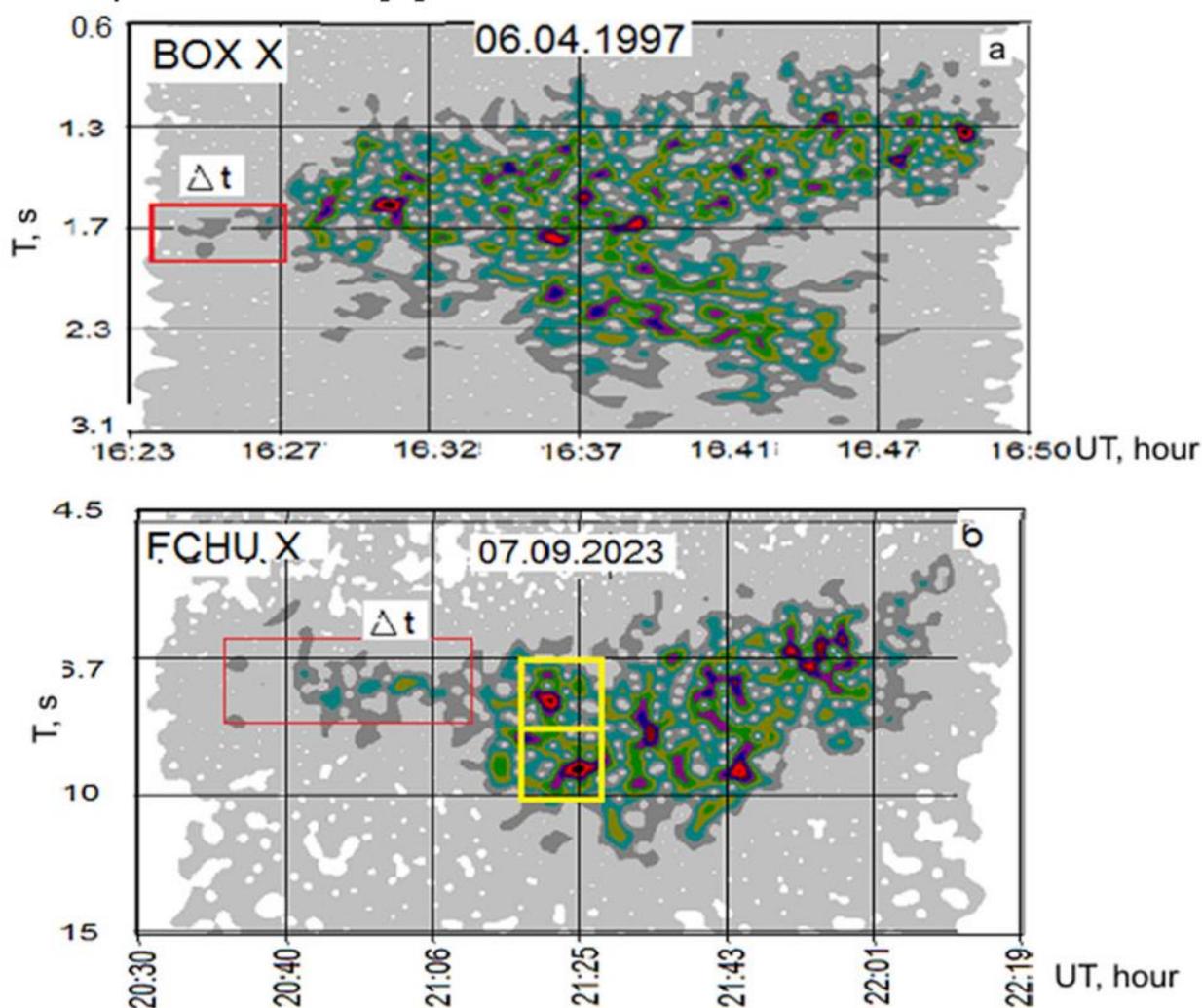


Рисунок 2. Примеры шевронов Pc1, Δt – интервал постоянства частоты, желтые прямоугольники – участки определения тонкой структуры на рисунке б.

Геофизические условия возбуждения

Генерация шеврона Pc1 связана с резким кратковременным усилением авроральных токов (возникновению вихря на околополуночном меридиане) Рис. 3а. Импульсное усиление электроджета проявляются во всплесках индекса SME и сопровождается генерацией всплесков геомагнитных пульсаций Pi2 (Рис. 3а, б).

В рассматриваемом событии, усиление аврорального электроджета, возможно вызвано энергией диамагнитной структуры, которая поступила в магнитосферу при контакте с ней.

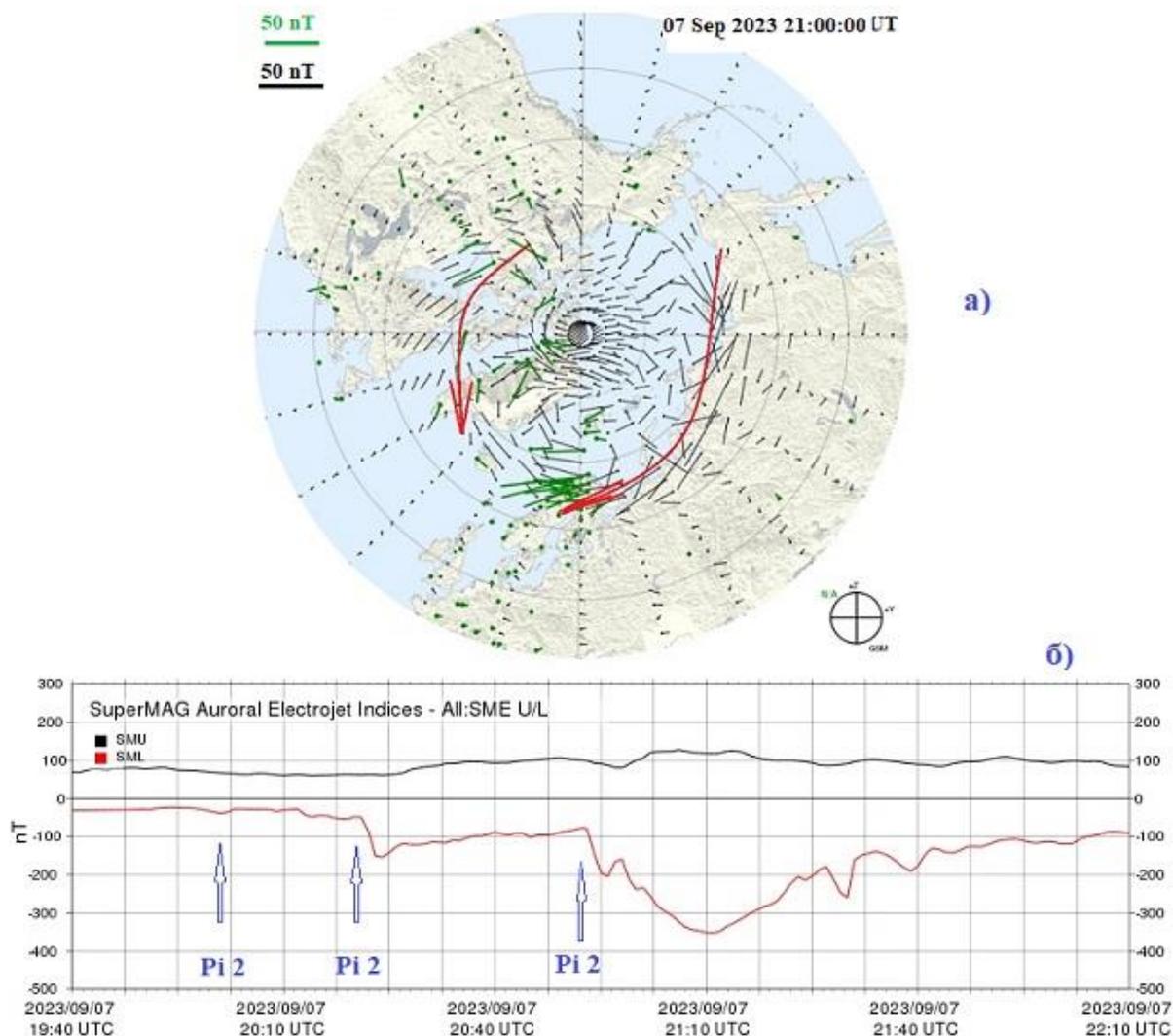


Рисунок 3. а) Векторная диаграмма токов. На полуночном меридиане (IMAGE) видно резкое усиление токов; б) Вариации индексов SME и SML. Стрелками указаны моменты регистрации Pi2.

На рисунке 4а представлены вариации модуля межпланетного магнитного поля (синяя кривая) и концентрации СВ (красная кривая) на спутниках Wind и THEMIS – С, составляющие диамагнитную структуру (обведено прямоугольником DS). Характерные детали вариаций на спутниках и наземный отклик соединены прямыми линиями. Прохождение энергии DS внутрь магнитосферы вызывает генерацию всплесков Pi2 (стрелки), начало суббури и резкое усиление западного электроджета с его броском на север. Детали магнитосферного отклика на контакт с DS даны на Рис. 4б, в: - модельный расчёт токовой системы по данным цепочки магнитометров IMAGE (Рис. 4в) и IE - индекс по данным цепочки магнитометров IMAGE. Резкое возрастание авроральной активности, связанное с прохождением диамагнитной структуры СВ внутрь магнитосферы [Пархомов и др., 2021], можно считать кратковременной суббури.

Спектральные характеристики шеврона Pc1

Как известно [Акасофу, 1971; Kangas et al., 1998], магнитосферные суббури сопровождаются генерацией всплесков геомагнитных пульсаций типа Pi 1-2 на меридиане суббури и IPDP (пульсации с уменьшением периода) к западу от меридиана суббуревой активизации. IPDP, характерной особенностью которых является резкое нарастание частоты в течение нескольких минут, связаны с инжекцией плазмы из хвоста магнитосферы и дрейфом плазмоида на запад. В рассматриваемом событии всплеска пульсаций к западу от долготы суббуревой активизации, на динамических спектрах меридиональной сети магнитометров CARISMA, представленных на Рис. 5, наблюдается шеврон Pc1, в котором происходит и рост, и падение частоты.

Шеврон Pc1 наиболее отчётлив на обсерватории FCHU. На спектрограмме видны усиленные по амплитуде элементы (жёлтая стрелка), которые развёрнуты по амплитуде – частоте на Рис. 6. На этом рисунке спектральная мощность определяется градацией цвета. Максимальная мощность — чёрный цвет. Между

цветами спектральная мощность убывает в ϵ раз. Можно отметить, что диспергированные элементы подобные, элементам Pc1 отсутствуют.

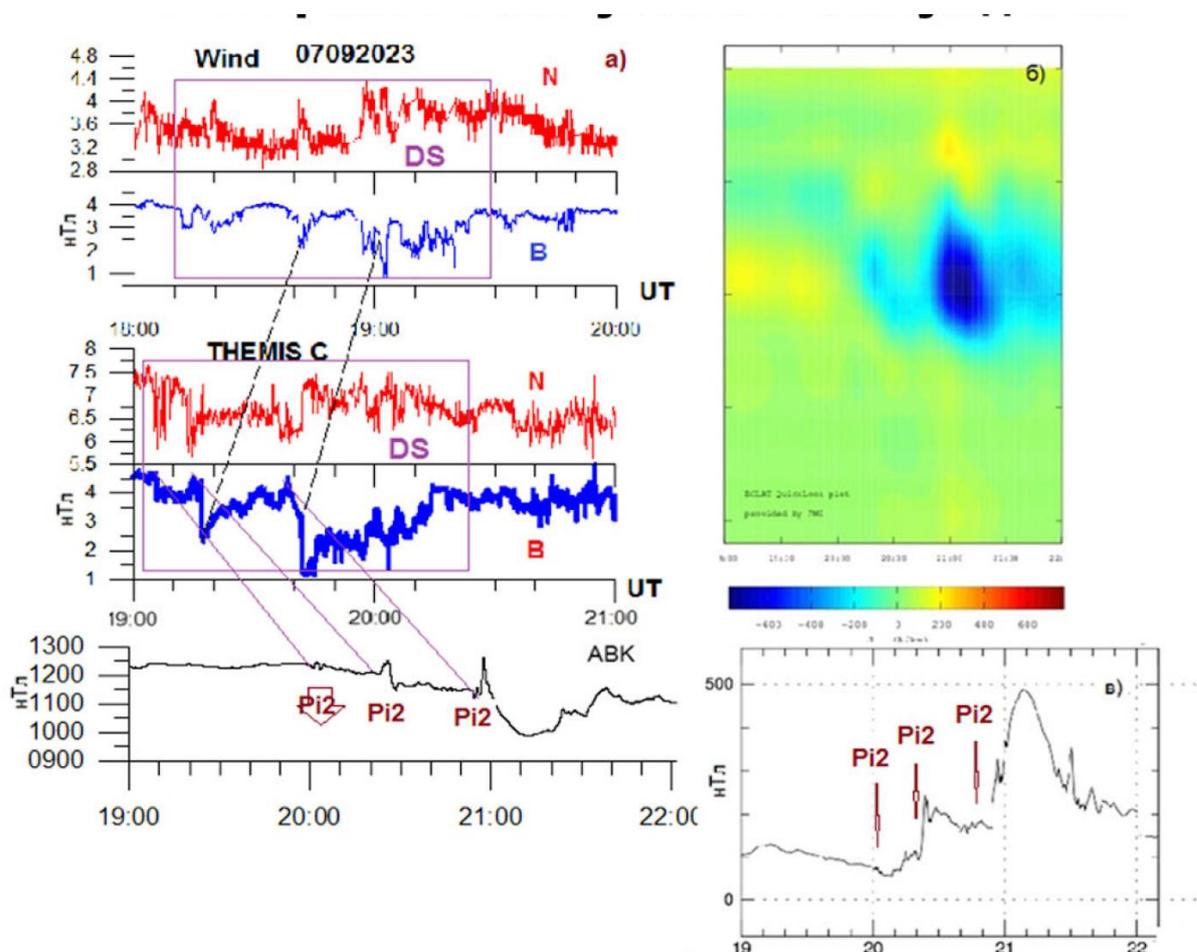


Рисунок 4. а) Вариации модуля межпланетного магнитного поля (синяя кривая) и концентрации СВ (красная кривая) на спутниках Wind и THEMIS-C и горизонтальной компоненты геомагнитного поля в авроральной зоне в околополуночные часы. Pi2 — моменты регистрации геомагнитных пульсаций, DS — диамагнитные структуры, определяемые по отрицательному коэффициенту корреляции ($B,N \sim -0.7$); б) модельный расчёт токовой системы по данным цепочки магнитометров IMAGE; в) IE индекс по данным цепочки магнитометров IMAGE.

На самой северной станции ТАЛО, силовая линия которой проектируется в магнитослой, в частотном диапазоне $0.2 \div 0.07$ Гц регистрируются колебания с шумовым спектром с хаотичными усилениями интенсивности (тёмные вкрапления в спектрограмме).

На обсерваториях меридиана южнее в момент, совпадающий с первым всплеском Pi2 на меридиане суббури, начинается шумовое излучение в полосе $\sim 0.12 \div 0.29$ Гц, нижняя частота которого смещается до 0.07 Гц. На обсерватории FCHU (зона максимума аврорального западного электроджета) форма спектра изменяется и появляется нарастающая до 0.2 Гц ветвь. На обсерваториях к югу форма спектра не меняется, но интенсивность уменьшается. На обсерватории THRF (48°) колебания отсутствуют. Таким образом, шеврон Pc1 регистрируется локально в широтной полосе $\sim 62^\circ \div 50^\circ$.

Пространственные характеристики шеврона Pc1

Для определения широтно-долготных особенностей шеврона Pc1 использована узкополосная числовая фильтрация в полосе периодов 3-15 с фильтром, созданном по алгоритму Марме [Marmet, 1979]. Результаты фильтрации наблюдений вдоль меридиана представлены на Рис. 7а. Распределение интенсивности колебаний вдоль широты показано на Рис. 7б. Результаты фильтрации усиливают аргументацию в пользу локальности распространения шеврона не только по широте, но и по долготе. Схема локализации шеврона Pc1 показана на Рис. 8.

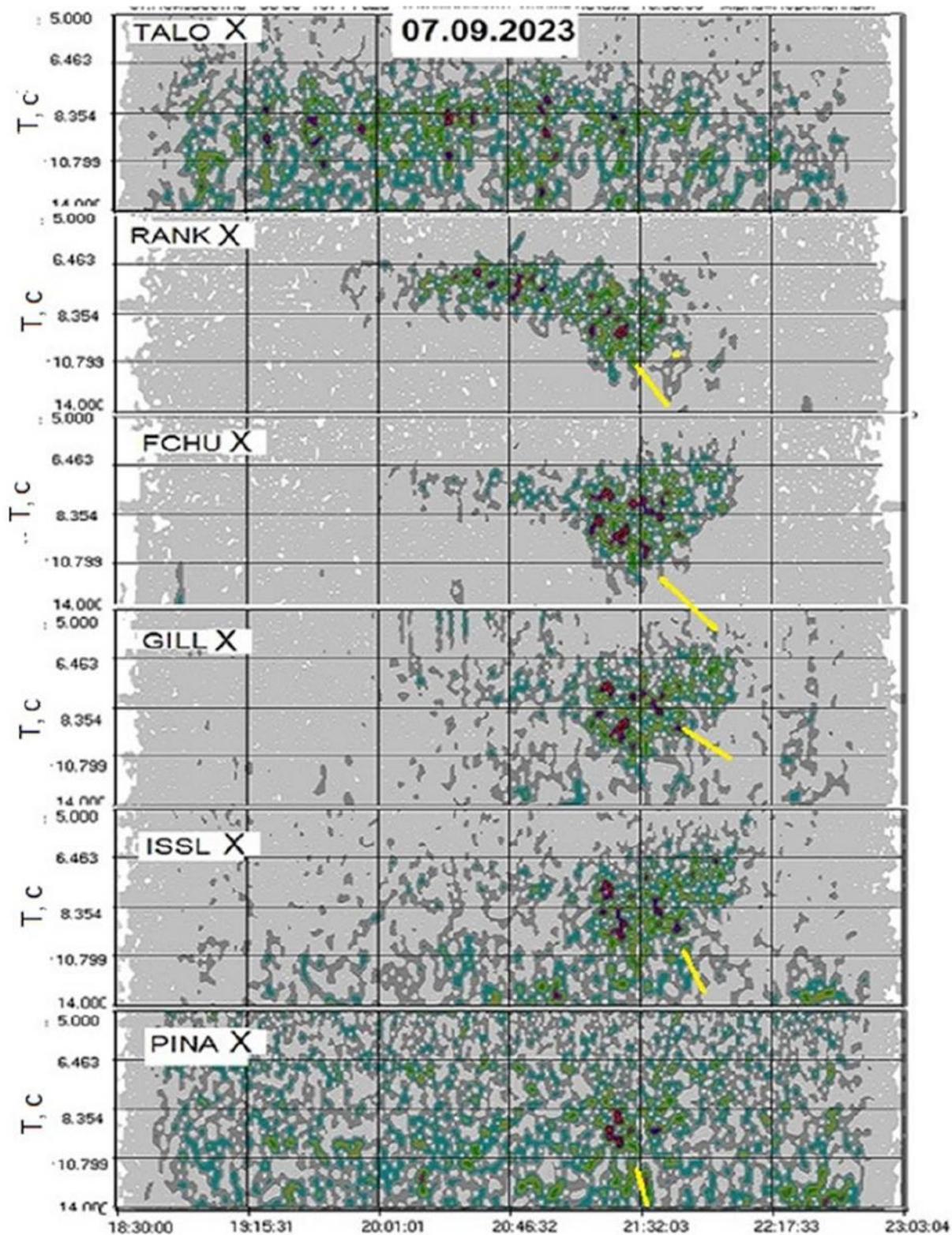


Рисунок 5. Динамические спектры шеврона Pc1 на меридиональной цепочке CARISMA. Шеврон Pc1 наиболее отчётливо виден на обсерватории FCHU. Здесь также видны усиленные по амплитуде элементы (жёлтая стрелка), которые развёрнуты по амплитуде – частоте на Рис. 6.

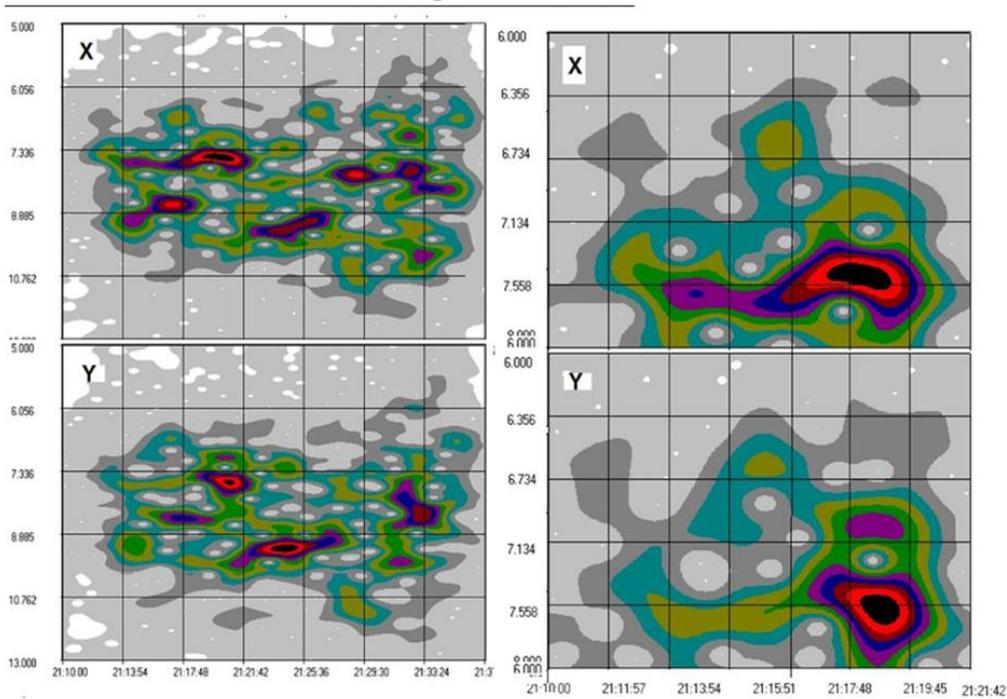


Рисунок 6. Тонкая структура участка шеврона Pc1 07.09.2023, выделенного жёлтыми прямоугольниками на рисунке 2б.

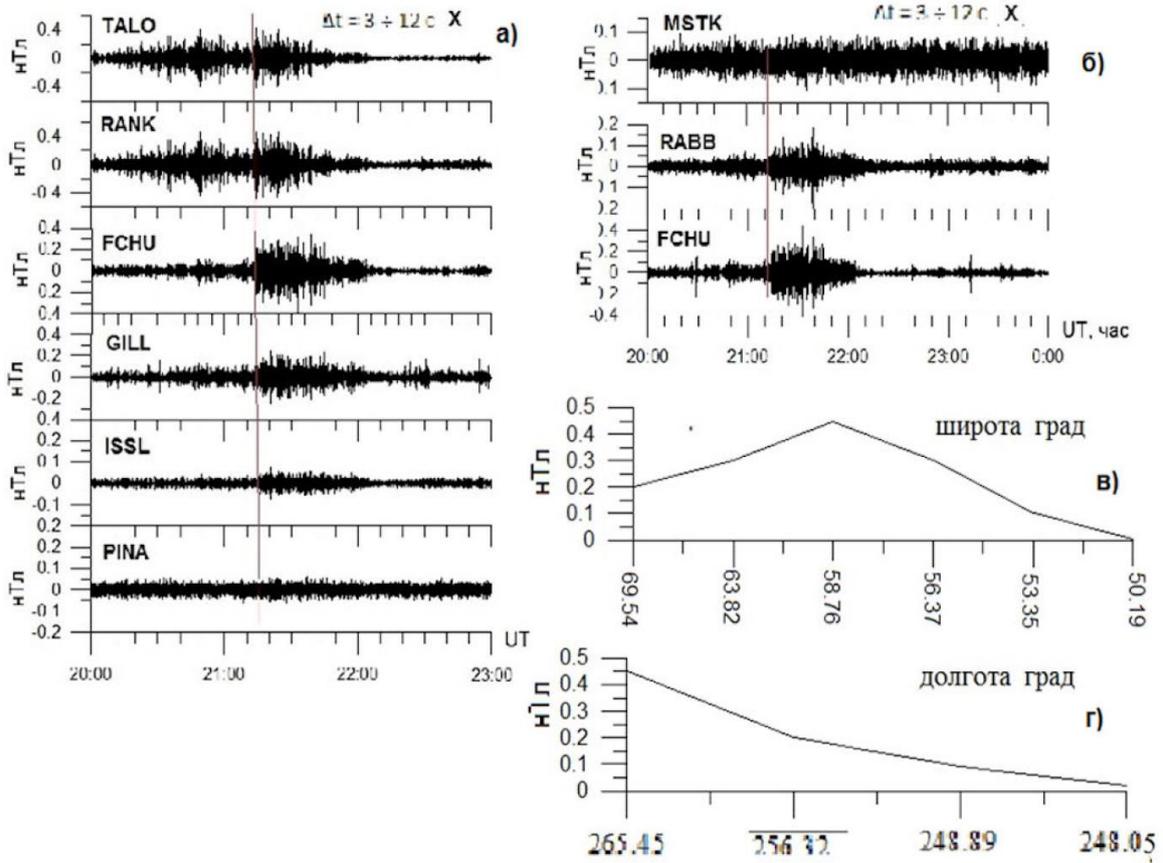


Рисунок 7. а) Вариации X- компоненты на сети обсерваторий CARISMA. а) фильтограммы широтной компоненты X на меридиональной цепочке; б) фильтограммы пульсаций на обсерваториях вдоль L оболочки $\sim 6 R_E$; в) широтный ход отфильтрованной амплитуды по X-компоненте; г) долготный ход амплитуды.



Рисунок 8. Локализация шеврона Pc1 (эллипс).

Параметры потоков плазмы и геомагнитного поля на спутнике THEMIS - D во время наблюдения шеврона на Земле

Во время регистрации шеврона спутники ТНВ и ТНС находились в солнечном ветре и зарегистрировали параметры СВ и ММП аналогичные параметрам, регистрируемым на спутнике Wind, что позволяет отождествить диамагнитную структуру, сохраняющуюся при распространении от орбиты Wind до орбиты Земли (Рис. 3а). Спутники ТНА, ТНВ и ТНС находились внутри магнитосферы и двигались с ночной стороны на дневную (Рис. 1). На Рис. 9 дано сопоставление регистрации потоков и температуры ионов, геомагнитного поля, распределение спектральной энергии ионов на спутнике ТНД, который находился на вечерней стороне магнитосферы в области близкой к области регистрации шеврона. высокочастотный потенциал спутника ТНА (а) и динамический спектр шеврона на обсерватории FCHU (б). Анализ спутниковых данных, представленных на Рис. 9, позволяет заключить, что во время наземной регистрации шеврона Pc1, плазмоид, вызвавший суббурю, достигает меридиана регистрации шеврона, о чём свидетельствуют измерения плазмы, магнитного и электрического полей на спутниках ТНА и ТНД. В интервале 20 – 22 UT (красный прямоугольник) на Рис. 9 видно возрастание концентрации ионов (от ~ 0.04 до 14 см^{-3}) (а), падению ионной температуры от $\sim 7000^\circ$ до 700° (б), возрастание потенциала спутника на $\sim 2\text{В}$ и резкое падение до 3.5 В (в), резкое возрастание потока энергии (г) и вариация магнитного поля (е). На спутнике ТНД в рассматриваемом интервале резко возрастают по амплитуде (0.05 В до $\sim 7 \text{ В}$) высокочастотные колебания электрического поля [Bonnell et al., 1981]. Результаты спутниковых наблюдений, вероятно, могут служить подтверждением предположения о локальном возмущении магнитосферы, совпадающем по времени с наблюдением шеврона Pc1.

Обсуждение и основные результаты

Воздействие диамагнитной структуры (ДС) солнечного ветра (СВ) на магнитосферу, вызывающее кратковременное (~ 10 минут) и резкое ($\sim 100 \text{ нТл/мин}$) усиление авроральной электроструи с резким броском тока к северу, приводит к генерации всплеска геомагнитных пульсаций типа Pc1 шеврон на западных, отстоящих по долготе на $\sim 100^\circ$ от центра суббури, обсерваториях. Излучение начинается на средней частоте $\sim 0.15 \text{ Гц}$ и остаётся на этом уровне в течение ~ 60 минут, а затем происходит одновременное нарастание до $\sim 0.2 \text{ Гц}$ и падение до $\sim 0.06 \text{ Гц}$. Этот частотный диапазон ниже характерных частот Pc1 и отличается от частоты шевронов, представленных в [Parkhomov et al., 1923]. Отмеченное расхождение в частотных диапазонах шевронов может служить основанием для предположения об одинаковом механизме генерации шевронов в результате циклотронной неустойчивости ионов радиационного пояса. Однако частота излучения зависит от сорта ионов. Для протонной ветви нижний диапазон частот составляет 0.2 Гц , а для более тяжёлых ионов (He^+ и O_2^+) нижняя граница частоты может достигать 0.1 Гц [Park et al., 2016].

На основании подобия шевронов на Рис. 2, можно предполагать, что возможной причиной генерации шеврона Pc1 является выброс суббуревоего плазмоида из хвоста магнитосферы и его дрейф в антиконвекционной струе на дневную сторону. Однако, учитывая частотный диапазон, следует назвать явление «шеврон Pc1-2».

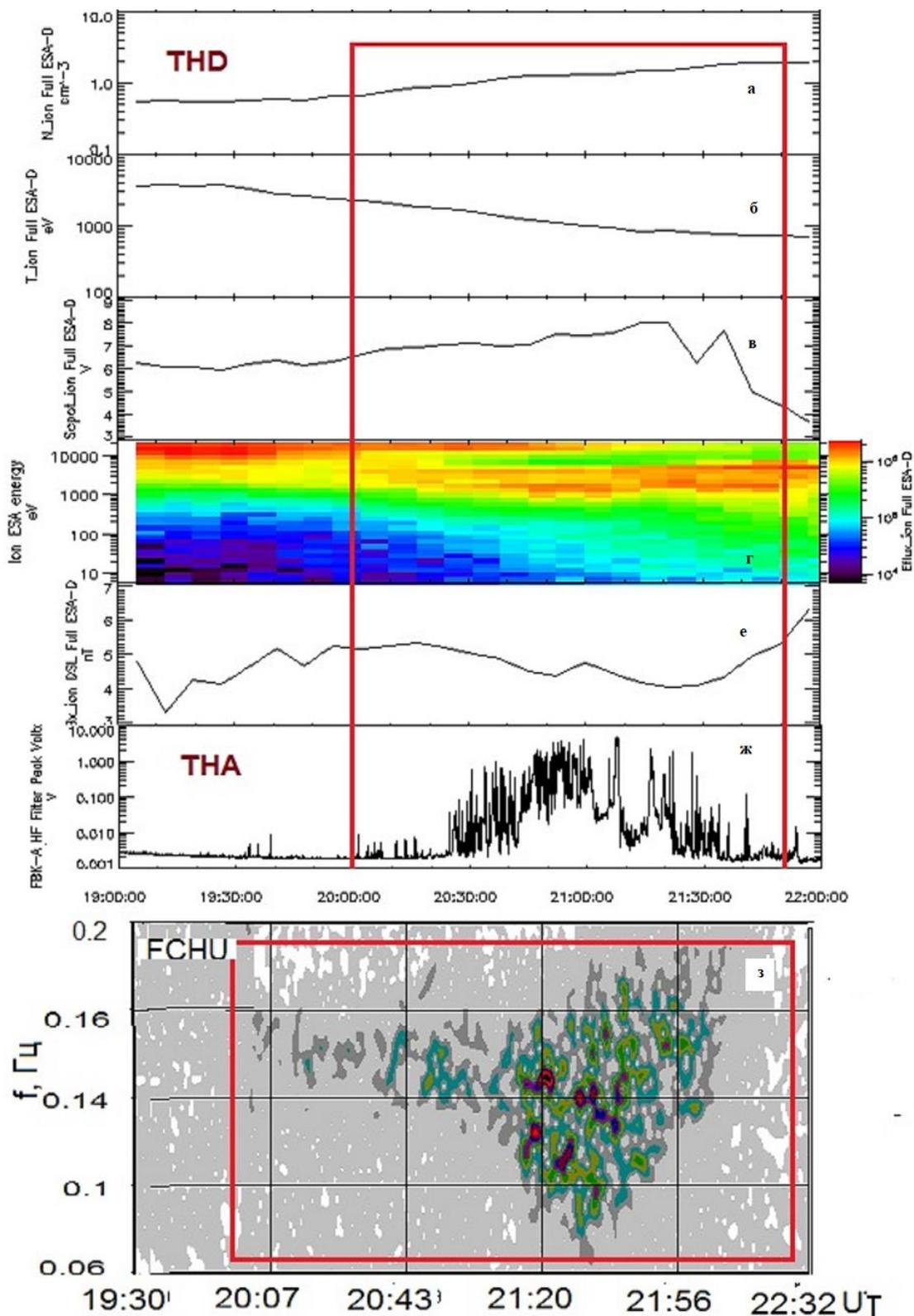


Рисунок 9. Сравнение наземных и спутниковых данных. Шеврон Pc1 на обсерватории FCC (Форт Черчилль) и данные со спутников THEMIS - A, -D (красный прямоугольник). Сверху вниз: а) вариация полной концентрации ионов магнитосферной плазмы; б) вариация общей энергии ионов; в) полный потенциал спутника в V; г) энергетическая спектрограмма потока ионов; е) вариация модуля геомагнитного поля в спутниковой системе координат; ж) вариации потенциала электрического поля спутника ТНА в частотном диапазоне 0 – 1 кГц; з) спектрограмма шеврона на обсерватории Форт Черчилль.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность NASA CDAWEB <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> за предоставление данных спутников Wind и THEMIS. Авторы благодарят руководителей, разработчиков приборов и руководителей экспериментов, проводимых на этих спутниках, за возможность использования данных. Авторы благодарят I.R. Mann, D.K. Milling и команду CARISMA за возможность использования данных магнитометров. <https://carisma.ca/carisma-data/data-use-requirements> is operated by the University of Alberta, funded by the Canadian Space Agency. Работа Еселевича В.Г. и Еселевича М.Г. выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16. Работа В.А. Пархомова выполнена в рамках госбюджетной темы ФГБОУ ВО «БГУ» на 2023–2025 гг. «Системный анализ и методы обработки информации».

Литература

- Акасофу И. Полярные и магнитосферные суббури. М., Мир, 371, 1971.
- Гульельми А.В. МГД - волны в околоземной плазме. М., Наука, 1979.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М., Наука, М. 1973
- Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Хомутов С.Ю., Цэгмэд Б. Магнитосферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой спорадического солнечного ветра. Солнечно-земная физика, 2021, Т. 7, № 3, с. 12-30.
- Сафаргалеев В.В., Терещенко П.Е., Пульсации герцового диапазона на фазе восстановления магнитной бури 7-8.09.2017 г. и связь их динамики с изменениями параметров межпланетной среды. Геомагнетизм и аэронавигация, 2019, Т. 59, № 3, с. 301–315.
- Bonnell J.W., Mozer F.S., Delory G.T., Hull A.J., Ergun R.E., Cully C.M., Angelopoulos V., Harvey P.R. The Electric Field Instrument (EFI) for THEMIS. Space Science Reviews, 2008, 141 (1), 303-341. doi:10.1007/s11214-008-9469-2
- Fukunishi H., Toya T., Koike K., Kuwashima M., Kawamura M. Classification of hydromagnetic emissions based on frequency-time spectra. Journal of Geophysical Research, 1981, 86 (A11), 9029-9039. <https://doi.org/10.1029/JA086iA11p09029>
- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O. Morphology and Physics of Short-Period Magnetic Pulsations. (Review). Space Science Reviews, 1998, 83, 435-512. <https://doi.org/10.1023/A:1005063911643>
- Lemair J.J. Plasmoid motion across a tangential discontinuity (with application to the magnetopause). Plasma Physics, 1985, 33(3), 425-436.
- Lemaire J. Impulsive penetration of filamentary plasma elements into the magnetospheres of the Earth and Jupiter. Planet. Space Sci., 1977, 25, 887–890. DOI:10.1016/0032-0633(77)90042-3
- Lundin R., Sauvaud A., Reme H. et al. Evidence for impulsive solar wind plasma penetration through the dayside magnetopause. Annales Geophysicae, 2003, 21, 457–472.
- Marmet P. New digital filter for the analysis of experimental data. Rev. Sci. Instrum., 1979, 50(1), 79-83.
- Parkhomov V.A., Tsegmed B., Dovbnya B.V., Khomutov S.Y., Eselevich V.G., Glinskyi I.Y. Pc1 hydromagnetic emissions of chevron type. Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences, 2023, 63(04), 1–15. <https://doi.org/10.5564/pmas.v63i04.3430>
- Park J.-S., Kim K.-H., Shiokawa K., Lee D.-H., Lee E., Kwon H.-J., Jin H., Jee G. EMIC waves observed at geosynchronous orbit under quiet geomagnetic conditions ($K_p \leq 1$). J. Geophys. Res. Space Physics, 2016, 121, 1377–1390. <https://doi.org/10.1002/2015JA021968>
- Safargaleev V.V., et al. Bursts of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure. Annales Geophysicae, 2002, 20, 1751–1761.
- Saito T. Geomagnetic pulsations. Space Sci. Rev., 1969, 10(3), 319-412.