

УДК 550.385.4

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАбельНОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ И СУББУРЬ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

© 2018 г. В. Б. Белаховский<sup>1,3, \*</sup>, В. А. Пилипенко<sup>2\*\*</sup>,  
Я. А. Сахаров<sup>3</sup>, В. Н. Селиванов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

<sup>2</sup>Геофизический Центр РАН, г. Москва

<sup>3</sup>Полярный геофизический институт РАН, г. Апатиты

<sup>4</sup>Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН

\*E-mail: belakhov@mail.ru

\*\*E-mail: pilipenko\_va@mail.ru

Поступила в редакцию 05.12.2016 г.

Широко распространены модели геомагнитно-индуцированных токов, в которых их основным источником являются вариации интенсивности аврорального электроджета, индуцирующие токи в широтном направлении. На основании этого считается, что магнитные возмущения представляют опасность преимущественно для технологических систем, вытянутых в широтном направлении. В данной работе делается попытка применить новые характеристики к описанию вариабельности геомагнитного поля во время магнитной бури 17 марта 2013 г. Эти характеристики, рассчитанные по данным магнитных станций сети IMAGE, сопоставлены с результатами регистрации индуцированных токов в линиях электропередач на Кольском полуострове и Карелии. Векторная техника показала гораздо меньшую вариабельность горизонтальной компоненты геомагнитного поля по сравнению с его производной. Количественная оценка вариабельности подтвердила, что вариации поля происходят в сравнимой степени как по величине, так и по направлению. Эти результаты не могут быть объяснены простой моделью протяженного ионосферного тока и показывают важность учета мелкомасштабных (с масштабами сотни км) токовых структур для расчета геомагнитно-индуцированных токов. Таким образом, геомагнитно-индуцированные токи представляют опасность для технологических систем, ориентированных не только в широтном, но и в долготном направлениях.

*Ключевые слова:* геомагнитно-индуцированные токи, электроэнергетические системы, геомагнитные вариации, ионосферные токи.

DOI: 10.7868/S0002333718010052

### ВВЕДЕНИЕ

Чем шире внедряются передовые технологии, тем чувствительнее становятся их сбои вследствие воздействия негативных факторов космической погоды. Воздействие этих факторов является естественной нормой, которую невозможно избежать, но необходимо знать и учитывать. Одним из наиболее существенных проявлений космической погоды для наземных технологических систем являются электрические геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), или по западной терминологии – geomagnetically induced currents (GIC), возбуждаемые в поверхностных слоях Земли и проводниках при резких изменениях геомагнитного поля. Наведенные ГИТ опасны для трубопроводов [Pulkkinen et al., 2001; Gummow, 2002], магистральных кабельных линий, высоковольтных

линий электропередач (ЛЭП) [Boteler et al., 1998], железнодорожного оборудования, морских коммуникационных кабелей, телефонных и телеграфных линий [Pirjola et al., 2005]. Известны многочисленные примеры катастрофических последствий мощных ГИТ при сильных магнитных бурях, имевшие место в США, Канаде, Скандинавии и Японии [Lanzerotti, 2001]. Наиболее интенсивные токи (до сотен А) и электрические поля ( $>10$  В/м) возбуждаются на авроральных широтах при магнитных бурях и суббурях. Вариации магнитного поля во времени с  $dB/dt \sim 1$  нТл/с индуцируют ток в финских высоковольтных сетях с величиной порядка нескольких А, а вариации с  $dB/dt > 40$  нТл/с привели к нарушениям в работе скандинавских ЛЭП [Viljanen, 1997]. Наведенные токи вызывают насыщение, перегрев и даже

повреждение высоковольтных трансформаторов на электрических подстанциях [Eginmez et al., 2002]. Постоянное расширение энергетических сетей, рост связей между ними, увеличение нагрузки, переход к низкорезистивным линиям передач ведут к повышению вероятности аварийных ситуаций при сильных магнитных бурях и суббурях.

Однако даже при отсутствии катастрофических нарушений ГИТ вызывают насыщение трансформаторов и нарушают управление напряжением, так что при этом растут потери в трансформаторе и возникают перегрузки при передаче. Например, во время магнитных бурь 15.07.2000 г. и 31.03.2001 г. лимит на передачу энергии был понижен операторами электрической сети PJM (США) на 20% [Forbes et al., 2004]. Одновременно упал и фактический объем передаваемой энергии. Недостаток энергии привел к повышению текущих региональных цен почти в 4 раза. Эконометрический анализ, учитывающий влияние всех возможных факторов, показывает, что даже относительно небольшие магнитные бури влияют на текущие цены. Только за 1,5 года (июнь 2000 г. – декабрь 2001 г.) экономическое влияние космической погоды на энергетическую систему США составило около \$500 миллионов.

Наиболее активные проявления геомагнитных возмущений наблюдаются на авроральных широтах, поэтому в северных странах (США, Канада, скандинавские страны) с 1970-х годов начались исследования по влиянию ГИТ на наземные технологические системы и возможным мерам уменьшения негативных последствий. Хотя даже страны на низких широтах обеспокоены возможным влиянием ГИТ на технологические системы [Kelly et al., 2016]. Уровень и размах отечественных исследований по этому направлению явно отстает от работ в передовых странах, несмотря на отдельные работы [Ефимов и др., 2013]. Кроме того, в отличие от скандинавских стран и Канады, авроральные районы РФ не имеют достаточно плотной сети магнитных станций.

Корректный расчет теллурических электрических полей и токов требует наличия достаточно плотной сети магнитометров и информации о геоэлектрическом разрезе земной коры. Оптимальной глобальной модели геоэлектрической проводимости не существует, поэтому при расчетах приходится пользоваться различными приближенными схемами. Сопоставление различных методик показало, что с хорошей точностью для расчета теллурических полей можно пользоваться простым импедансным соотношением в приближении плоской волны и плоской геометрии [Viljanen et al., 2004]. Значительно упрощает ситуацию то, что для практически важных расчетов ГИТ важны интегральные оценки разности потенциалов между узлами протяженной системы (не менее нескольких

сотен км), и поэтому необходимые оценки с достаточной точностью можно провести и со сравнительно редкой сетью магнитометров и грубой моделью проводимости.

Располагая рассчитанной картиной теллурических полей несложно провести инженерный расчет ГИТ в заданной технологической системе с известной геометрией и структурой. Оценка возможных эффектов для каждой конкретной системы представляет собой отдельную задачу. Располагая расчетами отклика потенциалов и токов вдоль заданной ветки трубопровода или электрической сети на ГИТ, инженеры могут полно представить поведение катодной защиты при магнитных бурях и выявить слабые элементы сети. Оперативный прогноз возможных кризисных уровней ГИТ может быть использован операторами для снижения риска катастрофических последствий: уменьшения нагрузки, подключения емкостной защиты и т.п. Информация о ГИТ важна не только с практической точки зрения, но и с общенаучной точки зрения, поскольку возбуждение ГИТ являются важным элементом воздействия солнечной активности на магнитосферно-ионосферную систему Земли.

Наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности вызываются протяженным в В-З направлении авроральным электроджетом, создающим на земной поверхности магнитные возмущения, ориентированные в долготном (С-Ю) направлении. Поэтому широко распространены представления и расчетные модели, в которых основным источником ГИТ являются вариации интенсивности аврорального электроджета, индуцирующие токи в долготном направлении [Boteler et al., 1997; Viljanen and Pirjola, 1994]. На основании этого считается, что магнитные возмущения представляют опасность преимущественно для технологических систем (линии электропередач, трубопроводы и т.п.), вытянутых в широтном (В-З) направлении. Однако в быстрые изменения магнитного поля, существенные для возбуждения ГИТ, существенный вклад могут вносить мелкомасштабные ионосферные токовые структуры [Viljanen et al., 2001]. Таким образом, для описания вариабельности геомагнитного поля и вызываемых ими ГИТ необходимо применение более тонких характеристик, чем широко используемая производная С-Ю компонента поля  $dX/dt$  [Boteler et al., 1998].

В данной работе делается попытка применить некоторые новые характеристики к описанию вариабельности геомагнитного поля во время магнитной бури 17 марта 2013 г. Будут использованы данные Полярного Геофизического института (ПГИ) РАН и Центра физико-технических проблем энергетики Севера (ЦФТПЭС) КНЦ РАН по регистрации ГИТ в ЛЭП на Кольском полуострове и в Карелии.

## СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ НАЗЕМНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И ГИТ

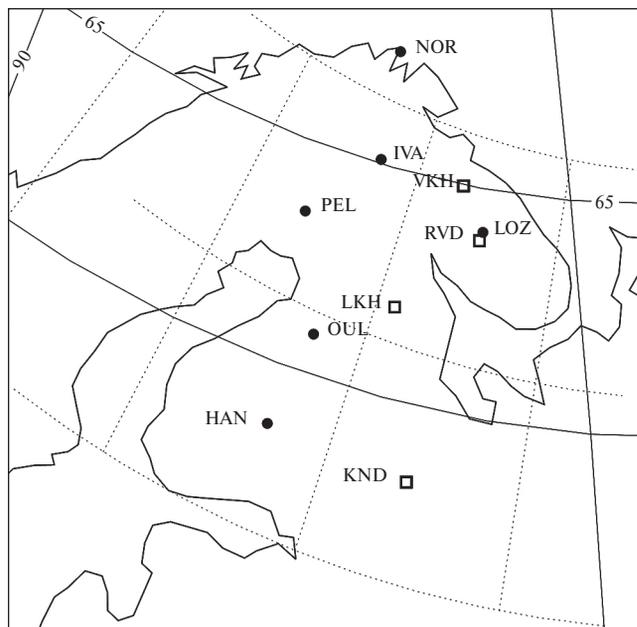
В ПГИ совместно с ЦФТПЭС создана и непрерывно работает с 2010 г. по настоящее время единственная в России система регистрации воздействия космической погоды на энергосистему [Sakharov et al., 2007; 2009]. Данная система регистрации расположена на Кольском полуострове и в Карелии и включает в себя 5 станций (рис. 1). Измеряемым параметром является квазипостоянный ток, протекающий в глухозаземленной нейтрали автотрансформатора, который связан с ЛЭП. Для исследования выбраны подстанции Лоухи, Кондопога, Выходной на магистральной линии 330 кВ и подстанция Ревда на линии 110 кВ. Координаты и коды станций даны в табл. 1. Имеющийся выбор точек измерения позволяет при развитии магнитосферного возмущения регистрировать ГИТ на магистральной линии, ориентированной в С-Ю направлении.

Поскольку в непосредственной близости от ЛЭП магнитометрические наблюдения невозможны, использованы данные магнитных станций в изучаемом регионе, принадлежащие сети IMAGE ([www.geo.fmi.fi/image](http://www.geo.fmi.fi/image)) (рис. 1, табл. 1). Комбинируя магнитные обсерватории, ближайшие к станциям ГИТ, можно сформировать следующие локальные пары станций: KND-HAN, LKH-OUL, RVD-LOZ, и VHD-IVA.

### Характеристики variability геомагнитного поля

Для описания вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля по величине и направлению применены следующие характеристики. Для наглядного представления векторного поля можно воспользоваться программой, рисующей последовательность “фотографий” векторного поля, каждая из которых представляет собой векторное поле в точках наблюдения в координатах широта – долгота для конкретного момента времени. Эта методика используется, например, в системе сбора и анализа 1-мин мировых данных по геомагнитному полю SuperMAG ([supermag.jhuapl.edu](http://supermag.jhuapl.edu)). Однако такой подход будет представительным только при наличии достаточно плотной двумерной сети магнитных станций и пунктов регистрации ГИТ. В нашем же случае, как станции ГИТ, так и магнитные обсерватории образуют цепочки, вытянутые в долготном (С-Ю) направлении. В этом случае целесообразно применить следующие подходы.

**Векторная диаграмма.** Векторная диаграмма представляет в сжатом виде временную эволюцию меридионального профиля вектора магнитных



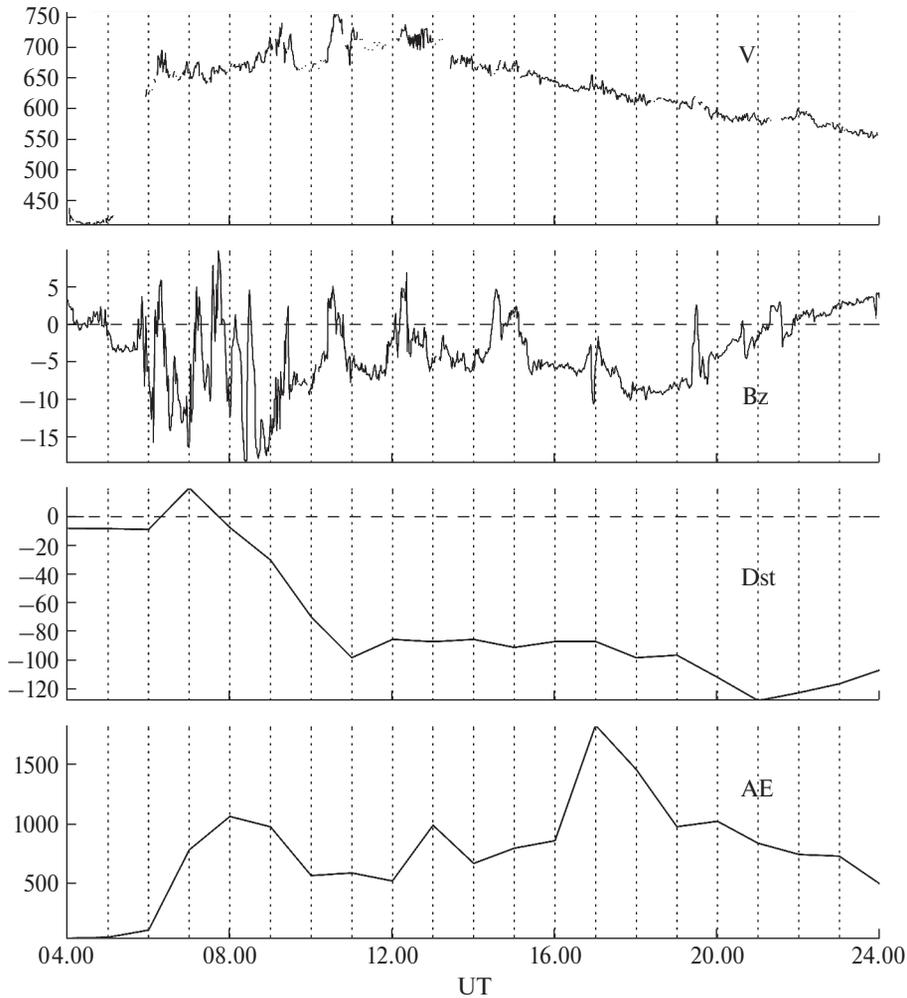
**Рис. 1.** Пункты системы регистрации ГИТ в ЛЭП (квадраты) и магнитные станции сети IMAGE (кружки). Геомагнитная сетка координат показана сплошной линией, географическая – пунктирной.

возмущений. Чтобы представить картину динамики геомагнитных возмущений и ионосферных токов вдоль меридионального профиля, геомагнитные возмущения  $\Delta \mathbf{B} = \{\Delta X, \Delta Y\}$  и их векторные производные  $d\mathbf{B}/dt = \{\partial_t X, \partial_t Y\}$  для каждой станции профиля рисовались на одном графике в виде последовательно сдвинутых по времени векторов возмущений. Такая техника использовалась, например, в работе [Fries-Christensen et al., 1988] при анализе холловских ионосферных вихрей. Возмущение геомагнитного поля считалось относительно фонового геомагнитного поля,  $\Delta \mathbf{B} = \{X - X_0, Y - Y_0\}$ . Производная считается по формуле  $\partial_t B(t) = (B(t + \Delta t) - B(t - \Delta t)) / 2\Delta t$ .

Возмущение магнитного поля  $\Delta \mathbf{B}$  в точке наблюдения связано с эквивалентным ионосферным

**Таблица 1.** Магнитные станции

Станция	Код	Географ. широта	Географ. долгота
Nordkapp	NOR	71.09	25.79
Ivalo	IVA	68.70	27.30
Lovozero	LOZ	67.97	35.08
Pello	PEL	66.90	24.08
Oulu	OUL	64.52	27.23
Hankasalmi	HAN	62.30	26.65



**Рис. 2.** Межпланетные и геомагнитные параметры во время магнитной бури 17 марта 2013 г., 04–24 UT: скорость солнечного ветра [км/с], Bz компонента межпланетного магнитного поля [нТл], Dst индекс [нТл], авроральный AE-индекс [нТл].

током  $\mathbf{J}$  над ней следующим образом:  $\Delta\mathbf{B} = (2\pi/c) [\mathbf{J}\mathbf{n}]$ , где  $\mathbf{n}$  – нормаль к плоскости. Вектор  $\mathbf{J}$  повернут на  $\pi/2$  по часовой стрелке по отношению к  $\Delta\mathbf{B}$  (но его величина будет указываться в нТл).

**RB-метод.** Этот метод дает возможность ввести количественный параметр  $RB$ , который показывает, испытывает ли векторное поле вариации по направлению или по величине. Для 2D-случая  $\mathbf{V}(t) = \{X, Y\}$  параметр  $RB$  для временного ряда длиной  $N$  точек определяется следующим образом [Du et al., 2005]:

$$RB = 1 - \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \cos_x \alpha\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \cos_y \alpha\right)^2},$$

где модуль геомагнитного возмущения  $|\Delta\mathbf{B}| = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2}$  и направляющие косинусы  $\cos_x \alpha = \Delta X / |\Delta\mathbf{B}|$ ;  $\cos_y \alpha = \Delta Y / |\Delta\mathbf{B}|$ .

Параметр  $RB$  не зависит от интенсивности возмущения. При  $RB \rightarrow 1$  исследуемое векторное поле

испытывает хаотические вариации во всех направлениях. Значения параметра  $RB \rightarrow 0$  показывают, что поле варьируется только по величине, но не по направлению.

### Магнитная буря 17 марта 2013 г.

Магнитная буря началась с подхода к земной магнитосфере межпланетной ударной волны, которая проявилась на земной поверхности в виде импульса SC (sudden commencement) в ~06 UT (рис. 2). В этот момент скорость солнечного ветра резко увеличилась с ~400 до ~650–700 км/с. Межпланетное магнитное поле стало антипараллельным геомагнитному полю, что обеспечило пересоединение полей и постоянное поступление энергии в магнитосферу. Индекс Dst, характеризующий интенсивность магнитной бури, упал до –100 нТл и оставался на этом уровне. В максимуме бури (~21 UT) Dst-индекс достигает значений –120 нТл. Авроральный

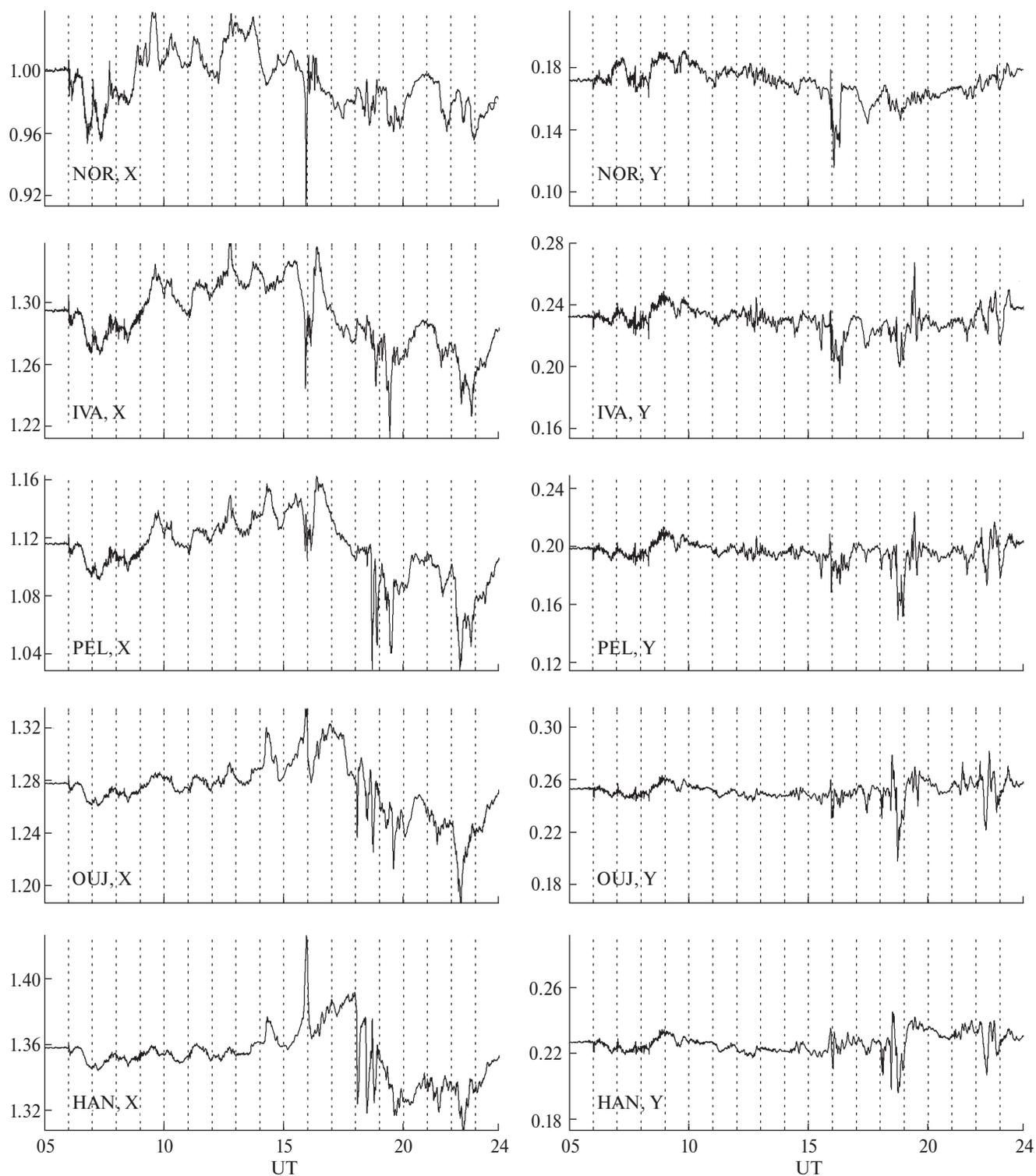
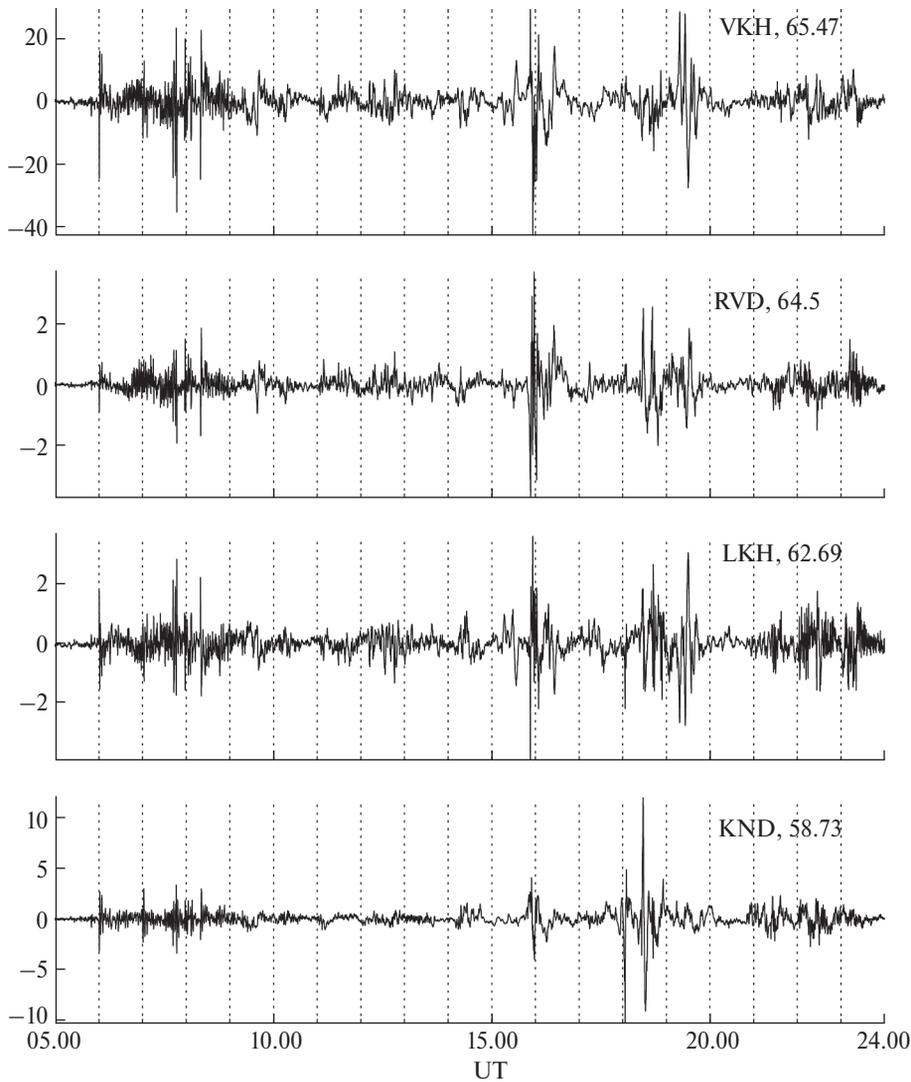


Рис. 3. Геомагнитное поле [ $10^4 \cdot$  нТл] по данным станций сети IMAGE (NOR, IVA, PEL, OIJ, HAN) во время магнитной бури 17 марта 2013 г., 05-24 UT: слева – X-компонента, справа – Y-компонента.

AE индекс, характеризующий интенсивность аврорального электроджета и суббури, резко возрос до  $\sim 1000$  нТл и оставался повышенным. Всего за 17 марта 2013 г. AE индекс показывает появление трех авроральных активизаций: (1) сразу

после SC AE начинает расти и достигает максимума  $\sim 1100$  нТл в  $\sim 08$  UT, (2) индекс подрастает после  $\sim 12$  UT и достигает максимума  $\sim 1000$  нТл в  $\sim 13$  UT, (3) самое сильное усиление  $> 1800$  нТл происходит в  $\sim 17$  UT.



**Рис. 4.** Данные системы регистрации ГИТ [А] со станций VHD, RVD, LKH, KND во время магнитной бури 17 марта 2013 г., 05–24 UT. Географические широты пунктов регистрации указаны после их кода.

Вариации геомагнитного поля, зарегистрированные станциями сети IMAGE во время этой магнитной бури, приведены на рис. 3. Сопоставление X- и Y-компонент показывает, что вариации по X-компоненте более интенсивны, чем по Y-компоненте, т.е.  $|\Delta X| \gg |\Delta Y|$ .

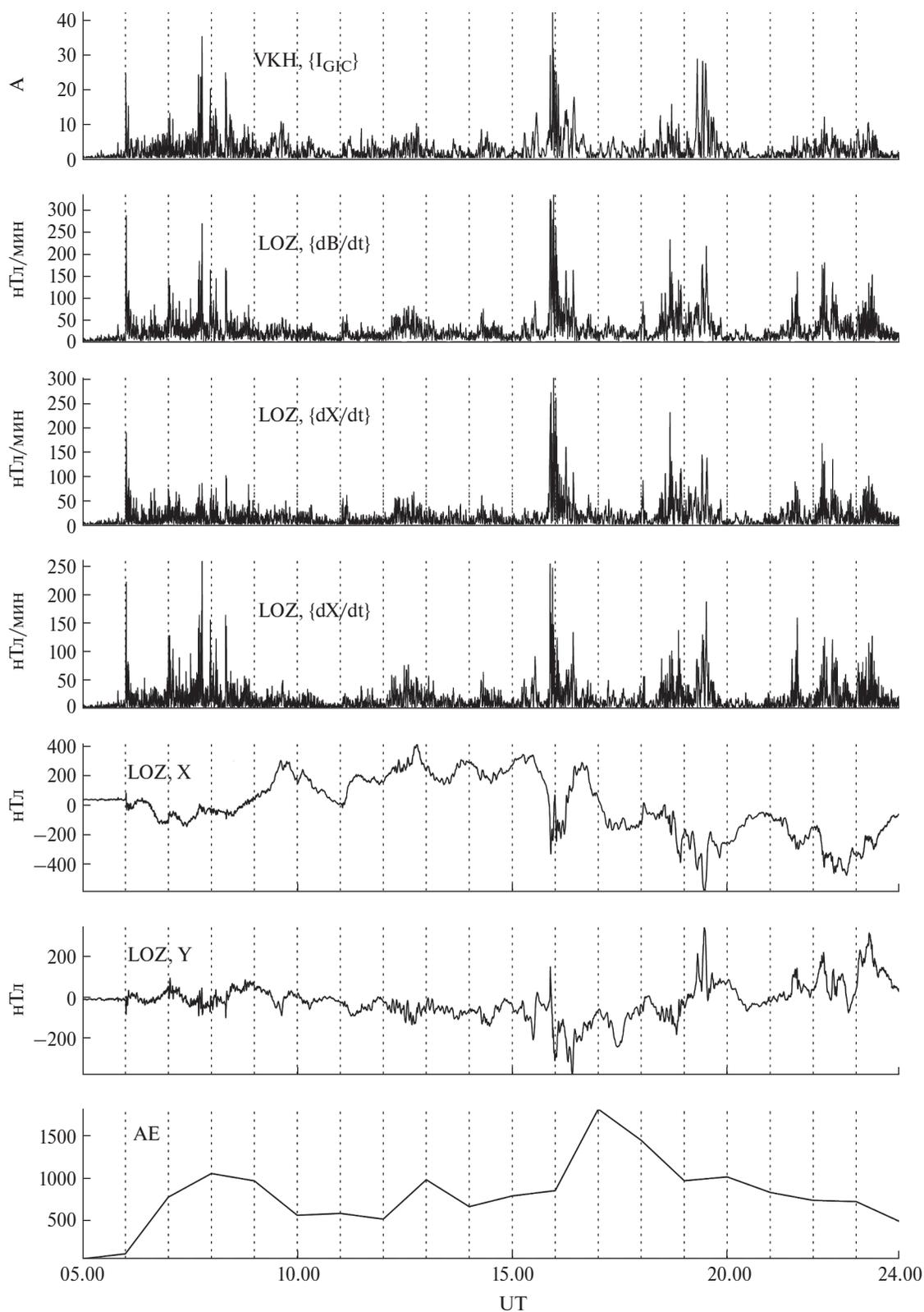
Система станций ГИТ зарегистрировала несколько заметных всплесков интенсивности ГИТ (рис. 4). Пиковая величина ГИТ на разных станциях сильно отличается: VKH  $\sim 70$  А, LKH  $\sim 6$  А, KND  $\sim 20$  А, т.к. эти измерения не калиброваны между собой. Началу роста AE индекса во время каждой из трех активизаций соответствует всплеск величины  $|d\mathbf{B}/dt|$  (до 250 нТл/мин) и интенсивности ГИТ (в  $\sim 06\text{--}08$  UT,  $\sim 16$  UT и  $\sim 18$  UT). Однако нет однозначной связи между интенсивностью суббури (характеризуемой AE-индексом) и величиной ГИТ. Например, хотя активизация (2) сопоставима по величине

индекса AE с активизацией (1), мощность ГИТ во время активизации (2) гораздо слабее. В то же время наблюдаются всплески ГИТ в  $\sim 19\text{--}20$  UT и в  $\sim 2130\text{--}2330$  UT, при которых AE индекс даже начинает несколько уменьшаться.

Сопоставление амплитуд магнитных возмущений  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  с амплитудами производных  $|dX/dt|$ ,  $|dY/dt|$  и полной производной  $|d\mathbf{B}/dt|$  (рис. 5) показывает, что хотя  $|\Delta X| \gg |\Delta Y|$ , но  $|dX/dt|$  и  $|dY/dt|$

**Таблица 2.** Станции по регистрации ГИТ

Выходной	VKH	68.83	33.08
Ревда	RVD	67.77	34.99
Лоухи	LKH	65.77	31.08
Кандопога	KND	62.21	34.28



**Рис. 5.** Сопоставление амплитуд ГИТ [А], амплитуд полной производной  $[dB/dt]$  [нТл/с], амплитуд производных  $[dX/dt]$  и  $[dY/dt]$  [нТл/с] и магнитных возмущений  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  [ $10^4 \cdot$  нТл] на близких станциях VKH и LOZ за период 05–10 UT. На нижней панели показаны вариации AE-индекса.

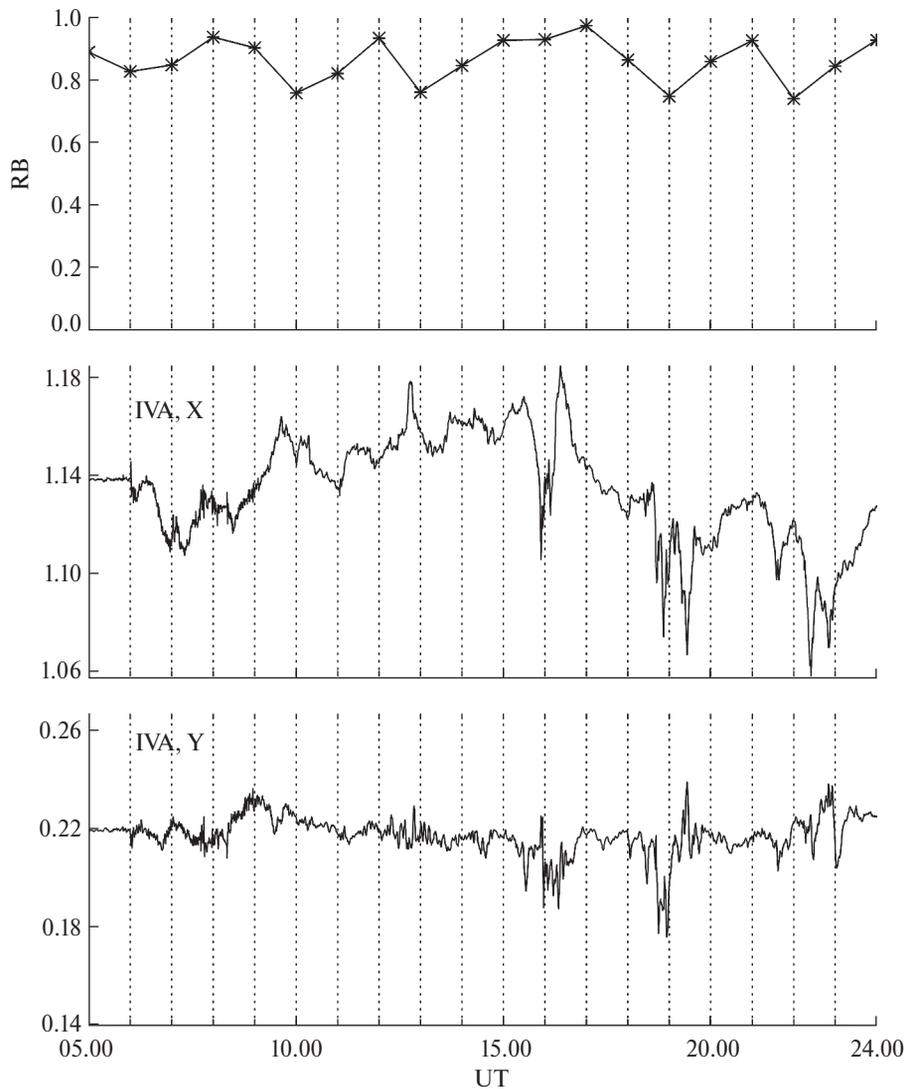


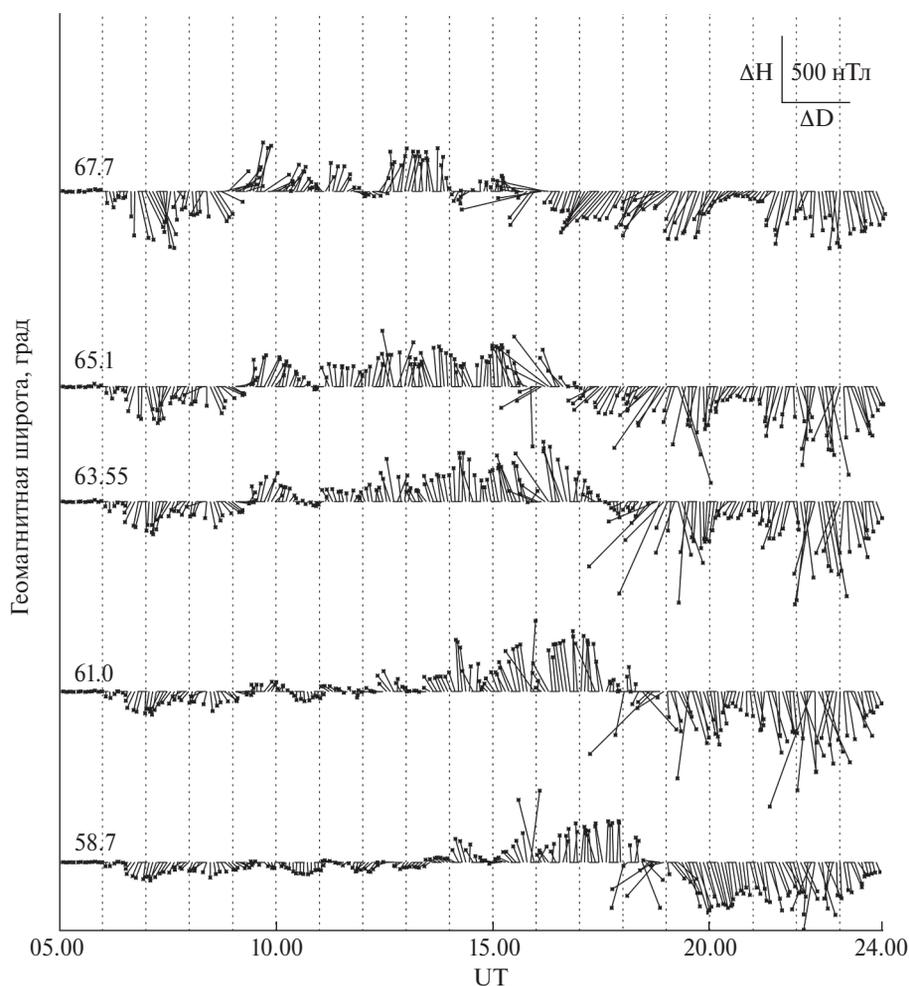
Рис. 6. Временные вариации параметра  $RB$ , рассчитанного по магнитным возмущениям (нижние панели) на станции IVA за период с 05 UT до 24 UT (с шагом 30 мин.).

оказываются сопоставимыми (т.е. малые  $\Delta Y$  не означают малости  $dY/dt$ ) и дают соизмеримый вклад в повышение  $|dB/dt|$ . Оценки коэффициентов корреляции  $R$  между интенсивностью ГИТ и амплитудами производных геомагнитного поля для интервала 07–10 UT дает следующие результаты:  $R(|dX/dt| - |I_{GIC}|) = 0.45$ ,  $R(|dY/dt| - |I_{GIC}|) = 0.61$ , и  $R(|dB/dt| - |I_{GIC}|) = 0.63$ . Таким образом, величина полной производной  $|dB/dt|$  лучше коррелирует с вариациями ГИТ, чем отдельные компоненты, при этом производная по Y-компоненте даже лучше коррелирует с вариациями тока, чем производная по X-компоненте. Для других временных интервалов тенденция такая же.

Применение  $RB$ -параметра (рис. 6) показывает, что во время магнитной бури геомагнитное поле меняется не только по величине, но и по направлению, т.к.  $RB \sim 1$ . Действительно, на станции IVA этот параметр варьировался в пределах 0.7–0.9. Остальные

магнитные станции дают примерно тот же результат. Таким образом, вариации геомагнитного поля нельзя считать обусловленными только вариациями интенсивности аврорального восточно-западного электроджета.

Имеющиеся магнитометры преимущественно расположены в долготном направлении вдоль геомагнитного меридиана. Благодаря такой ориентации можно применить метод векторных диаграмм. Динамика магнитных возмущений (рис. 7) показывает, что происходило не только изменение величины магнитного возмущения, но и его ориентации. С 06 до 09 UT возмущения ориентированы преимущественно в направлении к югу, затем их ориентация сменилась на северное направление, и после 18 UT они снова направлены к югу. Эти вариации обусловлены сильными вариациями направления регионального ионосферного тока.



**Рис. 7.** Вариации вектора магнитных возмущений вдоль меридионального профиля (векторная диаграмма) за период с 05 UT до 24 UT (с шагом 5 мин.).

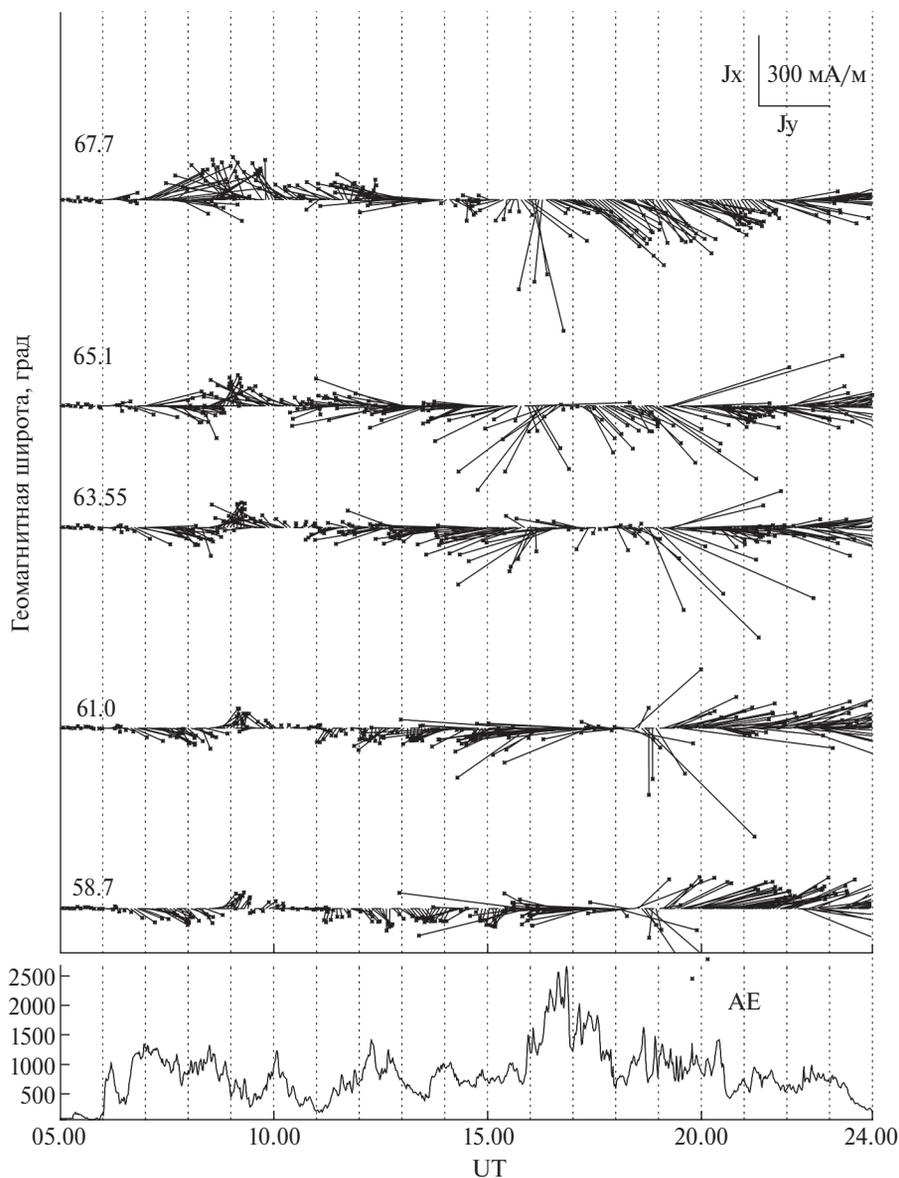
Картина эквивалентных ионосферных токов (рис. 8) показывает, что сразу после SC токи текли преимущественно на восток, затем их направление поменялось на обратное. Наконец, в период с 16 до 18 UT направление токов снова изменилось к восточному. Этот переход выглядит как переход от одной вихревой токовой системы к другой. Хотя крупномасштабная структура ионосферных токов определяется восточно-западным электроджетом, на более мелком региональном уровне токи испытывают сильные вариации по направлению. В результате ГИТ направлены примерно в равной степени как в В-З, так и в С-Ю направлениях. Данные меридиональной цепочки магнитных станций дают возможность оценить масштабы вихревых токовых систем по широте: качественно этот масштаб составляет  $4.2^\circ$ – $4.8^\circ$ , т.е. порядка 500 км (рис. 9).

Ориентация ГИТ соответствует вектору  $d\mathbf{B}/dt$ , повернутому на  $90^\circ$  против часовой стрелки (это, строго говоря, справедливо для плоского падающего поля и горизонтально-однородной проводимости земной коры). Построенная таким образом

векторная диаграмма эквивалентных ГИТ показывает, что индуцированные токи во время всплесков хаотично ориентированы во всех направлениях (рис. 9).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее активные проявления космической погоды, такие как возмущения геомагнитного поля и ионосферы, возбуждение ГИТ в проводящих конструкциях, сбои в системах радиосвязи и навигационных спутниковых систем и т.п. наблюдаются в высоких широтах. Общее количество энергии, выделяющейся при магнитной буре средней интенсивности, составляет около 1400 ГВт, что почти вдвое превышает мощность всех электростанций США. Серьезные экономические последствия для глобального рынка электроэнергии проявляются даже тогда, когда катастрофических нарушений, вызванных космической погодой, не наступает. Forbes and St. Cyr [2008] показали, что рыночные цены на



**Рис. 8.** Картина вариаций эквивалентных ионосферных токов  $J$  вдоль меридионального профиля за период с 05 UT до 24 UT (с шагом 5 мин.). На нижней панели даны вариации аврорального индекса AE.

различных национальных рынках электроэнергии статистически связаны с локальными геомагнитными возмущениями. Таким образом, даже если во время магнитных бурь не происходит потери технологического оборудования, ГИТ в региональных энергетических сетях оказывают существенное влияние на устойчивость экономики. Эти и многие другие примеры диктуют необходимость более глубокого изучения влияния космической погоды на мировую инфраструктуру.

Особую опасность эти факторы предоставляют для безопасной работы технологических систем в арктической зоне Российской Федерации, т.к. РФ располагает самыми протяженными нефтегазопроводами, линиями электропередач

и транспортными магистралями. Несмотря на исключительную важность таких исследований, российское академическое сообщество практически не занимается подобными задачами, а производственные компании РФ в настоящий момент не показывают заинтересованности в рачительном управлении технологическими системами. Расчет возможных уровней ГИТ при типичных и экстремальных магнитных бурях, который может быть использован операторами сетей для принятия необходимых мер для снижения риска катастрофических последствий, является исключительно актуальной задачей.

В то же время в технологически развитых странах, расположенных как на высоких, так и низких

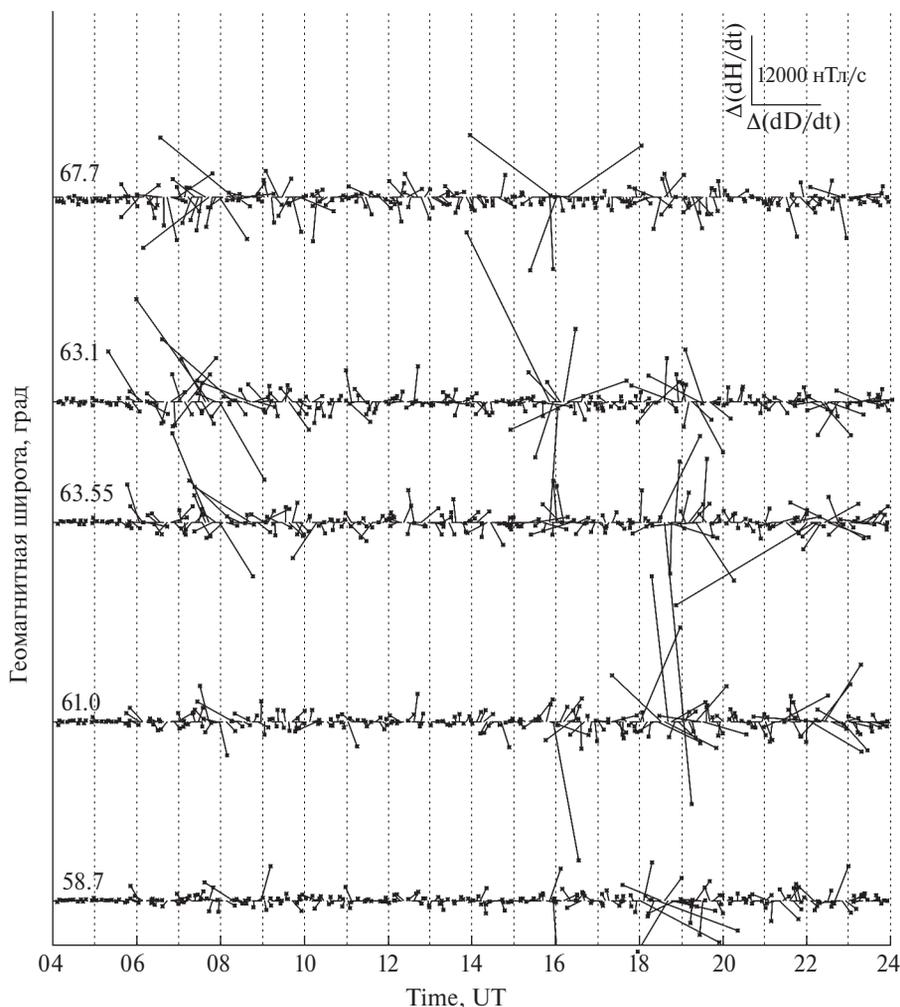


Рис. 9. Вариации вектора  $d\mathbf{B}/dt$  вдоль меридионального профиля (векторная диаграмма) за период с 05 UT до 24 UT (с шагом 5 мин).

широтах, активно ведутся работы по созданию систем мониторинга и прогноза воздействия различных факторов космической погоды на наземные технологические и спутниковые системы. Однако в своем большинстве они имеют региональный характер и непосредственно не могут быть применены к региону Российской Арктики. Зачастую полученные результаты являются коммерческой собственностью и недоступны для мирового научного сообщества. Наиболее разработанной моделью ГИТ к настоящему времени является 3D-модель, представленная в работе [Puthe and Kuvshinov, 2013]. Эта модель позволяет рассчитывать ГИТ от крупномасштабных источников (магнитосферный кольцевой ток) на средних широтах ( $<55^\circ$ ) при модельной проводимости литосферы. Расчетные пиковые значения ГИТ достигают  $\sim 50$  мВ/км для бури с  $Dst \sim 300$  нТ. Однако эта модель не может быть применена в высоких широтах, где более интенсивные возмущения создаются более локализованными и динамичными суббуревыми

процессами. Так,  $>80\%$  спектральной мощности вариаций геомагнитного поля на авроральных широтах сосредоточено на временных масштабах  $<8$  мин [Wintoff et al., 2005]. Анализ данных Кольской электроэнергетической сети показал, что всплески ГИТ появляются преимущественно в ночные часы при авроральных суббурях [Sakharov et al., 2009].

В литературе появление ГИТ часто интерпретируется как результат флуктуаций аврорального ионосферного электроджета, текущего преимущественно в В-З направлении. В связи с этим для расчетов ГИТ использовались модели генерации ГИТ протяженным восточно-западным ионосферным током [Boteler et al., 1997; Viljanen and Pirjola, 1994]. На основании таких моделей делался вывод о том, что преимущественно технологические системы, вытянутые в широтном направлении, подвержены влиянию магнитных бурь и суббурь. Примененная нами векторная техника представления вариаций геомагнитного поля и его векторной производной

наглядно показала гораздо большую вариабельность величины  $d\mathbf{B}/dt$  по направлению по сравнению с  $\Delta\mathbf{B}$ . Количественная оценка вариабельности  $RB$  подтвердила, что вариации геомагнитного поля происходят в сравнимой степени как по величине, так и по направлению. Эти результаты показывают важность учета мелкомасштабных токовых структур для расчета ГИТ. Полученное распределение  $d\mathbf{B}/dt$  не может быть объяснено простой моделью протяженного ионосферного тока и требует учета полей от нестационарных вихревых структур, создаваемых локальными продольными токами. Хотя амплитуды тока в таких структурах сравнительно невелики и не могут существенно повлиять на распределение  $\Delta\mathbf{B}$ , но их временные вариации достаточно быстрые, и тем самым они заметно влияют на распределение  $d\mathbf{B}/dt$ .

Мы располагали данными меридиональной цепочки магнитных станций, что дает возможность оценить масштабы вихревых токовых систем только по широте. Магнитные возмущения от токовых систем с размерами меньшими  $\sim 10^2$  км не будут видны на наземных магнитометрах. Рис. 9 показывает, что качественно масштаб вихревых возмущений составляет  $4.2^\circ - 4.8^\circ$ , т.е. порядка 500 км. Более строгие количественные оценки можно будет провести с помощью численной модели. Мелкомасштабные токовые системы связаны с нестационарными вихревыми структурами, создаваемыми локальными продольными токами. В принципе, плотности ионосферных и продольных токов могут быть оценены по величине магнитного возмущения. Однако для возбуждения ГИТ важна не величина ионосферного тока, а его изменчивость во времени. Предположим, что мелкомасштабные вихревые токовые системы возникают и полностью исчезают на фоне аврорального электроджета. Воспользуемся соотношением для максимального магнитного возмущения на земной поверхности от вихря холловских токов, создаваемого токовой трубкой радиуса  $\delta$ , с втекающим продольным током  $j_{\parallel}$  в центре и вытекающим по краям [Pilipenko et al., 1999]:

$$\frac{j_{\parallel} [\text{A}/\text{m}^2]}{b^{(g)} [\text{nT}]} \simeq \frac{0.1 \left( \frac{\Sigma_P}{\Sigma_H} \right) \left( \frac{\delta + h}{\delta} \right)^2}{4\pi\delta}$$

Для зарегистрированных в рассматриваемом событии величин  $b^{(g)} \sim 500$  нТл,  $\delta \sim 5 \cdot 10^5$  м,  $h = 10^5$  м,  $\Sigma_H/\Sigma_P = 2$  это соотношение дает оценку  $j_{\parallel} \simeq 5 \mu\text{A}/\text{m}^2$ .

Вопрос о соотношении крупномасштабного электроджета и наложенных на него локализованных токовых структур во время суббурь к настоящему времени не выяснен. Вывод о том, что нельзя игнорировать двумерный характер токовых систем для моделирования ГИТ при сильных возмущениях, подтверждает результаты в работе [Apatenkov et al., 2004]. Эти авторы для событий с большими  $d\mathbf{B}/dt$  разложили поле возмущения на вклады от азимутально протяженной токовой системы

(электроджета) и вихревой системы, используя аналитическую аппроксимацию для поля линейного тока и бездивергентной токовой системы, управляемой продольным током. Оценивался сравнительный вклад этих составляющих. В среднем, число событий с преобладающим вкладом электроджета и вихря примерно одинаково, однако большинство быстрых вариаций с  $d\mathbf{B}/dt > 100$  нТл/мин (доходящих до  $d\mathbf{B}/dt > 900$  нТл/мин) создавалось токами вихревой структуры и происходило в утренние часы. Роль вихревых структур возрастает с ростом  $d\mathbf{B}/dt$ -вариаций. Пространственный масштаб вихревых структур порядка от нескольких сотен до тысячи километров, хотя в работе использовались 1-мин данные, что несколько сглаживало быстрые вариации.

Таким образом, хотя наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности создаются авроральным электроджетом и ориентированы преимущественно в С-Ю направлении, в быстрые изменения магнитного поля, существенные для возбуждения ГИТ, заметный вклад вносят мелкомасштабные ионосферные токовые структуры, в которых обе горизонтальные компоненты вносят сопоставимый вклад. Наглядным подтверждением этого обстоятельства является сильная подверженность ЛЭП Кольского полуострова появлению ГИТ, хотя эта сеть вытянута в направлении С-Ю. При этом было замечено, что не каждое сильное геомагнитное возмущение обязательно вызывает появление интенсивных ГИТ [Sakharov et al., 2007]. Также не обнаружено четкой зависимости величины ГИТ от геомагнитного индекса  $K_p$ . По-видимому, нет однозначной связи между интенсивностью суббури и уровнем вариабельности геомагнитного поля.

К настоящему времени получены обнадеживающие результаты по прогнозированию интенсивности суббурь, характеризуемой АЕ индексом, по данным в реальном времени с межпланетных космических аппаратов [Weigel et al., 2003; Wintoft et al., 2005]. Однако задача прогноза ГИТ не сводится к задаче прогноза суббурь. Необходимая для оценки влияния геомагнитной активности на технологические системы в арктических и субарктических широтах модель должна описывать не только динамику крупномасштабной магнитосферно-ионосферной токовой системы, но и спорадически возникающие в ней быстропеременные локализованные продольные токи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крупномасштабная структура ионосферных токов на авроральных широтах определяется восточно-западным электроджетом, что проявляется в преобладании X-компоненты магнитных возмущений. Однако на более мелком региональном уровне эквивалентные ионосферные токи и создаваемые ими геомагнитные возмущения испытывают сильные вариации не только по величине, но и по направлению.

В результате ГИТ направлены как в В-З, так и в С-Ю направлениях. Векторная техника представления вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля и его производной показала гораздо большую вариабельность величины  $d\mathbf{B}/dt$  по сравнению с  $\Delta\mathbf{B}$ . Количественная оценка вариабельности с помощью RV-параметра подтвердила, что вариации геомагнитного поля происходят в сравнимой степени как по величине, так и по направлению. Эти результаты не могут быть объяснены простой моделью протяженного ионосферного тока и показывают важность учета полей мелкомасштабных токовых структур для расчета ГИТ. Таким образом, ГИТ представляют опасность для технологических систем, ориентированных не только в широтном, но и в долготном направлениях.

Работа поддержана грантом РНФ № 16-17-00121 (БВБ, ПВА). Данные сети ПГИ-ЦФТПЭС размещаются на сайте <http://eurisgic.org>, созданном для оценки риска воздействия геомагнитных возмущений на европейские энергетические системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ефимов Б., Сахаров Я., Селиванов В.* Геомагнитные штормы: исследование воздействий на энергосистему Карелии и Кольского полуострова // *Новости электротехники*. 2013. № 2. С. 80.
- Apatenkov S.V., Sergeev V.A., Pirjola R., Viljanen A.* Evaluation of the geometry of ionospheric current systems related to rapid geomagnetic variations // *Ann. Geophysicae*. 2004. V. 22. P. 63–72.
- Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H.* The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface // *Adv. Space Res.* 1998. V. 22. P. 17–27.
- Du J., Wang C., Zhang X.X., Shevryev N.N., Zastenker G.N.* Magnetic field fluctuations in solar wind, foreshock and magnetosheath: Cluster data analysis // *Chin. J. Space Sci.* 2005. V. 25 (5). P. 368–373.
- Erinmez I.A., Kappenman J.G., Radasky W.A.* Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 743–756.
- Forbes K.F., St. Cyr O.C.* Space weather and the electricity market // *Space Weather*. 2004. V. 2. P. S10003.
- Friis-Christensen E., McHenry M.A., Clauer C.R., Vennerstroem S.* Ionospheric traveling convection vortices observed near the polar cleft: A triggered response to sudden changes in the solar wind // *Geophys. Res. Lett.* 1988. V. 15. P. 253–256.
- Gummow R.A., Eng P.* GIC effects on pipeline corrosion and corrosion-control systems // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 1755.
- Kappenman J.G.* An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // *Space Weather*. 2005. V. 3. P. S08C01.
- Kelly G.S., Viljanen A., Beggan C., Thomson A.W.P., Ruffenach A.* Understanding GIC in the UK and French high voltage transmission systems during severe magnetic storms // *Space Weather*. 2016. V. 14. doi:10.1002/2016SW001469
- Lanzerotti L.J.* Space weather effects on technologies // *Space Weather, Geophys. Monogr. Ser. AGU*. V. 125. P. 11, 2001.
- Pilipenko V., Shalimov S., Fedorov E., Engebretson M., Hughes W.* Coupling between field-aligned current impulses and Pi1 noise bursts // *J. Geophys. Res.*, 1999. V. 104. P. 17419–17430.
- Pilipenko V., Shalimov S., Fedorov E., Engebretson M., Hughes W.* Coupling between field-aligned current impulses and Pi1 noise bursts // *J. Geophys. Res.*, 1999. V. 104. P. 17419–17430.
- Pirjola R., Kauristie K., Lappalainen H., Viljanen A., Pulkkinen A.* Space weather risk // *Space Weather*. 2005. V. 3. P. S02A02.
- Pulkkinen A., Pirjola R., Boteler D., Viljanen A., Yegorov I.* Modeling of space weather effects on pipelines // *J. Applied Geophysics*. 2001. V. 48. P. 233.
- Pulkkinen A.A., Bernabeu E., Eichner J., Beggan C., Thomson A.W.P.* Generation of 100-year geomagnetically induced current scenarios // *Space Weather*. 2012. V. 10. P. S04003.
- Püthe C., Kuvshinov A.* Towards quantitative assessment of the hazard from space weather. Global 3-D modellings of the electric field induced by a realistic geomagnetic storm // *Earth, Planets and Space*. 2013. V. 65. P. 1017.
- Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafychuk R.M.* Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula. Proc of 7-th International symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St-Petersburg, June 26–29, 2007, St-Petersburg. 2007. P. 291–293.
- Sakharov Ya.A., Danilin A.N., Ostafychuk R.M., Katkalov Yu.V., Kudryashova N.V.* Geomagnetically induced currents in the power systems of the Kola peninsula at solar minimum. Proc. of 8<sup>th</sup> Intern. Symp. on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology, St-Ptb. 2009. P. 237–238.
- Viljanen A.* The relation between geomagnetic variations and their time derivatives and implications for estimation of induction risks // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 631–634.
- Viljanen A., Nevanlinna H., Pajunpaa K., Pulkkinen A.* Time derivative of the geomagnetic field as an activity indicator // *Ann. Geophys.* 2001. V. 19. P. 1107–1118.
- Viljanen A., Pulkkinen A., Amm O., Pirjola R., Korja T., BEAR Working Group.* Fast computation of the geoelectric field using the method of elementary current systems and planar Earth models // *Annales Geophysicae*. 2004. V. 22. P. 101–113.
- Viljanen A.* European project to improve models of geomagnetically induced currents // *Space Weather*. 2011. V. 9. P. S07007.
- Viljanen A., Tanskanen E.* Climatology of rapid geomagnetic variations at high latitudes over two solar cycles // *Ann. Geophys.* 2011. V. 29. P. 1783–1792.
- Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D.* Solar wind coupling to and predictability of ground magnetic fields and their time derivatives // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. P. 1298.
- Wintoft P., Wik M., Lundstedt H., Eliasson L.* Predictions of local ground geomagnetic field fluctuations during the 7–10 November 2004 events studied with solar wind driven models // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23. P. 3095–3101.