

АНАЛИЗ ВАРИАбельНОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ ПОЛЯРНЫХ ДИАГРАММ

© 2020 г. А. В. Хохлов^{1, 2, 3}, В. А. Пилипенко^{3, 4}, Р. И. Красноперов^{3, *},
Ю. И. Николова³, М. Н. Добровольский³

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

³Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

⁴Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: r.krasnoperov@gcras.ru

Поступила в редакцию 19.02.2020 г.

После доработки 17.03.2020 г.

Принята к публикации 08.06.2020 г.

В работе рассматриваются свойства изменчивости величины и направлений магнитного поля как во время суббури, так и в магнитоспокойные периоды. Основное внимание уделено особенностям вариаций производной магнитного поля $d\mathbf{B}/dt$, имеющим особую важность для проблемы геоиндуцированных токов. Предложен метод двумерных (2D) и трехмерных (3D) диаграмм, который позволяет наглядно представить вариации векторного поля по направлению. В качестве примера проанализированы вариации геомагнитного поля во время изолированной суббури 17.10.2015 г., используя профиль магнитных станций сети IMAGE. Подтверждено, что $d\mathbf{B}/dt$ в горизонтальной плоскости имеет гораздо большую изменчивость, чем возмущение геомагнитного поля $\Delta\mathbf{B}$. Предложенные 3D-диаграммы показывают, что плоскость поляризации $d\mathbf{B}/dt$ наклонена к поверхности Земли, что, по-видимому, связано с неоднородностью поля геомагнитных флуктуаций.

Ключевые слова: суббури, геоиндуцированный ток, геомагнитные флуктуации.

DOI: 10.31857/S0002333720060034

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее существенных проявлений космической погоды, способных оказать негативное влияние на наземные технологические системы, являются геомагнитно-индуцированные электрические токи (ГИТ), возникающие в наземных технологических системах при резких изменениях геомагнитного поля [Pulkkinen et al., 2006]. К настоящему времени планетарная пространственная структура и характерные морфологические особенности магнитных возмущений $\Delta\mathbf{B}$ хорошо описываются различными эмпирическими и численными моделями, например [Lukjanova, Christiansen, 2006]. Наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности создаются на высоких широтах авроральным электроджетом, резко усиливающимся во время суббурь, и на средних широтах – ионосферными токами растекания электроджета. В тоже время временные изменения магнитного поля $d\mathbf{B}/dt$, существенные для возбуждения ГИТ, требуют внимания и тщательного анализа. В быстрые изменения магнитного поля значимый вклад могут вносить мелко-масштабные (порядка сотен км) ионосферные

токовые структуры [Viljanen et al., 2001; Белаховский и др., 2018]. Физическая природа таких токовых структур, ответственных за быстрые вариации поля, не вполне ясна до настоящего времени [Engebretson et al., 2019].

Кроме того, выделение мелкомасштабных вариаций магнитного поля по данным сети станций может дать существенный вклад в решение одной из важнейших проблем современной космической геофизики – определение области зарождения и механизма магнитосферной суббури. Предположительно, условный “эпицентр” интенсивности магнитных флуктуаций в диапазоне периодов 10–30 с является индикатором геомагнитной проекции области будущего развития взрывной фазы суббури в ночной магнитосфере [Murphy et al., 2009]. Однако для понимания механизма генерации этих флуктуаций необходимы дальнейшие исследования.

Для природных систем, находящихся вблизи порога устойчивости, особую важность имеет динамика флуктуаций. В физике магнитосферных суббурь остается открытым вопрос – вызываются ли мелкомасштабные флуктуации поля во время

суббурь и в предшествующие им периоды одним и тем же механизмом, который лишь резко усиливается во время взрывной фазы? Наличие мелко-масштабных токовых структур, наложенных на ионосферный электроджет, проявляется в сильной изменчивости поля $d\mathbf{V}/dt$, и потому векторные свойства флуктуаций производной поля могут дать дополнительную информацию об их природе.

Для описания variability геомагнитного поля необходима выработка методов выделения тонких характеристик структуры флуктуаций поля. Настоящая статья посвящена поиску новых характеристик вариаций поля и попытке применить эти характеристики к описанию variability геомагнитного поля как во время суббурь, так и в спокойные периоды.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВАРИАбельНОСТИ ПОЛЯ

Исходные данные магнитометра на геомагнитной станции можно записать как векторный временной ряд, элементы которого состоят из трех (X, Y, Z) компонент $\mathbf{V}(t_1), \mathbf{V}(t_2), \dots, \mathbf{V}(t_k), \mathbf{V}(t_{k+1}), \dots$, где $(t_{k+1} - t_k) = \Delta t$ — шаг дискретизации данных. Данные стандартного трехкомпонентного феррозондового магнитометра содержат значения поля с точностью до некоторых фиксированных значений. Локальная вариация магнитного поля дается равенством $\Delta\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}(t) - \mathbf{V}_0$, где невозмущенное фоновое значение поля \mathbf{V}_0 определяется либо как медианное значение на анализируемом временном интервале, либо как значение до начала возмущения.

Возмущение горизонтальной компоненты магнитного поля $\Delta\mathbf{V}_r = \{\Delta B_x, \Delta B_y\}$ в точке наблюдения связано с эквивалентным ионосферным током \mathbf{J} над ней: $\Delta\mathbf{V} = (2\pi/c)[\mathbf{J} \times \mathbf{n}]$, где \mathbf{n} — нормаль к плоскости ионосферы, т.е. вектор \mathbf{J} повернут на $\pi/2$ по часовой стрелке по отношению к $\Delta\mathbf{V}_r$. Эквивалентный ионосферный ток может отличаться от реального горизонтального тока в ионосфере в областях с резкой неоднородностью ионосферной проводимости.

С этим же временным рядом можно связать ряд из временных производных $d\mathbf{V}/dt$. При горизонтальной однородности геоэлектрических свойств подстилающей среды ориентация вектора $d\mathbf{V}/dt$ соответствует направлению возбуждаемого теллурического поля \mathbf{E} и токов в поверхностных слоях Земли.

Нами рассматриваются свойства локальной изменчивости величины и направления магнитного поля. Об изменчивости горизонтальных компонент векторов $\Delta\mathbf{V}_r$ и $d\mathbf{V}_r/dt$ можно судить по их двумерным полярным диаграммам. В трехмерном пространстве, т.е. с учетом вертикальной B_z

компоненты, ориентация векторов возмущенного геомагнитного поля характеризуется нормализованными векторами единичной длины $\Delta\mathbf{V}/|\Delta\mathbf{V}|$ и $d\mathbf{V}/dt/|d\mathbf{V}/dt|$, которые определены точками на единичной сфере. Точка может отвечать как большому значению производной, так и малому, поэтому при таком подходе возникают определенные сложности, вытекающие из точности магнитометрических данных (порядка 0.1 нТл) и величины производной как таковой. Поэтому на трехмерных диаграммах будут показаны только направления производных, у которых абсолютное значение превышает 80% квантиль. Таким образом, направление поля характеризуется вектором единичной длины в трехмерном пространстве, и вариации направления поля отождествляются с точками, лежащими на единичной сфере. Подробнее данный метод представления данных магнитных станций и обсерваторий описан в работе [Khokhlov et al., 2019].

Подобное представление проясняет геометрическую структуру вариаций, но препятствует вычислению традиционных статистических характеристик типа средних значений, дисперсий и корреляций, поскольку точки на сфере не допускают арифметических операций. Тем не менее, существуют методы работы с данными на сфере (например, [Watson, 1983; Mardia, Jupp, 2008]), которые имеют определенные отличия от традиционных статистических подходов. Условием осмысленной применимости статистических методов является определенная стационарность наблюдаемых величин, т.е. данные должны соответствовать независимой выборке из генеральной совокупности. Разумеется, объединение наблюдений за возмущенные и спокойные периоды этому требованию не отвечает. Однако сложно организованный случайный процесс можно рассматривать отдельно на разных сегментах времени, подразумевая, что на каждом из сегментов параметры процесса остаются более-менее постоянными, хотя на этом пути происходит уменьшение объема рассматриваемых данных.

СУББУРЯ 17.10.2015 г.

Рассмотрим пример применения предложенной методики к анализу вариаций геомагнитного поля во время изолированной суббури 17.10.2015 г., используя 10-с данные долгого профиля магнитных станций IMAGE (табл. 1) [Tanskanen, 2009]. Для примера на рис. 1 представлены магнитограммы (X -компонента) и графики рассчитанной variability магнитного поля (dX/dt) для четырех выбранных станций сети IMAGE: “Hopen Island” (HOP); “Nordkapp” (NOR); “Ivalo” (IVA); “Oulujärvi” (OUJ). Начало суббури произошло примерно в 18:10 UT (всемирное время). Суббуря начинается на геомагнитной широте $\Phi \sim 65^\circ$

Таблица 1. Каталог рассмотренных магнитных станций сети IMAGE

Станция	Код	Географические координаты		Геомагнитные координаты*	
		широта, (°)	долгота, (°)	широта, (°)	долгота, (°)
Andenes	AND	69.30	16.03	66.4	100.4
Hopen Island	HOP	76.51	25.01	73.1	115.1
Nordkapp	NOR	71.09	25.79	67.7	109.4
Ivalo	IVA	68.56	27.29	65.1	108.6
Ny Ålesund	NAL	78.92	11.95	75.2	112.1
Oulujärvi	OIJ	64.52	27.23	61.0	106.1
Uppsala	UPS	59.90	17.35	56.5	95.8

*Скорректированные геомагнитные координаты (СГК), рассчитанные на эпоху 2001 г. (высота 0 км над уровнем моря) с помощью онлайн калькулятора http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm_vitmo.html. СГК (широта, долгота) точки в пространстве определяются как пересечения линии поля в данной точке с экваториальной плоскостью центрального диполя [Laundal, Richmond, 2017].

(IVA), а затем эта активизация (в т. ч. резко усилившийся западный электроджет) смещаются к более высоким широтам $\Phi \sim 70^\circ$ (HOP). В максимуме развития суббури (NOR) наблюдаются интенсивные иррегулярные квазипериодические флуктуации, классифицируемые как *Pi3*-пульсации. На выбранном интервале для анализа 1700–2000 UT (длительность – 3 ч), можно выделить два характерных интервала, отделенных на рис. 2 вертикальной красной линией:

- 1) подготовительная фаза суббури;
- 2) взрывная фаза суббури и последующие *Pi3*-пульсации.

Рассмотрим данные магнитных станций, находившихся в характерных областях развития суббури:

- в максимуме западного аврорального электроджета, на широте максимальной отрицательной бухты *X*-компоненты – HOP;
- области наиболее интенсивных *Pi3*-пульсаций – NOR;
- в области ионосферной проекции предполагаемой области зарождения суббури – IVA;
- в области ионосферных токов растекания – OIJ.

Выберем момент времени 70 мин от начала анализируемого интервала для всех станций как характерный момент, разделяющий (1) подготовительную фазу суббури и (2) взрывную фазу и последующее восстановление. Длительность интервала (1) составляет 70 мин, интервала (2) – 110 мин, что достаточно для статистических оценок.

Такое разделение на слабозмущенное поле (подготовительная фаза) и сильвозмущенное (взрывная фаза) является приблизительным, т.к. моменты начала взрывной фазы суббури (брейкап), как видно из сравнения магнитограмм *X*-компонент, разнятся на разных широтах из-за смещения центра активизации суббури в процессе ее

расширения к полюсу (рис. 2). Однако всплеск величины $|dX/dt|$ при начале фазы подготовки суббури происходит практически одновременно (на 48 мин и на 72 мин) на разных широтах.

АНАЛИЗ ВАРИАбельНОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАЗНЫХ ФАЗАХ СУББУРИ С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯРНОЙ 2D-ДИАГРАММЫ

Рассмотрим отдельно ориентацию $\Delta \mathbf{B}$ и $d\mathbf{B}/dt$ на фазе зарождения суббури и взрывной фазе развития на разных широтах. Флуктуации поля в эти периоды могут иметь разные характеристики, т.к. их физические механизмы могут различаться. Рассмотрим сначала полярные 2D-диаграммы горизонтальных компонент $\Delta \mathbf{B}_i$ и $d\mathbf{B}_i/dt$ на поверхности Земли (плоскость *XU*). Полярные диаграммы вектора $\Delta \mathbf{B}$, на всех станциях (не приводятся в данной статье) показывают преимущественное направление возмущения к югу (т.е. $|\Delta X| \gg |\Delta Y|$), что согласуется с усилением западного электроджета в процессе развития суббури. Это говорит о том, что возмущение поля меняется преимущественно по величине и создается ионосферным током, текущим в западном направлении. Полярные 2D-диаграммы горизонтальных компонент $d\mathbf{B}_i/dt$ на поверхности Земли (плоскость *XU*, окружность единичного радиуса) для станций HOP, NOR, IVA, OIJ для подготовительной и взрывной фаз суббури представлены соответственно на рис. 3 и рис. 4.

В то же время полярные диаграммы $d\mathbf{B}_i/dt$ (рис. 3, рис. 4) показывают, что вариации этого вектора имеют гораздо больший разброс, чем вариации $\Delta \mathbf{B}_i$. На подготовительной фазе суббури (интервал 1) на станциях на широтах 65° – 67° (NOR, IVA) преимущественно $|dB_{X_i}/dt| > |dB_{Y_i}/dt|$ (рис. 3). На средних (OIJ) и очень высоких (HOP) широтах

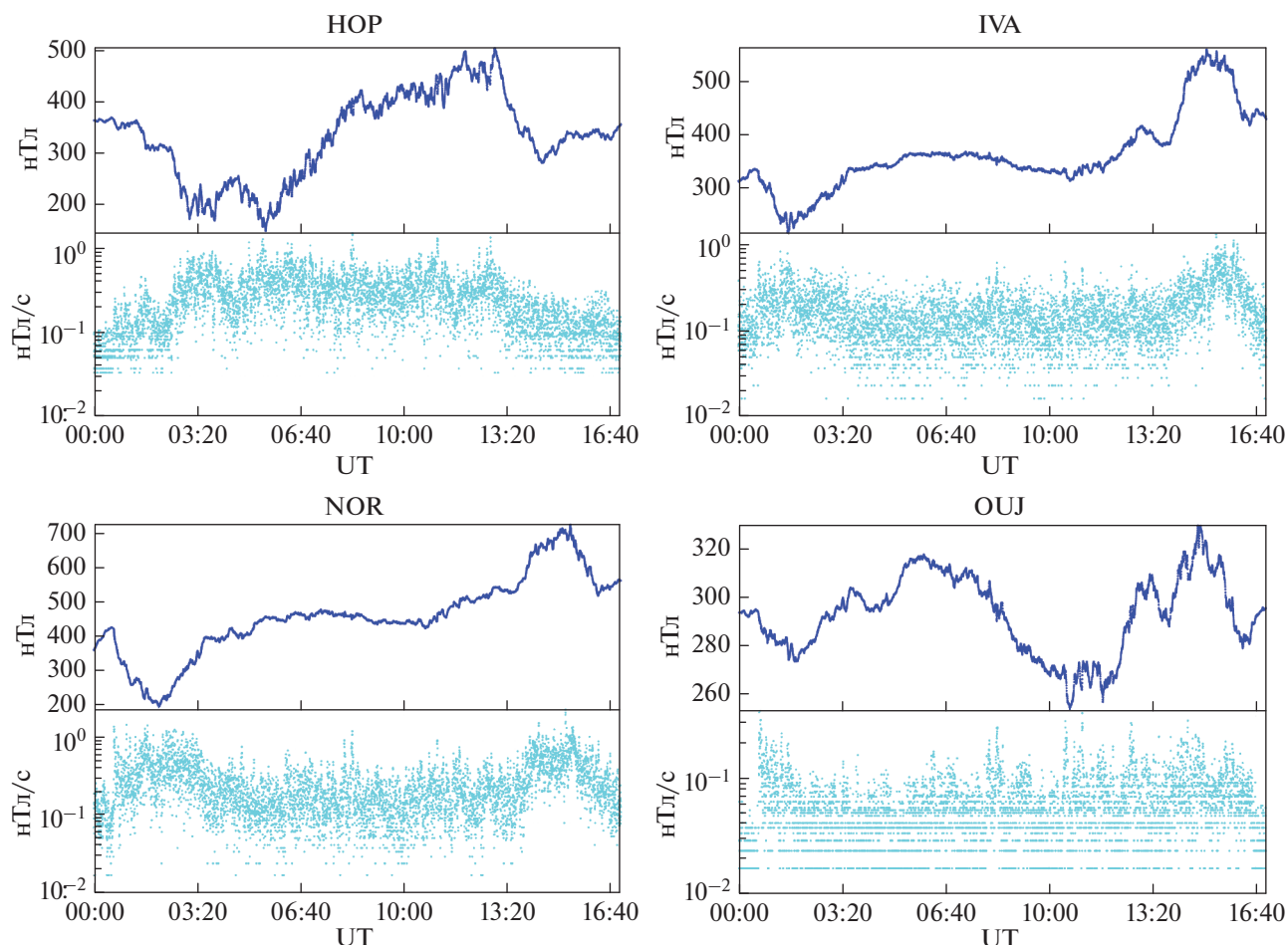


Рис. 1. Минутные магнитограммы X -компоненты (верхние графики) для выбранных станций (HOP, NOR, IVA, OUI) сети IMAGE. Вариабельность магнитного поля dX/dt (нижние графики) для этих же станций. Начало интервала 0000 UT, конец интервала 1700 UT.

вариации $d\mathbf{B}_i/dt$ становятся почти изотропными. Таким образом, временная производная поля $d\mathbf{B}_i/dt$ (а значит, и вызванный ей теллурический ток) сильно меняется не только по величине, но и по направлению. На взрывной фазе (интервал 2) суббури полярные 2D-диаграммы имеют качественно подобный вид (рис. 4).

Таким образом, на подготовительной и активной фазах суббури, хотя по величине флуктуации становятся более интенсивными, но свойства этих вариаций по направлению качественно не меняются.

АНАЛИЗ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ СФЕРИЧЕСКИХ 3D-ДИАГРАММ

Пользуясь методом [Khokhlov et al., 2019], построим на трехмерной сфере направления $d\mathbf{B}/dt$ для всех фаз суббури на разных широтах (рис. 5). Из-за ограниченной точности (~ 0.1 нТл) магни-

тометров заметна сильная дискретность в рассчитанных направлениях. Поэтому выявление структуры вариаций требует данных за достаточно большой период наблюдений, с тем чтобы можно было отобрать для исследования необходимую выборку, без включения в нее значений, находящихся на пределе точности измерений. Поскольку 2D-диаграммы не выявили качественного различия свойств флуктуаций на разных фазах суббури, при построении 3D-диаграмм интервалы 1 и 2 были объединены.

Распределения направлений для $d\mathbf{B}/dt$ выявляют некоторую структуру. Сферические 3D-диаграммы показывают, что имеет место поляризация направлений вдоль некоторой наклонной плоскости, расположение которой зависит от конкретного магнитометра. Эта структура становится совсем очевидной, если ограничиться отрисовкой 20% самых больших по модулю значений (рис. 5, нижний ряд).

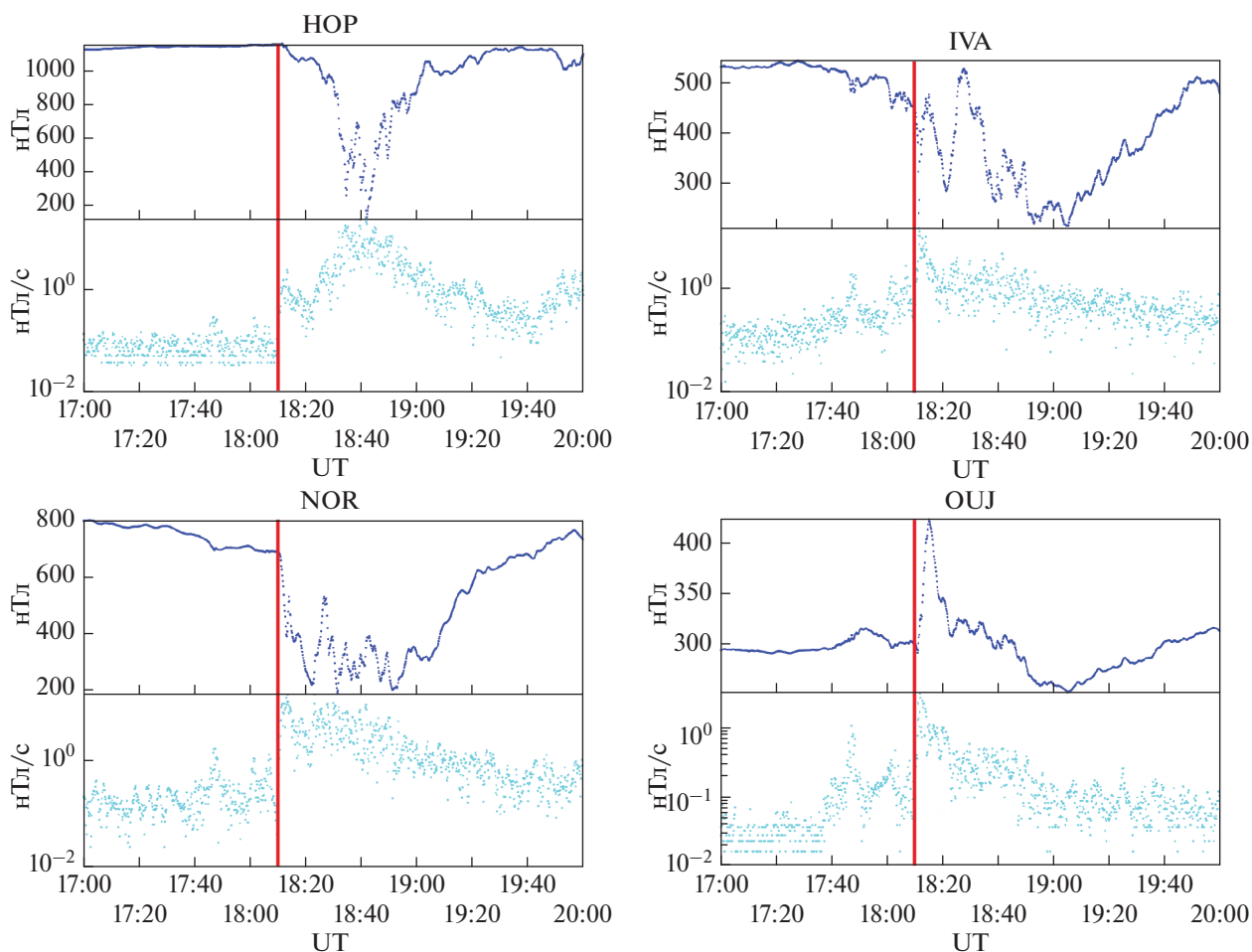


Рис. 2. Минутные магнитограммы X -компоненты (верхние графики) для выбранных станций (НОР, NOR, IVA, OUI) сети IMAGE. Вариабельность магнитного поля dX/dt (нижние графики) для этих же станций. Начало интервала 1700 UT, конец интервала 2000 UT. Начало взрывной фазы суббури отмечено красной вертикальной линией.

На поведении направлений $\Delta\mathbf{B}$ заметить эту структуру сложнее в силу того, что производные и их вклад в $\Delta\mathbf{B}$ достаточно различаются по своей величине. Рассмотрение направлений производных включало сильно нелинейную процедуру нормализации вектора производной, после которой эта структура и стала заметна.

В действительности, для любой конфигурации точек на сфере можно рассмотреть известный тензор ориентации и найти его собственные вектора и собственные значения. Наименьшему собственному значению отвечает вектор, перпендикулярные направления которого задают плоскость, проходящую через центр сферы. Если точки сферы демонстрируют тенденцию кластеризоваться в окрестности большого круга, образованного пересечением этой плоскости со сферой, то наименьшее собственное число значительно отличается от остальных по величине. Справедливо также и обратное — по относительной величине собственных чисел можно сделать вывод о степени концентрации точек, в частности, когда все

собственные числа примерно равны, то распределение точек близко к равномерному.

К сожалению, стандартные статистические оценки здесь не применимы: в рассматриваемом случае мы имеем дело с явно нестационарным процессом, и потому в вопросе о кластеризации направлений необходима информация о структуре направлений за гораздо более длительный период наблюдений (от одного года и более).

Если обратиться к реальным данным и 3D-представлению направлений, то можно заметить следующее: а) в большинстве случаев наименьшее собственное число оказывается значительно меньше двух остальных чисел, что соответствует выраженной кластеризации распределения направлений производной вдоль некоторой плоскости; б) степень этой кластеризации тем выше, чем больше по абсолютной величине значения производных, направления которых рассматриваются. Для рассмотренного набора магнитовариационных станций НОР, NOR, OUI, IVA, даже

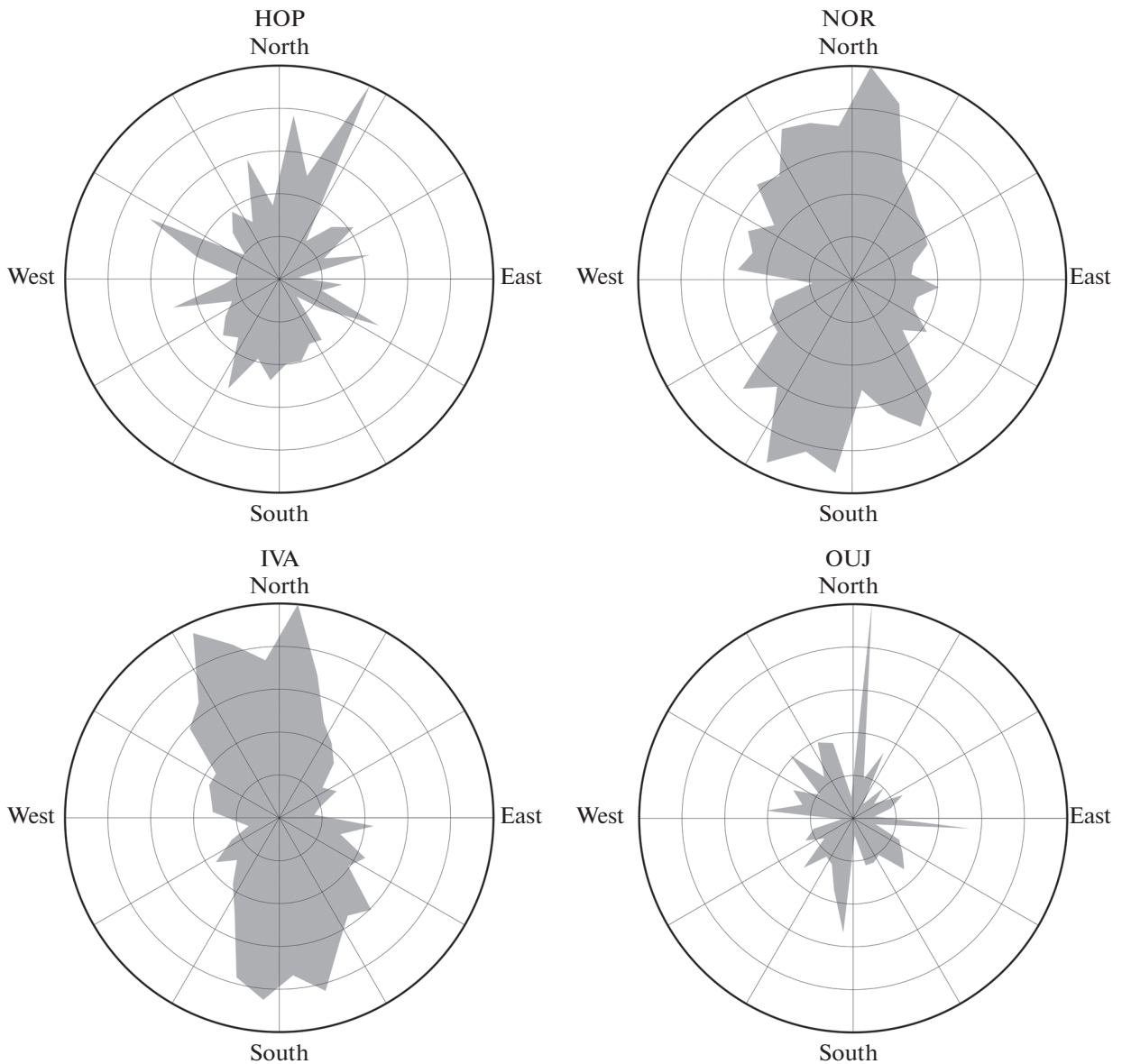


Рис. 3. Полярные 2D-диаграммы горизонтальных компонент dB/dt на поверхности Земли (плоскость XY , окружность единичного радиуса) для станций HOP, NOR, IVA, OUI на подготовительной фазе суббури (интервал 1700–1810 UT). Ориентация осей соответствует ориентации исходных геомагнитных данных.

при длительном периоде наблюдений кластеризация сильнейших направлений выражена весьма слабо. Например, собственные числа для станции NOR – (1.94; 3.01; 5.14). Для других станций наборы собственных чисел также демонстрируют небольшую относительную разницу. В то же время часто эта кластеризация весьма наглядна, как, например, для сильнейших вариаций (отобранных по критерию квантиля 97%) по данным геомагнитной обсерватории “Санкт-Петербург” (SPG) [Sidorov et al., 2017], где набор собственных значений – (0.25; 1.94; 2.30) (рис. 6).

В частности, наиболее явно кластеризация проявляет себя в периоды магнитной возмущен-

ности. В то же время в период, предшествующий периоду суббури, кластеризация вблизи плоскости выражена гораздо менее явно, математически это отвечает тому, что для такого периода наименьшее собственное число тензора ориентации не так сильно отлично от остальных.

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ НАКЛОНА ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ dB/dt В ПРОСТРАНСТВЕ

Появление вертикальной компоненты B_z геомагнитных вариаций у земной поверхности отражает наличие горизонтальных неоднородностей

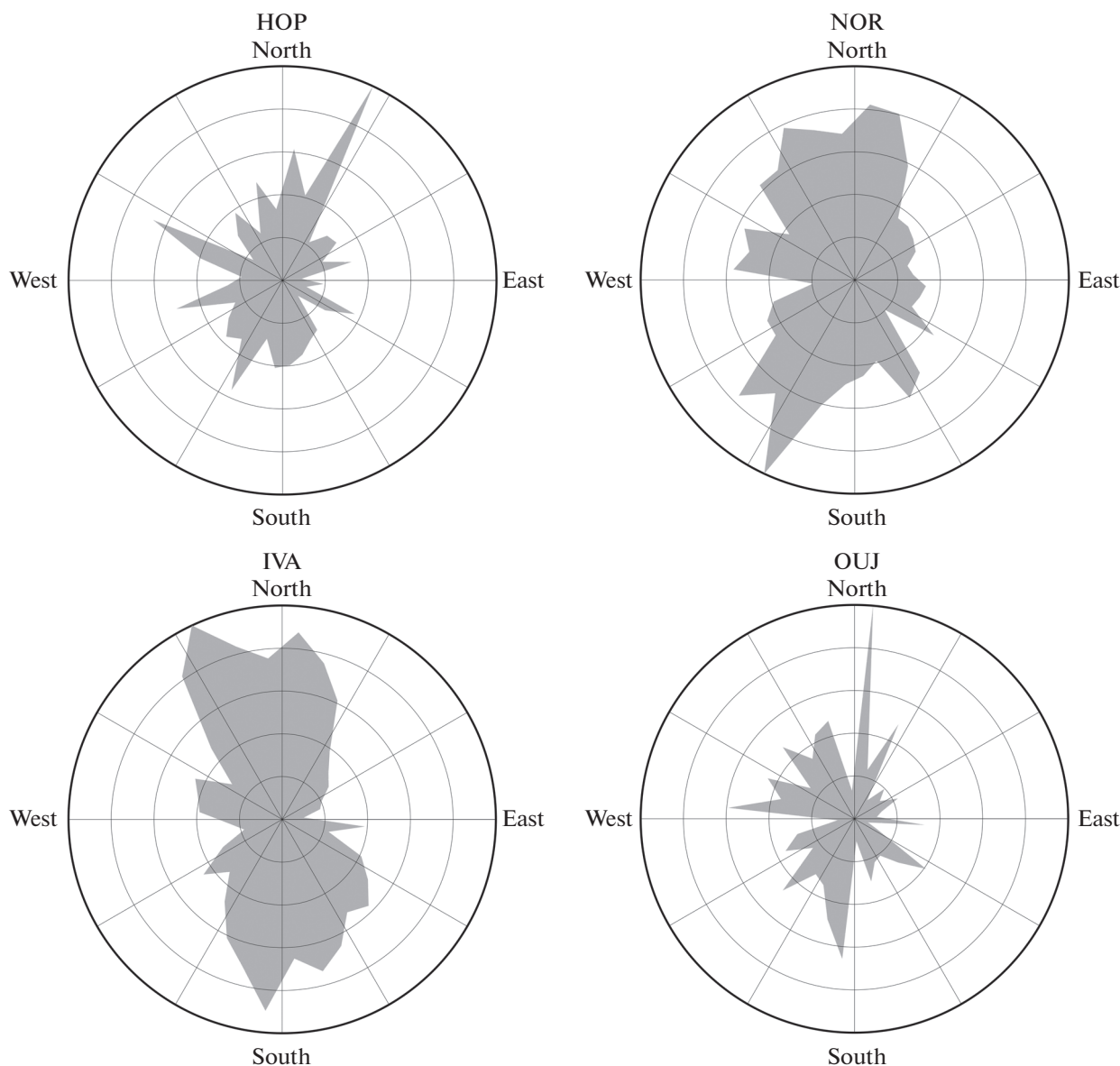


Рис. 4. Полярные 2D-диаграммы горизонтальных компонент dB_r/dt на поверхности Земли (плоскость XY , окружность единичного радиуса) для станций HOP, NOR, IVA, OUI на взрывной фазе суббури (интервал 1810–2000 UT). Ориентация осей соответствует ориентации исходных геомагнитных данных.

либо геоэлектрической структуры земной коры, либо первичного поля пульсаций \mathbf{B}_r . Геоэлектрические свойства земной поверхности характеризуются ее поверхностным импедансом Z_g (для однородной проводимости σ импеданс дается соотношением $Z_g = \exp(-i\pi/4)\sqrt{\omega\mu/\sigma}$). В случае сильного скин-эффекта (это условие хорошо выполняется для типичных вариаций с периодами >1 мин над низкоомными разрезами) эти два механизма возникновения вертикальной компоненты магнитного поля пульсаций отчетливо видны из формулы [Wait, 1954]:

$$B_z = i(\mu_0\omega)^{-1}(Z_g\nabla\mathbf{B}_r + \mathbf{B}_r\nabla Z_g). \tag{1}$$

Производные магнитного поля по времени связаны таким же соотношением. Из (1) следует, что появление B_z составляющей может быть обусловлено либо неоднородностью горизонтальной компоненты первичного поля ($\nabla\mathbf{B}_r \neq 0$), либо горизонтальной неоднородностью поверхностного импеданса ($\nabla Z_g \neq 0$). Для однородной плоской волны над геоэлектрически горизонтально-однородной поверхностью $B_z = 0$.

Для типичных возмущений с $B_x \gg B_y$, если пренебречь вкладами компоненты B_y и неодно-

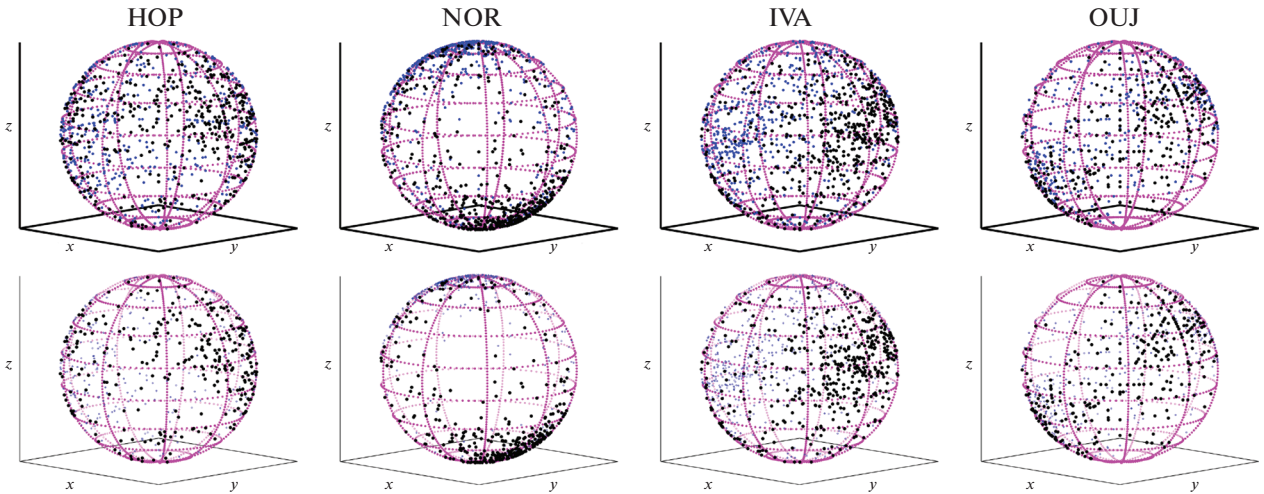


Рис. 5. 3D-диаграммы за весь период суббури производных $d\mathbf{V}_i/dt$ по данным станций HOP, NOR, IVA, OUI. Верхний ряд: показаны все направления за период суббури. Нижний ряд: для того же набора станций показаны только направления сильнейших производных, то есть тех, у которых абсолютное значение производной превышает 80% квантиль.

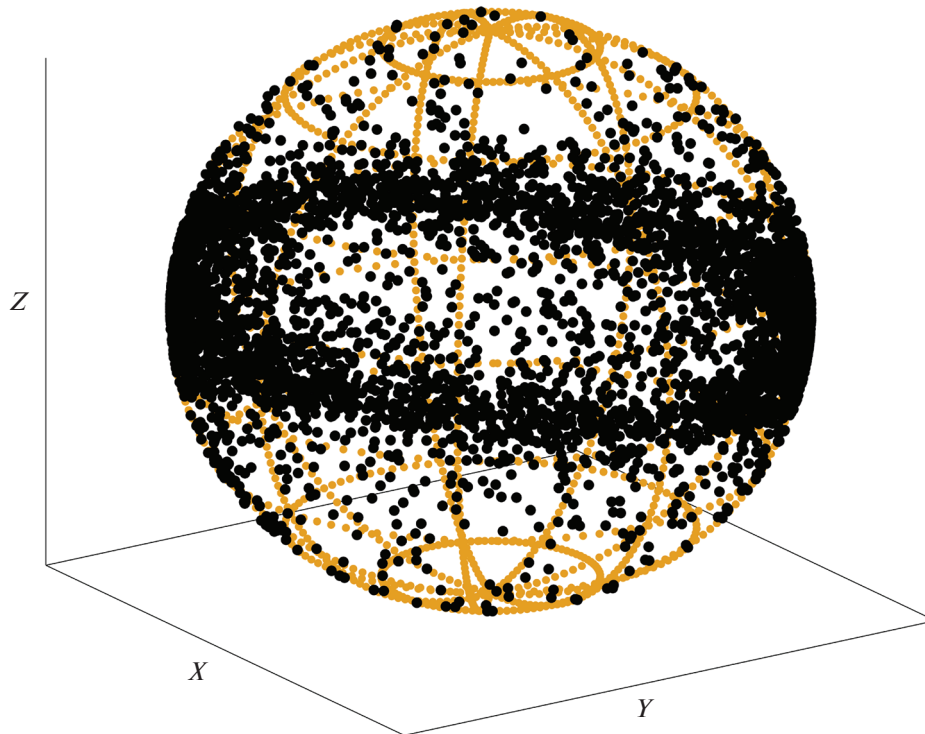


Рис. 6. 3D-диаграмма для обсерватории “Санкт-Петербург” (SPG) (геогр. коорд.: 60.542° с.ш.; 29.716° в.д.). Интервал анализа 2 года (2015–2016 гг.). Показаны направления для сильнейших вариаций, отобранных по критерию квантиля 97%.

родности Z_g , соотношение между вертикальной и горизонтальной компонентами будет иметь вид:

$$B_z = \frac{iZ_g}{\mu_0\omega} \frac{\partial B_x}{\partial x}. \quad (2)$$

Для убывающего с уменьшением широты поля возмущения, например, как $B_x \sim \exp(-x/a)$, сле-

дует ожидать появления малой компоненты B_z , порядка отношения скин-длины $\delta_g = \sqrt{2/\mu_0\omega\sigma}$ к масштабу поперечной неоднородности поля a :

$$\left| \frac{B_z}{B_x} \right| \approx \frac{\delta_g}{a}.$$

Поскольку вариации B_Z и B_X связаны между собой согласно (1)–(2), это приведет к наклону плоскости поляризации поля геомагнитных вариаций. Угол наклона можно оценить как $\operatorname{tg}\alpha = |B_Z/B_X|$.

Кроме того, при наличии горизонтальной неоднородности поверхностного импеданса Z_g на величине B_Z будет сказываться влияние слагаемого $B_i \nabla Z_g$. Его величина зависит от направления поляризации первичного поля и ориентации градиента импеданса.

ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку стационарность временных рядов геомагнитных вариаций во время бурь и суббурь утверждать достаточно трудно, то любые численные характеристики статистического происхождения должны восприниматься осторожно и лишь как косвенные свидетельства отличий в поведении. Напротив, простые визуальные сравнения представленных 2D- и 3D-диаграмм дают больше информации подобно тому, как период собственно суббури легко отличим от периода ее подготовки. Для большого числа наблюдений ряд из первых разностей (производных) оказывается ближе к стационарному, хотя в случае сильных магнитных возмущений эта близость к стационарности если и выполнена, то лишь на некоторых ограниченных во времени сегментах наблюдений.

Предложенный метод 2D- и 3D-диаграмм позволяет наглядно представить вариации векторного поля по направлению. Исследование магнитных данных в период развития суббури выявило следующие характеристики:

- Полярные 2D-диаграммы $d\mathbf{V}_i/dt$ показывают, что вариации этого вектора имеют гораздо больший разброс по направлению, чем вариации $\Delta\mathbf{V}_i$ на всех фазах суббури. На средних и очень высоких широтах вариации $d\mathbf{V}_i/dt$ становятся почти изотропными.

- В невозмущенные периоды направления производных на 3D-диаграммах группируются вокруг характерных для каждого места наблюдения плоскостей. Чем больше модуль производной, тем лучше она приближается соответствующей плоскостью, можно говорить об эффекте поляризации направлений производной, который прослеживается на больших производных и размывается на малых.

Не удается связать ориентацию этих плоскостей с одной лишь широтой, на которой расположен магнитометр. Плоскость поляризации характеризуется обеими географическими координатами и ее наклон достаточно сильно варьируется в трехмерном пространстве. Район Фенноскандии характеризуется сложной геоэлектрической структурой земной коры: поверхностные импедансы между разными областями могут различаться на

2 порядка. Мы полагаем, что рассмотренные сферические 3D-диаграммы могут, с одной стороны, характеризовать дирекционные свойства флуктуаций аврорального электроджета в данном регионе, а смещения ориентации плоскостей вариабельности геомагнитных флуктуаций от горизонтальной плоскости, в свою очередь, могут быть следствием локальной неоднородности импеданса земной коры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье были рассмотрены примеры использования двумерных (полярных) и трехмерных (на единичной сфере) диаграмм для представления вариаций вектора магнитного поля по направлению. Свойства изменчивости величины и направлений магнитного поля наблюдались как во время суббури, так и в спокойные периоды для четырех магнитовариационных станций сети IMAGE (HOP, NOR, IVA, OUI). В качестве отдельного примера были рассмотрены данные магнитной обсерватории “Санкт-Петербург” (SPG). В качестве рассматриваемого события была выбрана изолированная суббуря 17.10.2015 г.

Анализ магнитных данных с помощью полярных 2D-диаграмм в период развития суббури позволил сделать вывод о том, что вариации вектора $d\mathbf{V}_i/dt$ имеют гораздо больший разброс по направлению, чем вариации $\Delta\mathbf{V}_i$ на всех фазах суббури. Также было определено, что на средних и высоких широтах вариации $d\mathbf{V}_i/dt$ становятся почти изотропными. Наблюдения за изменчивостью геомагнитного поля на примере 3D-диаграмм позволили выделить характерную кластеризацию направлений этой изменчивости. В невозмущенные периоды направления вектора $d\mathbf{V}_i/dt$ группируются вокруг характерных для каждой магнитной станции плоскостей. Построенные по рассмотренным данным 3D-диаграммы демонстрируют сложную поляризационную картину, что, по-видимому, является следствием неоднородности поля геомагнитных флуктуаций.

Описанные в настоящей статье методы представляют интерес в связи с общей задачей описания структуры вариабельности геомагнитного поля и вызываемых ими ГИТ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-77-20034 “Разработка карт районирования характеристик геомагнитной активности для территории Российской Федерации”).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность научным организациям и коллективам, осуществляющим поддержку и функционирование международной сети магнитомет-

ров IMAGE (<http://space.fmi.fi/image/www/>). В работе использовались данные, предоставленные ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН (<http://ckp.gcras.ru/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белуховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. 2018. № 1. С. 56–68.
<https://doi.org/10.7868/S0002333718010052>

Engebretson M.J., Pilipenko V.A., Ahmed L.Y., Posch J.L., Steinmetz E.S., Moldwin M.B., Connors M.G., Weygand J.M., Mann I.R., Boteler D.H., Russell C.T., Vorobev A.V. Night-time Magnetic Perturbation Events Observed in Arctic Canada: 1. Survey and Statistical Analysis // J. Geophysical Research: Space Physics. 2019. V. 124. № 9. P. 7442–7458.
<https://doi.org/10.1029/2019JA026794>

Khokhlov A., Krasnoperov R., Nikolov B., Nikolova J., Dobrovolsky M., Petrov V., Kudin D., Belov I. On the directions and structure of the short-term magnetic variations // Russian J. Earth Sciences. 2019. V. 19. № 2. ES2002.
<https://doi.org/10.2205/2019ES000656>

Laundal K.M., Richmond A.D. Magnetic Coordinate Systems // Space Science Reviews. 2017. V. 206. № 1–4. P. 27–59.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0275-y>

Lukianova R., Christiansen F. Modeling of the global distribution of ionospheric electric fields based on realistic maps of field-aligned currents // J. Geophysical Research: Space Physics. 2006. V. 111. A03213.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011465>

Mardia K., Jupp P.E. Directional statistics. Wiley Series in Probability and Statistics. Chichester, England: John Wiley & Sons. 2008. 460 p.
<https://doi.org/10.1002/9780470316979>

Murphy K.R., Rae I.J., Mann I.R., Milling D.K., Watt C.E.J., Ozeke L., Frey H.U., Angelopoulos V., Russell C.T. Wavelet-based ULF wave diagnosis of substorm expansion phase onset // J. Geophysical Research: Space Physics. 2009. V. 114. A00C16.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013548>

Pulkkinen A., Klimas A., Vassiliadis D., Uritsky V., Tanskanen E. Spatiotemporal scaling properties of the ground geomagnetic field variations // J. Geophysical Research: Space Physics. 2006. V. 111. A03305.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011294>

Scheidegger A.E. On the statistics of the orientation of bedding planes, grain axes, and similar sedimentological data. U.S. Geological Survey Prof. Paper 525-C. USA: Geological Survey. 1965. P. 164–167.

Sidorov R., Soloviev A., Krasnoperov R., Kudin D., Grudnev A., Kopytenko Y., Kotikov A., Sergushin P. Saint Petersburg magnetic observatory: from Voeikovo subdivision to INTERMAGNET certification // Geoscientific Instrumentation. Methods and Data Systems. 2017. V. 6. № 2. P. 473–485.
<https://doi.org/10.5194/gi-6-473-2017>

Tanskanen E.I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993–2003 examined // J. Geophysical Research: Space Physics. 2009. V. 114. A05204.
<https://doi.org/10.1029/2008JA013682>

Turner M., Rasson J., Reeves C. Observation and measurement techniques / Schubert G. Treatise on geophysics. V. 5. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 2007. P. 93–146.
<https://doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00089-4>

Viljanen A., Nevanlinna H., Pajunpää K., Pulkkinen A. Time derivative of the horizontal geomagnetic field as an activity indicator // Annales Geophysicae. 2001. V. 19. P. 1107–1118.
<https://doi.org/10.5194/angeo-19-1107-2001>

Wait J.R. Geoelectromagnetism. New York, USA: Academic Press. 1982. 268 p.

Watson G. Statistics on spheres. New York, USA: Wiley. 1983. 238 p.

Analysis of Geomagnetic Field Variability by the Polar Diagram Method

A. V. Khokhlov^{a, b, c}, V. A. Pilipenko^{c, d}, R. I. Krasnoperov^{c, *},
Yu. I. Nikolova^c, and M. N. Dobrovolskiĭ^c

^aInstitute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

^cGeophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia

^dSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia

*e-mail: r.krasnoperov@gcras.ru

The paper addresses the variability properties of the intensity and direction of the magnetic field during a substorm and during the magnetically quiet periods. The main focus is on the properties of variations in the derivative of the magnetic field $d\mathbf{B}/dt$ which are a factor of particular importance for the problem of the geomagnetically induced currents. A method of two- (2D) and three-dimensional (3D) diagrams is proposed for visual representation of the directional variations of a vector field. As an example, the geomagnetic field variations during the isolated substorm on October 17, 2015 are analyzed with the use of the profile of magnetic stations of the IMAGE network. It is confirmed that $d\mathbf{B}/dt$ in the horizontal plane has a much stronger variability than the geomagnetic field perturbation $\Delta\mathbf{B}$. The proposed 3D diagrams show that the $d\mathbf{B}/dt$ polarization plane is inclined towards the Earth's surface, which is probably due to the inhomogeneity of the field of geomagnetic fluctuations.

Keywords: substorms, geomagnetically induced current, geomagnetic fluctuations