

УДК 550.385.37

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ $Pc5$ НА ДВУМЕРНОЙ СЕТИ СТАНЦИЙ

© 2024 г. Ю. А. Копытенко¹, В. С. Исмагилов¹

¹Санкт-Петербургский Филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В.Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), С.-Петербург, Россия

*e-mail: office@izmiran.spb.ru

Поступила в редакцию 01.11.2024 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 23.05.2024 г.

По данным двумерной сети IMAGE и магнитным станциям, расположенным на территории России проведено детальное исследование геомагнитных пульсаций $Pc5$ с частотой ~ 2.8 мГц, возникших в послеполуночном секторе на фоне магнитной бури 27.08.2014 г., которой предшествовал 5 – суточный период с низкой магнитной активностью. В двух временных интервалах – в начале бури и в период максимальной магнитной активности построены мгновенные двумерные распределения амплитуд магнитного поля $Pc5$ на земной поверхности. Установлено, что ионосферные источники $Pc5$ (холловские токовые вихри) имеют эллиптическую форму с большей осью в направлении юг–север. В начале магнитной бури выявлен одиночный всплеск пульсаций $Pc5$, центр источника которого располагался на геомагнитной широте $\sim 67.5^\circ$ ($L \sim 6.8$ Re) и смещался в западном направлении со скоростью ~ 0.7 км/с. Оценка размеров этого ионосферного источника составляет ~ 150 км в направлении запад–восток и ~ 330 км в направлении юг–север. В максимальный период магнитной бури пульсации $Pc5$ создаются двумя ионосферными источниками, следующими друг за другом. Эти ионосферные источники имеют более вытянутый эллиптический вид с размерами осей в направлении запад–восток ~ 250 км и в направлении юг–север ~ 670 км. Центры этих источников сместились на 4° к более южной геомагнитной широте $\sim 63.5^\circ$ ($L \sim 5$ Re) и перемещались в западном направлении со скоростью ~ 1.7 км/с. Приведены оценки размеров магнитной силовой трубки, в которой возникли резонансные МГД волны, и скорости её перемещения в экваториальной плоскости магнитосферы.

Ключевые слова: $Pc5$ геомагнитные пульсации, ионосферные источники $Pc5$.

DOI: 10.31857/S0016794024060126, **EDN:** QOBDCO

1. ВВЕДЕНИЕ

Длиннопериодные геомагнитные пульсации $Pc5$ являются квазисинусоидальными колебаниями геомагнитного поля и занимают диапазон периодов от 150 до 600 с. Изучение этих пульсаций проводится давно [Троицкая, 1956], но и в последние годы исследованиям $Pc5$ посвящено много работ, например, [Большакова и др., 1994; Trivedi et al., 1997; Клейменова и Козырева, 2005a; Kleimenova et al., 2005b; Lee et al., 2007]. Интерес к этим пульсациям обусловлен также тем, что $Pc5$ могут иметь глобальный характер [Потапов и др., 2008].

В качестве основного механизма генерации $Pc5$ обычно рассматривается основная резонансная мода МГД волн на геомагнитных силовых

линиях [Southwood, 1974; Пудовкин и др., 1976]. В работе [Chen and Hasegawa, 1974; Yumoto and Saito, 1980] рассматривается возбуждение поверхностных волн, возникающих на магнитопаузе, вследствие развития неустойчивости Кельвина–Гельмгольца при обтекании флангов магнитосферы плазмой солнечного ветра. Энергия этих волн передается во внутреннюю магнитосферу и возбуждает резонансные МГД колебания. Возможные механизмы генерации глобальных пульсаций $Pc5$ подробно обсуждались в ряде работ [Trivedi et al., 1997; Клейменова и Козырева, 2005a; Клейменова и Козырева, 2005b; Lee et al., 2007]. В авроральной зоне пульсации $Pc5$ могут достигать амплитуд в десятки и сотни нТл. В работе [Kleimenova et al., 2005a] в послеполуночном секторе предположительно обнаружены две раз-

несенные по широте зоны, в которых одновременно наблюдались пульсации $Pc5$.

Модель для описания поля геомагнитных пульсаций $Pc5$ на земной поверхности в виде токовых колец, перемещающихся в ионосфере в долготном направлении, впервые представлена в статье [Оберц, Распопов, 1968]. Модель с продольными токами для альфвеновской волны предложена в [Ляцкий, Мальцев, 1983]. В работе [Tagirov, Ismagilov, 1989] для объяснения особенностей геомагнитных возмущений $Pc5$ представлена модель в виде пары продольных токов (втекающий и вытекающий), создающих в ионосфере два ионосферных вихря, образованных холловскими токами.

В работах [Pilipenko et al., 2001; Pilipenko et al., 2002] крупномасштабное поведение квазистационарной магнитной активности, высыпаний энергичных частиц и их вариации в диапазоне $Pc5$ во время основной фазы интенсивной магнитной бури изучается с использованием

данных сети магнитных и риометрических станций в Северном полушарии.

В данной работе детально исследуются мгновенные двумерные пространственные распределения амплитуд пульсаций $Pc5$ на земной поверхности, построенные по данным большого количества магнитных станций. Эти распределения используются для оценки размеров, местоположения проекции источника $Pc5$ на земную поверхность и фазовой скорости его перемещения. Оценка местоположения и размеров источников $Pc5$ в экваториальной плоскости магнитосферы определяется в рамках моделей [Оберц, Распопов, 1968], [Ляцкий, Мальцев, 1983], [Tagirov, Ismagilov, 1989].

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для исследования событий $Pc5$ использованы данные 36 трехкомпонентных магнитных станций двумерной сети IMAGE и станций, расположенных на территории России (Лехта – LEX,

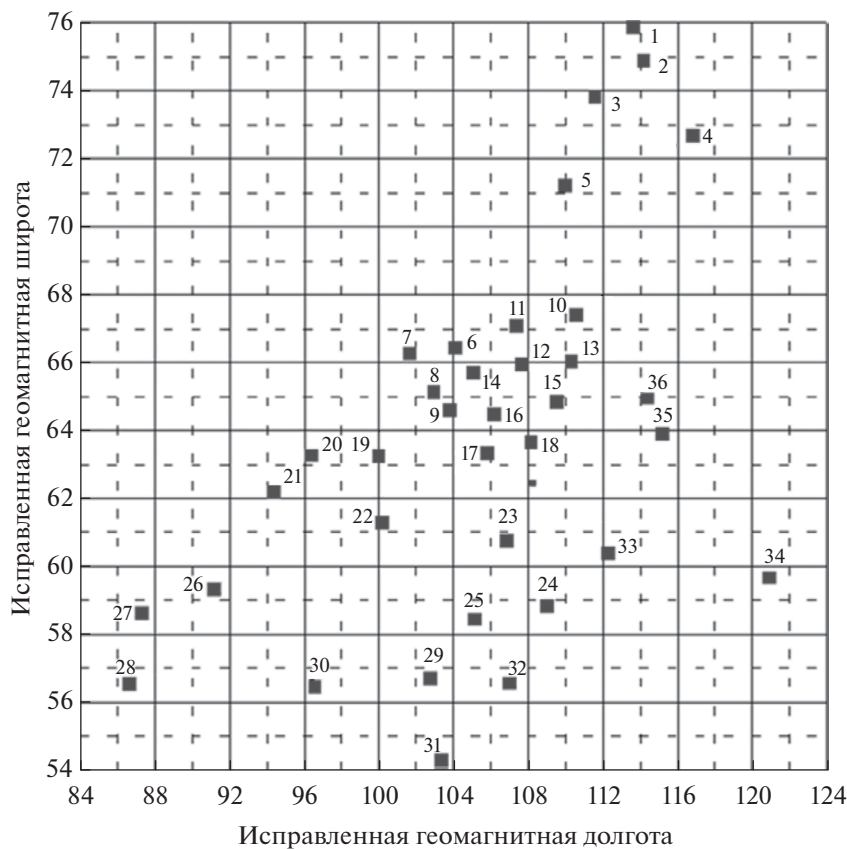


Рис. 1. Расположение трехкомпонентных магнитных станций двумерной сети IMAGE и 4 станции, расположенные на территории России:

LEX – Лехта, KAP – Карпогоры, LOV – Ловозеро, LOP – Лопарская.

Карпогоры – КАР, Ловозеро – LOV, Лопарская – LOP). Расположение магнитных станций показано на рис. 1 в исправленных геомагнитных координатах (Норильск – $\varphi_m = 64.1^\circ$, $\lambda_m = 161.6^\circ$ находится за пределами рисунка). Ст. Лехта (Карелия, $\varphi_m = 60.2^\circ$, $\lambda_m = 112.1^\circ$) работала временно в период экспериментальных работ СПбФ ИЗМИРАН. Магнитные станции на рис. 1 расположены в интервале исправленных геомагнитных широт $\varphi = 54^\circ$ – 78° и долгот $\lambda = 85^\circ$ – 121° . Временное разрешение данных на пяти самых высокоширотных станциях (рис. 1) составляло 10 с, на остальных станциях – 1 с.

На рис. 2 слева представлены магнитограммы X -компоненты исходного магнитного поля, зарегистрированного на 5 магнитных станциях, расположенных вдоль геомагнитной широты $\sim 64^\circ$. Мы наблюдаем начало умеренной магнитной бури около локального полудня (отмеченного вертикальными стрелками) на всех 5 станциях и через ~ 5 часов достигается максимальная величина поля. Справа на рис. 2 представлена Y -компонента магнитного поля для 5 магнитных станций, расположенных вдоль геомагнитной широты, близкой, как будет показано далее, к широте расположения центров ионосферных источников $Pe5$. На этой широте Y -компонента магнитного поля превосходит X -компоненту.

Предварительная обработка данных заключалась в фильтрации данных полосовым КИХ

фильтром (фильтр с конечной импульсной характеристикой) в диапазоне периодов $T = 320$ – 400 с. Затем определялись мгновенные значения трех компонент магнитного поля для каждой станции в координатах φ_m , λ_m и с шагом 2 минуты строились двумерные распределения амплитуд.

Для определения проекции на земную поверхность положения ионосферного источника $Pe5$ использовалась модель в виде двух токовых колец, расположенных рядом. В двух кольцах, составляющих ионосферный источник, текут переменные холловские токи (с частотой $Pe5$) противоположного направления. В этой модели максимальная или минимальная величина (в зависимости от направления тока в кольце) вертикальной Z -компоненты магнитного поля кольцевого тока располагается на земной поверхности на пересечении осей кольца. В центральной части источника, где токовые кольца соприкасаются, а также на западной и восточной частях кольца, ток течет в одном направлении и на земной поверхности будут наблюдаться три экстремума Y -компоненты, причем центральный экстремум будет противоположного знака с западным и восточным экстремумами, а в X -компоненте – 4 экстремума, по паре над северной и под южной частью колец.

Фазовую скорость движения источника (его проекции на земную поверхность) можно оценить, используя рис. 3. Для этого необходимо определить смещение изображения экстремумов

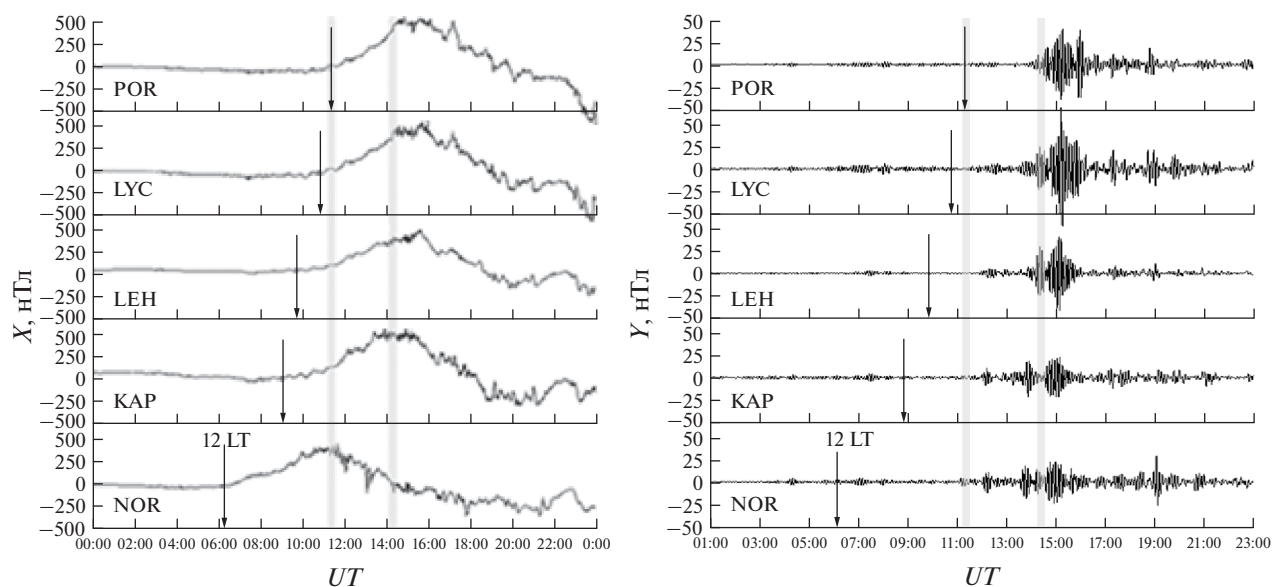


Рис. 2. Вариации H -компоненты на 5 магнитных станциях, расположенных вдоль геомагнитной широты 64° (слева) и вариации D -компоненты $Pe5$ в диапазоне периодов $T = 320$ – 400 с (справа), 27.08.2014 г. Штрихованные полосы – интервалы для построения двумерных распределений амплитуд компонент магнитного поля на земной поверхности. Вертикальные стрелки отмечают локальный полдень.

амплитуды двумерного распределения в вертикальной последовательности кадров. На рис. 3 в распределениях Y - и Z -компонент поведены линии белого цвета, соединяющие экстремумы распределений, последовательно смещающихся по долготе в западном направлении. Переводя смещение в км и зная время, за которое это смещение произошло можно оценить фазовую скорость движения источника

$$V = 111.1 \Delta\lambda / \Delta t. \quad (1)$$

Здесь V (км/с) – фазовая скорость движения ионосферных токовых вихрей в западном направлении,

$\Delta\lambda$ (градусы геомагнитной долготы) – смещение экстремумов Z -компоненты (центры токовых вихрей в западном направлении),

Δt (с) – время, за которое ионосферные токовые вихри сместились на $\Delta\lambda$. Временной интервал между последовательными кадрами на рис. 3 составляет 120 с.

Постоянный коэффициент 111.1 равен длине экваториальной дуги окружности в 1 градус при радиусе земли $R_E = 6371$ км.

Оценить размер источников на земной поверхности в западно–восточном направлении (X) можно по расстоянию между экстремумами Z -компоненты (центры токовых вихрей) на кадрах рис. 3. Оценка размера источников на земной поверхности в южно–северном направлении (Y) определяется по расстоянию между экстремумами H -компоненты:

$$X = 111.1 \Delta\lambda_m \cos(\varphi_{ms}), \quad Y = 111.1 \Delta\varphi_m, \quad (2)$$

где X (км) – размер источника в направлении запад–восток,

Y (км) – размер источника в направлении юг–север,

$\Delta\lambda_m$ – размер источника в градусах геомагнитной долготы,

φ_{ms} – геомагнитная широта центра источника,

$\Delta\varphi_m$ – размер источника в градусах геомагнитной широты.

111.1 – постоянный коэффициент равный длине экваториальной дуги окружности в 1 градус при радиусе земли $R_E = 6371$ км.

Для пересчета оценок размеров источников и их местоположения в экваториальной плоскости магнитосферы используется формула для магнитного поля земного диполя – параметр Мак-Илвейна

$$L = R_E / \cos^2(\varphi_m), \quad (3)$$

где φ_m – геомагнитная широта.

Предполагается также, что размеры источника и величина фазовой скорости его движения в экваториальной плоскости магнитосферы пропорциональны L .

Для определения положения плазмопаузы в околополуденное локальное время используется формула

$$L_{ppi} = A + B Kp(max), \quad (4)$$

где L_{ppi} – положение плазмопаузы в R_E , $Kp(max)$ – максимальное значение 3-часового Kp -индекса магнитной возмущенности в предыдущие 12 часов. Параметры A и B для соответствующего временного интервала определяются из таблицы в [Moldwin et al, 2002].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В послеполуденном секторе на европейской территории на фоне магнитной бури 27.08.2014 г. наблюдались всплески геомагнитных пульсаций

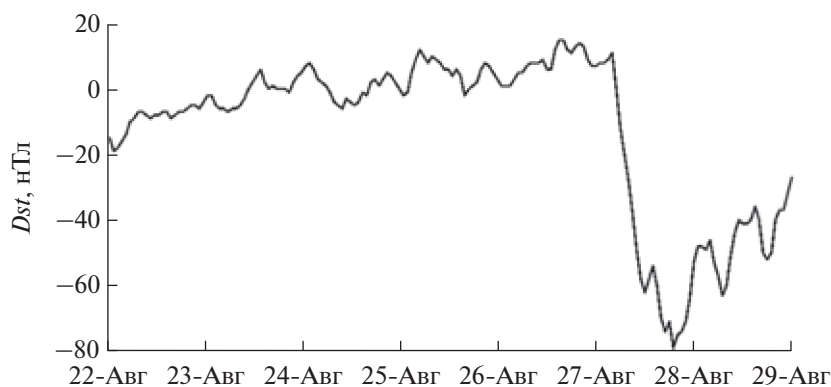


Рис. 3. Изменения Dst -индекса за период 22.08 – 28.08.2014 г.

Pc5 с амплитудами до 100 нТл. Исследуемые события *Pc5* с периодом $T \sim 360$ с (~ 2.8 мГц) возникли после 5-суточного периода спокойной магнитной обстановки и, вероятно, имеют глобальный характер, т.к. наблюдались также и на более восточной станции Норильск ($\lambda_m = 161.6^\circ$).

В течение периода 22–27.08.2014 г. индекс D_{ST} изменялся от небольших отрицательных значений 22.08 до небольших положительных 23–26.08.2014 г., а 27.08 с момента времени 03 UT уменьшился до -79 нТл в 19:00 UT (рис. 3). Трехчасовой индекс Kp имел 22–26.08.2014 г. значения не выше 1+, 27.08.2014 г. начал возрастать и достиг значения 4– в период 15–18 UT.

Значения часовых *AE*-индексов начали расти со скачка *AE* с 70 до 201 в период 02 – 03 UT 27.08.2014. Максимального значения (1075) *AE*-индекс достиг в период 14–16 UT 27.08.2014, что совпадает с временем возникновения всплесков *Pc5* с максимальной амплитудой (рис. 2, пра-

вая часть). На станциях, отмеченных на рис. 1, величина магнитного поля начала возрастать после 12 LT.

На рис. 4 представлены мгновенные двумерные распределения на земной поверхности мгновенных значений амплитуд *H*-, *D*- и *Z*-компонент *Pc5* вариаций магнитного поля. Используются данные 36 магнитных станций, показанных на рис.1. Область, в которой построены двумерные распределения занимает интервал геомагнитных широт $54^\circ - 78^\circ$ и долгот $86^\circ - 121^\circ$. Мгновенные значения амплитуд *Pc5* нормированы на максимальную амплитуду, определенную по всей двумерной сети в моменты времени указанные на рисунке. Нормировка удобна тем, что позволяет сравнивать цветовую палитру на рисунке в различных кадрах.

Для построения распределений с шагом 2 минуты выбраны интервалы времени 11:12–11:26 UT (левая панель рис. 4, интервал 1) и 14:16–14:30 UT (правая панель рис. 4, интервал 2) 27.08.2014 г.

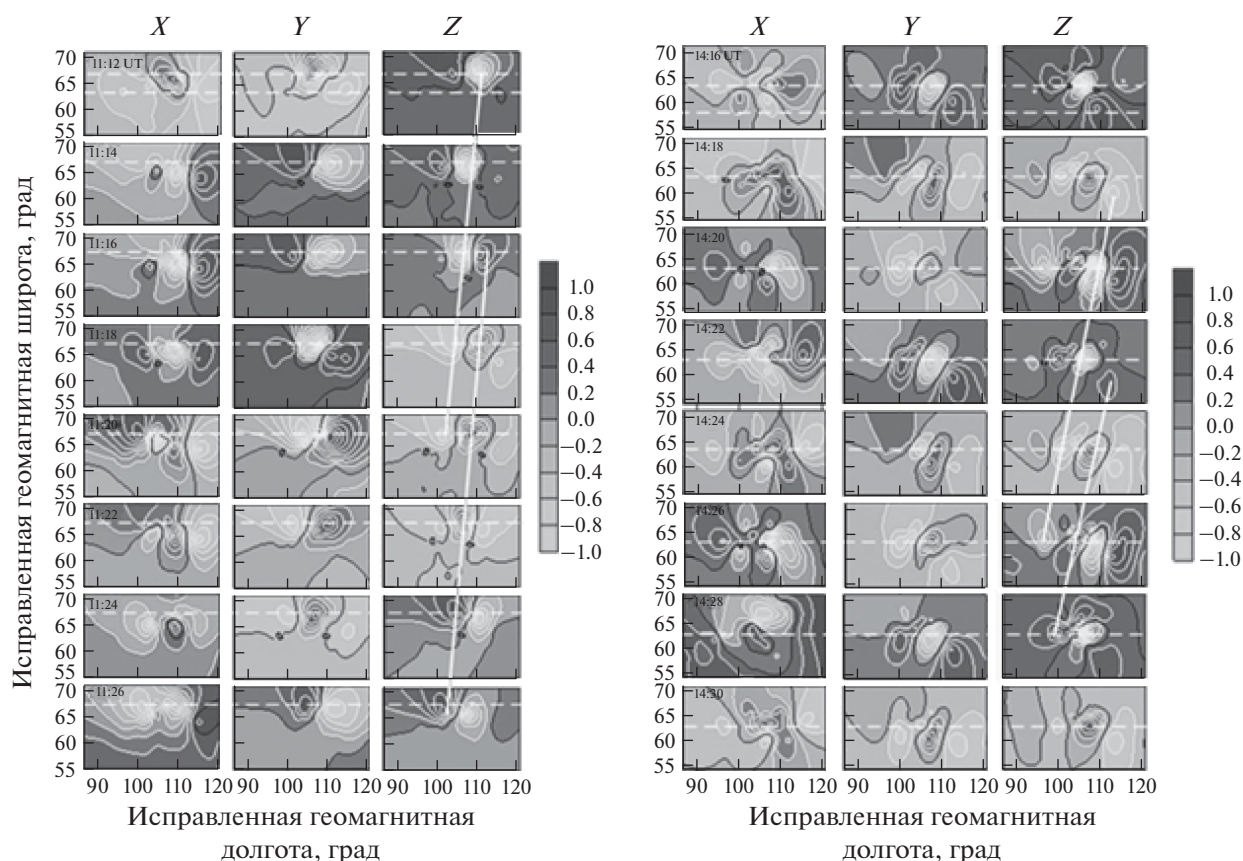


Рис. 4. Мгновенные двумерные распределения амплитуд *H*-, *D*- и *Z*-компонент пульсаций *Pc5* в интервалы времени 11:12–11:26 UT (слева) и 14:16–14:30 UT (справа) 27.08.2014 г.

Белые пунктирные линии – проекция плазмоспаузы (нижняя на верхних кадрах) и геомагнитная широта центров источников *Pc5*. Наклонные белые линии соединяют экстремумы распределений.

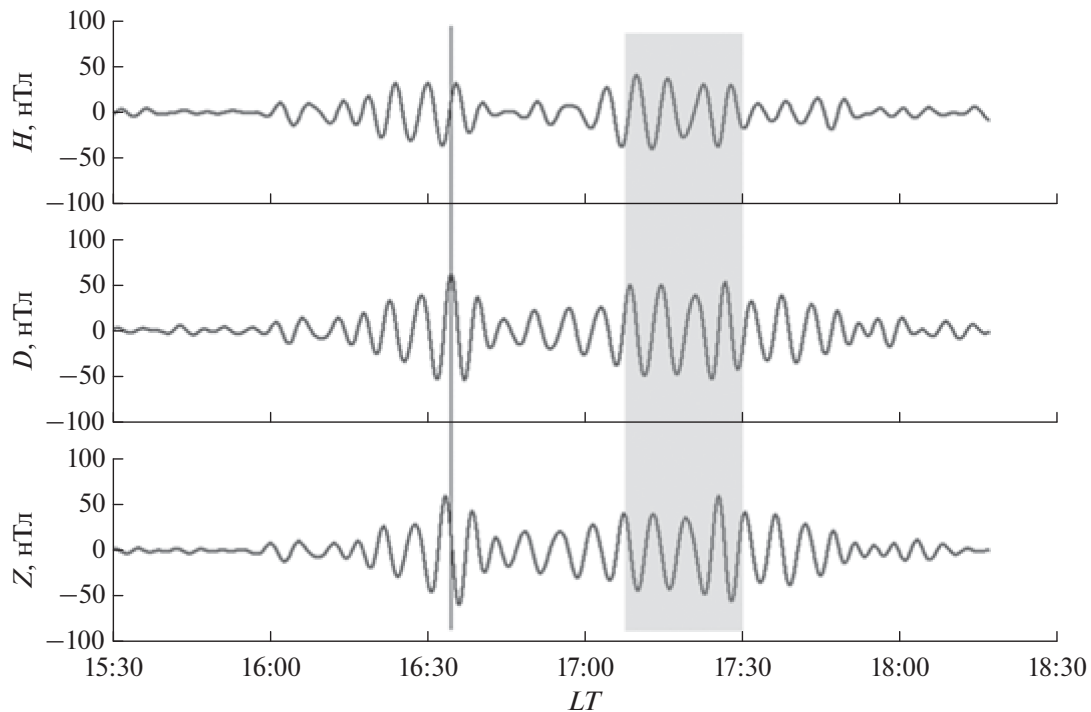


Рис. 5. Магнитограммы трех компонент вариаций магнитного поля 15:30–18:30 LT 27.08.2014 г. п. Лехта фильтрованные в диапазоне периодов $T=320 - 400$ с. Затененной полосой отмечен интервал 14:16–14:30 UT 27.08.2014 г.

Заштрихованные полосы на рис. 2 отмечают эти интервалы времени. Первый временной интервал соответствует началу магнитной бури, второй — попадает на время близкое к максимальному значению магнитного поля. Изолинии черного цвета на рис. 4 отмечают нулевые значения амплитуды вариаций *Pc5*. Поскольку *Pc5* имеют период ~ 6 мин, то на рис. 4 в каждой из компонент можно видеть близкое совпадение двумерных распределений с шагом 6 мин (3 кадра). Отметим, что вследствие неполного заполнения магнитными станциями северо-западной и юго-восточной области исследования мы не видим на некоторых кадрах рис. 4 симметричных картинок. На вид построенных пространственных распределений амплитуд *Pc5* влияет не только магнитное поле ионосферных источников, а также геоэлектрические особенности земной коры, неоднородности ионосферы и неполная компенсация магнитного поля биркеландовских токов из-за наклона магнитных силовых линий.

На рис. 5 сравнивается более ранний всплеск *Pc5* (возникший в период роста магнитной возмущенности) со всплеском в исследуемом 14-мин. интервале 14:16–14:30 UT (заштрихованная область на рисунке).

4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Двумерные распределения компонент магнитного поля на земной поверхности (рис. 4), по-видимому, созданы вихревыми холловскими токами, которые перемещаются в ионосфере в западном направлении. Такая модель для описания поля геомагнитных пульсаций *Pc5* впервые представлена в статьях [Оберц, Распопов, 1968], [Tagirov, Ismagilov, 1989]. Пара вихревых ионосферных холловских токов создается парой продольных токов (втекающий и вытекающий) [Ляцкий, Мальцев, 1983] связанных ионосферными педерсеновскими токами, величина которых меняется с частотой *Pc5*. Магнитное поле педерсеновских токов компенсируется магнитным полем продольных токов, (предполагаем, что *Z*-компонента ортогональна земной поверхности), ионосферу считаем однородной. Эта упрощенная модель объясняет пространственное распределение магнитного поля *Pc5* и фазовые сдвиги между магнитными компонентами на земной поверхности.

Нижняя пунктирная линия на верхних кадрах 11:12 UT и 14:16 UT отмечает расположение плазмоспаузы. В географических координатах используемая двумерная сеть магнитных станций расположена на широтах $\varphi = 58^\circ - 78^\circ$ N и в диапазо-

не долгот $\lambda = 5^\circ - 45^\circ$ E. Центр ионосферных источников *Pc5* расположен на $\sim 30^\circ$ E (рис. 4). Локальное время центра источников, следовательно, составляет $LT = UT + 2$. Для момента 11:12 UT локальное время соответствует $LT = 01$ и попадает в интервал 09–15 LT в табл. 1 из работы [Moldwin et al, 2002], а для момента 14:16 UT–16 LT – в интервал 15–21 LT. Индекс $Kp(\max) = 4-$ в обоих случаях. Используя выражение (4), определяем положение плазмопаузы в экваториальной плоскости магнитосферы $L_{ppi} = 4.5 R_E$ для момента 11:12 UT, что соответствует $\varphi_m \sim 63^\circ$ на левой части рис. 4 и $L_{ppi} = 3.7 R_E$ для момента 14:16 UT что соответствует $\varphi_m \sim 57^\circ$ на правой части рис. 4.

На всех кадрах рис. 4 проведена пунктирная линия (положение центра ионосферного источника), прошедшая через экстремумы *D*- и *Z*-компонент и между экстремумами *H*-компоненты по геомагнитным широтам $\varphi_m \sim 67.5^\circ$ слева и $\varphi_m \sim 63.5^\circ$ справа на рис. 4.

Для определения параметров $\Delta\varphi_m$, $\Delta\lambda_m$, X , Y , $\Delta\lambda$ и V в табл. 1 на рис. 4 через экстремумы в амплитудных распределениях *Z*- и *D*-компонентах проведены наклонные линии белого цвета (через 4 кадра, $\Delta t = 360$ с) для интервала времени 11:20–11:26 UT на левой части рис. 4 и интервала времени 14:18–14:26 UT на правой части рисунка ($\Delta t = 480$ с). Методика получения оценок параметров изложена в разделе 2, формулы (1) – (4).

На рис. 4 (левая панель) отчетливо видно смещение двумерных распределений одного ионосферного источника в западном направлении. Средняя оценка скорости движения источников дает ~ 0.7 км/с. На правой панели рис. 4 во 2 интервале времени 14:16–14:30 UT (максимум магнитной бури) мы наблюдаем двумерные распределения магнитного поля, созданные двумя ионосферными источниками. Оба ионосферных источника имеют близкие параметры, но их центры, определенные по экстремумам *Z*-компоненты сдвинуты по долготе на $\sim 12^\circ$ ($\sim 0.2 R_E$ в пересчете на экваториальную плоскость магнитосферы). Средняя оценка скорости движения источников дает ~ 1.7 км/с.

В табл. 1 приведены оценки параметры источников *Pc5* для двух интервалов времени 11:12 – 11:16 UT 27.08.2014 (начало магнитной бури) и 14:16 – 14:30 UT 27.08.2014 (максимум магнитной бури).

Как видно из табл. 1, холловские токовые вихри имеют эллиптическую форму, сильно вытянутую с юга на север. В ходе усиления магнитной бури в экваториальной плоскости магнитосферы произошло смещение на $\sim 1.8 R_E$ к Земле магни-

тосферных источников *Pc5* (силовая магнитная трубка с резонансными МГД волнами) и увеличение размеров источника в направлении юг – север. Необходимо отметить, что взаимное наложение магнитных полей двух следующих друг за другом источников *Pc5* (интервал 14:16–14:30 UT) ухудшает точность оценок.

Таблица 1. Оценки параметров источников *Pc5*

Параметр	11:12 – 11:16 UT	14:16 – 14:30 UT
φ_{lpp} , град	63	57
L_{lpp}, R_E	4.7	3.6
φ_{ms} , град	67.5	63.5
Lc, R_E	6.8	5
$\Delta\lambda_m$, град	3	6
X , км	150	250
L_x, R_E	0.16	0.2
$\Delta\varphi_m$, град	3	6
Y , км	330	670
L_y, R_E	1.6	2.1
Δt , сек	360	360
$\Delta\lambda$, град	6	12
V , км/с	0.7	1.7
V_m , км/с	4.8	8.5

Примечание.

φ_{lpp} – геомагнитная широта проекции плазмопаузы;

L_{lpp} – *L* оболочка плазмопаузы;

Lc – *L* оболочка центра источника *Pc5*;

$\Delta\lambda_m$ – размер источника *Pc5* в градусах геомагнитной долготы;

X – размер источников в направлении запад–восток;

L_x – размер источников в направлении запад–восток в пересчете на экваториальную плоскость магнитосферы;

$\Delta\varphi_m$ – размер источника *Pc5* в градусах геомагнитной широты;

Y – размер источника *Pc5* в направлении юг–север;

L_y – размер источника *Pc5* в направлении юг–север в пересчете на экваториальную плоскость магнитосферы;

Δt – время, за которое ионосферные токовые вихри сместились на $\Delta\lambda$;

$\Delta\lambda$ – смещение экстремумов *Z*-компоненты (центры токовых вихрей в западном направлении);

V – фазовая скорость движения источника *Pc5* в западном направлении;

V_m – фазовая скорость движения источника *Pc5* в западном направлении в пересчете на экваториальную плоскость магнитосферы.

На рис. 5 представлены магнитограммы трех компонент вариаций магнитного поля зарегистрированные в п. Лехта (станция 33 на рис. 1) в интервале времени 15:30–18:30 LT 27.06.2014 г. (14:16–14:30 UT). Данные отфильтрованы в том же диапазоне периодов $T = 320 - 400$ с. Отмечен интервал 14:16–14:30 UT исследуемый на рис. 4. На рисунке видно, что всплеск $Pc5$ возникший около 13:05 UT на фазе роста магнитной бури, имеет колоколообразную форму присущую резонансным колебаниям, созданным одним источником. А в интервале 14:16–14:30 UT мы видим наложение магнитного поля двух источников, что подтверждает вывод о двух источниках, следующих друг за другом, сделанный по двумерным распределениям. Магнитные поля двух близких ионосферных источников на земной поверхности складываются, что приводит к сбою фазы и изменению видимого периода $Pc5$ (например, момент 14:20 UT на рис. 5). На рис. 5 (первый всплеск $Pc5$) проведена вертикальная линия, которая позволяет увидеть фазовый сдвиг на четверть фазы между компонентами поля. Это означает, что ионосферный источник не является точечным, для которого компоненты поля на земной поверхности должны находиться в фазе или в противофазе. Для объяснения наблюдаемых фазовых сдвигов хорошо подходит модель в виде токовых ионосферных вихрей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено детальное исследование геомагнитных пульсаций $Pc5$, возникших в послеполуденном секторе на фоне умеренной магнитной бури 27.08.2014 г., которой предшествовал 5-ти суточный период с низкой магнитной активностью. Для исследования магнитного поля $Pc5$ на земной поверхности использованы данные двумерной сети IMAGE и магнитных станций, расположенных на территории России (всего – 36 станций). В двух временных интервалах – в начале бури и в период максимальной величины магнитного поля бури построены мгновенные двумерные распределения компонент магнитного поля $Pc5$ на земной поверхности использованы.

В первом временном интервале (начало бури) по двумерным распределениям магнитного поля на земной поверхности выявлен один всплеск пульсаций $Pc5$. Определено, что центр источника расположен на геомагнитной широте 67.5° ($L_c \sim 6.8 R_E$) и смещается в западном направлении со скоростью ~ 0.7 км/с, а в магнитосфере на $L \sim 6.8 R_E$ скорость перемещения источника $Pc5$ составляет ~ 4.8 км/с. Определено, что ионосфер-

ный источник (пара холловских токовых вихрей) имеет эллиптический вид с размерами осей ~ 150 км в направлении юг–север и ~ 330 км в направлении запад–восток ($\sim 0.16 R_E$ и $\sim 1.6 R_E$ в экваториальной плоскости магнитосферы).

Во втором временном интервале (максимум бури) по двумерным распределениям магнитного поля на земной поверхности выявлено, что всплеск пульсаций $Pc5$ создан двумя ионосферными источниками, следующими друг за другом. На рис. 4 видно, что наличие двух близких ионосферных источников приводит к наложению магнитных полей источников, наблюдается к сбой фазы $Pc5$ и изменение видимой частоты. Определено, что эти ионосферные источники имеют более вытянутый эллиптический вид с осями запад–восток ~ 250 км и юг – север ~ 670 км ($\sim 0.2 R_E$ и $\sim 2.1 R_E$ в экваториальной плоскости магнитосферы). Центры источников расположены на геомагнитной широте 63.5° ($L \sim 5 R_E$) и смещаются в западном направлении со скоростью ~ 1.7 км/с, а в магнитосфере на $L \sim 5 R_E$ скорость перемещения источника составляет ~ 8.5 км/с.

В ходе усиления магнитной бури в экваториальной плоскости магнитосферы произошло смещение магнитосферных источников $Pc5$ на $\sim 1.8 R_E$ к Земле (силовая магнитная трубка с резонансными МГД волнами) и увеличение размеров источника. Область генерации $Pc5$ находится севернее плазмопаузы, вероятно, в районе южной кромки авроральной зоны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим институты, которые обслуживают массив магнитометров IMAGE: Геофизическую обсерваторию Тромсе UiT Арктического университета Норвегии (Норвегия), Финский метеорологический институт (Финляндия), Институт геофизики Польской академии наук (Польша), Немецкий исследовательский центр Геонаук GFZ (Германия), Геологическую службу Швеции (Швеция), Шведский институт космической физики (Швеция), Геофизическую обсерваторию Соданкюля Университета Оулу (Финляндия), Полярный геофизический институт (Россия), Датский технический университет DTU (Дания) и Научный институт Датского университета геологии. Исландия (Iceland).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансируется в рамках государственной темы, госрегистрация № 01.20.0803691.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Белуховский В.Б., Козловский А.Е., Пилипенко В.А. Определение широтного профиля резонансной ча-

- стоты Pc5 по данным радара EISCAT // Вестн. КНЦ РАН. Т. 3 (22). С. 67. 2015.
- *Большакова О.В., Боровкова О.К., Клейменова Н.Г. и др.* Магнитная буря 1989 года: структура экстремально возмущенной магнитосферы по геомагнитным пульсациям Pc5 // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 34. №4. С. 73–83. 1994.
- *Клейменова Н.Г., Козырева О.В.* Пространственно-временная динамика геомагнитных пульсаций Pi3 и Pc5 во время экстремальных магнитных бурь в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 1. С. 75–83. 2005а.
- *Клейменова Н.Г., Козырева О.В.* Интенсивные геомагнитные пульсации Pc5 в восстановительную фазу супербури октября и ноября 2003 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. №5. С. 597–612. 2005б.
- *Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П.* Магнитосферно-ионосферное взаимодействие / М. Наука, 192 с. 1983.
- *Оберц П., Распопов О.М.* Исследование пространственных характеристик пульсаций геомагнитного поля Pc5 // Геомагнетизм и аэрономия. Т.8. №3. С. 534–539. 1968.
- *Потапов А.С., Цэгмед Б., Полюшкина Т.Н.* Вклад глобальных колебаний Pc5 в магнитную возмущенность во время геомагнитных бурь // Солнечно-земная физика. Вып. 12. Т. 1. С. 142–147. 2008. <https://sciup.org/14210330>
- *Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г.* Возмущения электромагнитного поля Земли. Часть II. Короткопериодические колебания геомагнитного поля / Л., Изд. Ленингр. Ун-та, 271 с. 1976.
- *Троицкая В.А.* Короткопериодные возмущения электромагнитного поля Земли / В кн.: Вопросы изучения переменных электромагнитных полей в Земле. М., С. 27.–61. 1956.
- *Goldstein J., Sandel B.R., Hairston M.R. and Reiff P.H.* Control of plasmaspheric dynamics by both convection and subauroral polarization stream // Geophys. Res. Lett. V.30. N. 24. P.1–5. 2003. <https://doi.org/10.1029/2003GL018390>
- *Hudson M.K., Denton R.E., Lessard M.R., et al.* A study of Pc-5 ULF oscillations // Ann. Geophys. V. 22. P. 289–302. 2004. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-289-2004>
- *Dmitriev A., Chao J.-K., Thomsen M., Suvorova A.* Geosynchronous magnetopause crossings on 29–31 October 2003 // J. Geophys. Res. V. 110. N A08209. 2005. doi:10.1029/2004JA010582
- *Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Manninen J., Ranta A.* Unusual strong quasi-monochromatic ground geomagnetic Pc5 pulsations in the recovery phase of November 2003 super-storm // Ann. Geophys. V.23. P. 2621–2634. 2005. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-2621-2005>
- *Lee E.A., Mann I.R., Loto'aniu T.M., Dent Z.C.* Global Pc5 pulsations observed at unusually low L during the great magnetic storm of 24 March 1991 // J. Geophys. Res. V.112. N A05208. 2007. <https://doi.org/10.5194/angeo-32-319-2014>
- *Moldwin M.B., Downward L., Rassoul H.K., Amin R., Anderson R.R.* A new model of the location of the plasmopause: CRRES results // J. Geophys. R. V.107. N. A11. P.1339. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA009211>
- *Motoba T., Kikuchi T., Luhr H., et al.* Global Pc5 caused by Dp-2-type ionospheric current system // Ibid. V. 107. N A2. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001JA900156>
- *McGenry M.A., Clauer C.R., Friis-Christensen E., Newell P.T., Kelly J.D.* Ground Observations of Magnetospheric Boundary Layer Phenomena // J. Geophys. R. V. 95. NO. A9. P. 14995–15005. 1990. <https://doi.org/OI:10.1029/JA095P14995>
- *Pilipenko V.A., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., et al.* Global ULF wave activity during the May 15, 1997 magnetic storm // J. Atmosph. Solar-Terr. Physics. V.63. P. 489–501. 2001. <https://doi.org/oi:10.2205/2017ES000597>
- *Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., et al.* Dynamics of long-period magnetic activity and energetic particle precipitation during the May 15, 1997 storm // J. Atmosph. Solar-Terrestrial Phys. V.64. P.831–843. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00074-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00074-3)
- *Southwood D.J.* Some features of field line resonances in the magnetosphere // Planet. Space Sci. V. 22. № 3. P. 483–491. 1974. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(74\)90078-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(74)90078-6)
- *Tagirov V.R., Ismagilov V.S.* Formation of auroral torch structure / In book: Полярные геомагнитные возмущения и связанные с ними явления. Апатиты, изд. КНЦ АН СССР, с.88–91. 1989.
- *Trivedi N.B., Arora B.R., Padiha A.L., et al.* Global Pc5 geomagnetic pulsations of March 24, 1991, as observed along the American sector // Geophys. Res. Lett., V. 24. P. 1683–1687. 1997.
- *Yumoto K., Saito T.* Hydromagnetic wave driven by velocity shear instability in the magnetospheric boundary layer // Planet. Space Sci. V. 28. P.789. 1980.

Investigation of Geomagnetic Pulsations $Pc5$ on Two-Dimensional Network of Stations

Yu. A. Kopytenko¹, V. S. Ismagilov¹

¹*St. Petersburg Branch of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (SPbF IZMIRAN), St. Petersburg, Russia*

**e-mail: office@izmiran.spb.ru*

A detailed study of geomagnetic pulsations of $Pc5$ with a frequency of ~ 2.8 mHz was carried out using data from the two-dimensional IMAGE network and magnetic stations located on the territory of Russia. $Pc5$ events occurred in the afternoon sector against the background of a magnetic storm on 27.08.2014 after 5-day period with low magnetic activity. In two time intervals – at the beginning of the storm and during the period of maximum magnetic activity, instantaneous two-dimensional distributions of the magnetic field components $Pc5$ on the Earth's surface were plotted. It was found that the ionospheric sources of $Pc5$ (Hall current vortices) have an elliptical shape with a larger axis in the south-north direction. At the beginning of the magnetic storm, a single burst of $Pc5$ pulsations was detected, the source center of which was located at the geomagnetic latitude $\sim 67.5^\circ$ ($L \sim 6.8$ Re) and it moved westward with a speed of ~ 0.7 km/s. The estimated size of this ionospheric source is ~ 150 km in the west-east direction and ~ 330 km in the south-north direction. During the maximum period of the magnetic storm, the $Pc5$ pulsations are produced by two ionospheric sources following each other. These ionospheric sources have a more elongated elliptical shape with axis sizes in the west-east direction ~ 250 km and in the south-north direction ~ 670 km. The centers of these sources shifted by 4° to the more southern geomagnetic latitude $\sim 63.5^\circ$ ($L \sim 5$ Re) and moved westward with a velocity of ~ 1.7 km/s. We present estimates of the size of the magnetic force tube, in which the resonant MHD waves appeared, and the speed of its displacement in the equatorial plane of the magnetosphere.

Keywords: $Pc5$ geomagnetic pulsations, ionospheric sources of $Pc5$.