ЧАСТОТЫ поЯВЛЕНИЯ экстремальных ЗНАЧЕНИЙ ПРОИЗВОДНЫХ ПО ВРЕМЕНИ геомагнитного поля, ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ, ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ НА СЕТИ IMAGE

Ягова Н.В.1, Лхамдондог А.Д.2, Гусев Ю.П.2, Пилипенко В. А.1,3, Федоров Е.Н.1

1ИФЗ РАН, 2НИУ МЭИ, 3ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ЦЕНТР РАН

По данным более чем 20 лет наблюдений геомагнитного поля на станциях сети IMAGE изучены частоты появления и пространственные масштабы экстремальных значений модуля производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля |d*b*/d*t|*, представляющих потенциальную опасность для промышленных электрических сетей. Показано, что наряду с известными и успешно прогнозируемыми возмущениями во время сильных магнитных бурь, экстремальные значения |d*b*/d*t|* могут возникать во время умеренных бурь и даже вне бури. В настоящее время прогноз таких возмущений невозможен и необходим анализ апостериори с целью выявления факторов космической погоды, благоприятных для возникновения экстремальных значений геомагнитно-индуцируемых токов (ГИТ).

Occurrence rates and spatial scales of geomagnetic field time derivatives |d*b*/d*t|* extremal disturbances potentially dangerous for electric lines are studied using more than 20 years of the IMAGE geomagnetic observations. Our analysis shows that along with the well known superstotm disturbances, extremal d*b*/d*t* values occur during moderate storms and even without any storm. Now such disturbances cannot be predicted and aposteriori analysis is necessary in order to reveal space weather parameters favorable for the occurrence of extremal |d*b*/d*t|* values.

**Введение**

Резкие изменения геомагнитного поля могут приводить к сбоям в работе энергосистем, вызванных геомагнитно-индуцированными токами (ГИТ). Из всех типов возмущений геомагнитного поля, наибольшими амплитудами и пространственными масштабами обладают магнитные бури. Они же являются и наиболее прогнозируемыми возмущениями, так как постоянный мониторинг ключевых параметров солнечного ветра и межпланетного поля ведется на космических аппаратах в точке либрации с упреждением порядка часа до подхода потока солнечной плазмы к магнитосфере Земли. Вероятность появления экстремальных возмущений горизонтальных компонент поля растет с интенсивностью бури. При этом возмущения смещаются на более низкие геомагнитные широты. Возмущения достигают максимальных значений на ночной стороне и связаны c развитием суббури. Статистический анализ параметров экстремальных геомагнитных возмущений для суббурь, возникающих во время бури и вне бури, проведен в работе (Viljanen, 2006).

С подробным обзором аварийных ситуаций, спровоцированных геомагнитными возмущениями, можно ознакомиться, например, в обзоре (Pulkkinen et al., 2008). Анализ моделей мировой экономики показал, что всего лишь 10% уменьшение подачи электроэнергии в индустриальных районах Земли из-за сильной геомагнитной бури может оказать на мировую экономику такое же влияние как региональные войны или глобальный мировой кризис (Schulte in den Baumen et al., 2014). В США после аварийного обесточивания (blackout) вызванного сильной магнитной бурей 1989 г. (Allen et al., 1989), по инициативе Координационного Совета Северо-восточной Электроэнергетической Системы, был разработан нормативный документ о мерах по повышению надежности энергетических систем при геомагнитных бурях. Тем не менее, в отечественной нормативной документации влияние ГИТ на электроэнергетические системы и на надежность работы электрооборудования до сих пор не учитывается, хотя задача учета, а в перспективе – прогноза, потенциально опасных для электрических сетей геомагнитных возмущений является актуальной именно для России из-за большой протяженности электрических сетей, в том числе на авроральных и субавроральных широтах.

Аварийные ситуации, связанные с ГИТ, вызываются несколькими физическими причинами. Наиболее важными являются возникновение разности потенциалов между заземленными нейтралями трансформаторов и смещение рабочей точки на кривой намагничивания магнитопровода (Boteler, 2014). Наблюдаемые при магнитных возмущениях токи «подмагничивания» сердечников трансформаторов напряжения и, тем более, сердечников силовых трансформаторов, сами по себе не могут быть опасны, но при наличии «подмагничивания» могут значительно возрасти пусковые токи силовых трансформаторов и возникнуть феррорезонансные явления в цепях с трансформаторами напряжения.

Gircis (2012) и Вахнина (2013) рассматривают влияние ГИТ на силовые трансформаторы в установившихся режимах и отмечают увеличение высших гармоник тока и дополнительный нагрев сердечников и обмоток трансформаторов. Однако, до настоящего времени не исследовано влияние ГИТ на переходные процессы, в частности, на пусковые токи, возникающие при подаче напряжения на трансформатор. При подаче напряжения на трехфазные силовые трансформаторы в обмотках возбуждаются апериодические составляющие. Ток намагничивания может на порядок превышать номинальный ток и приводить к срабатыванию релейной защиты. Апериодическая составляющая тока включения зависит от начальной фазы напряжения. ГИТ по механизму воздействия на силовые трансформаторы аналогичны апериодическим составляющим токов включения. Наиболее опасным является сложение эффектов ГИТ и токов включения. Влияние ГИТ на переходные процессы в силовых трансформаторах необходимо учитывать при выборе типов релейных защит, схеме их подключения к трансформаторам тока и при проверке отстройки параметров срабатывания релейных защит от пусковых токов.

Решение этой задачи включает три основных этапа: анализ параметров геомагнитных возмущений с целью создания эмпирической модели и возможного прогноза потенциально опасных возмущений, оценка электрических полей, возникающих в реальных сетях с учетом геоэлектрических параметров подстилающей поверхности и геометрии сети, расчет возможных эффектов в элементах сети. Настоящая работа посвящена анализу геомагнитных возмущений на основе данных регистрации магнитного поля на сети европейских авроральных и субавроральных станций и по сути является шагом к созданию эмпирической модели геомагнитных возмущений, потенциально опасных для промышленных электрических сетей.

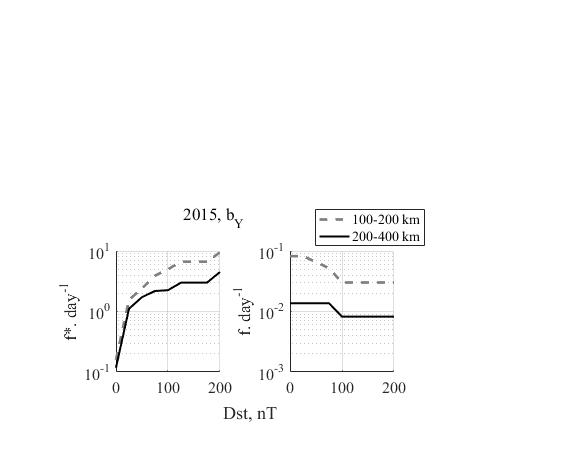
**Данные и обработка**

Анализировались возмущения горизонтальных компонент геомагнитного поля за период с максимума 23-го по максимум 25-го cолнечного цикла (1993-2015) по сети магнитометров IMAGE (Tanskanen, 2009). Для анализа использовались данные с временным разрешением 10 с. 23 станций, расположенных на геомагнитных широтах от 67о до 56о. Для характеристики интенсивности магнитных бурь использован индекс Dst.

Для оценки потенциально опасных возмущений оценивались значения модуля производной по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля |d*b*/d*t|*. Единичным событием считалось превышение модуля производной по времени горизонтальной компоненты магнитного поля |d*b*/d*t|* порогового значения *btb*=6нТл/с. Для возмущений, наблюдавшихся на двух или более станциях, оценивался пространственный масштаб в направлении нормали к компоненте (вдоль параллели для *bX* и вдоль меридиана для *bY*). Проанализированы возмущения, наблюдавшиеся в зонах 60-64o и 56-60o геомагнитной широты во время всех сильных магнитных бурь с Dst<-200 нТл, и проведен сплошной анализ четырех лет на разных фазах солнечного цикла (2005, 2009, 2012 и 2015 гг.). Для оценки вероятности возникновения возмущений, вызывающих потенциально опасные значения ГИТ, используются абсолютная *f* и относительная *f*\* частоты появления надпороговых возмущений c |d*b*/d*t|>btb,* где *f*\* определяется как отношение числа надпороговых возмущений |d*b*/d*t|* к числу дней с Dst, превышающим заданное значение.

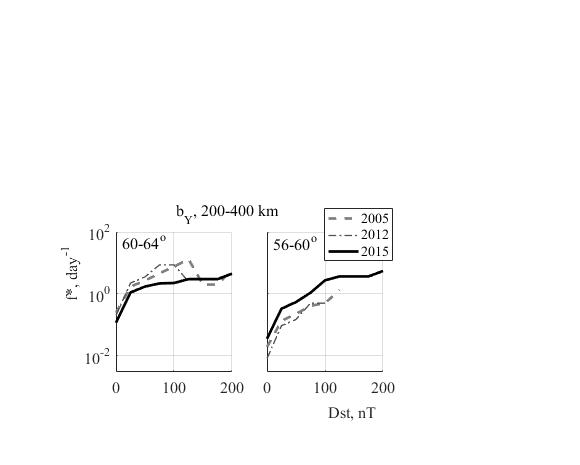
**Результаты**

Зависимость *f*\* для возмущений геомагнитного поля, наблюдавшихся в 2015 г. на геомагнитных широтах 60-64о, от Dst представлена на левой панели рис. 1. Частота появления надпороговых возмущений растет с интенсивностью бури. Но из-за уменьшения частоты появления магнитной бури с интенсивностью вклад больших бурь в полное количество надпороговых возмущений |d*b*/d*t|* не является определяющим. Зависимость абсолютной частоты появления *f* надпороговых возмущений |d*b*/d*t|* от Dst представлена на рис. 1 справа. Наибольший вклад в полное количество событий вносят умеренные бури с Dst около -100 нТл. При этом не существует порога по Dst для появления надпороговых значений |d*b*/d*t|*, то есть, они могут наблюдаться и вне бури при высокой авроральной активности.



**Рис. 1.** Зависимость относительной (*f*\*) и абсолютной (*f)* частот появления надпороговых возмущений *bY* компоненты геомагнитного поля в 2015 году на геомагнитных широтах 60-64о от интенсивности бури. Сплошными линиями показаны возмущения масштаба 200-400 км вдоль геомагнитного меридиана, штриховой – 100-200 км.

Существует заметный разброс частоты появления экстремальных возмущений |d*b*/d*t|* во время бурь одинаковой интенсивности, то есть, вероятность возникновения экстремального возмущения зависит и от других факторов космической погоды. Статистически это проявляется в неодинаковых зависимостях частот появления надпороговых возмущений |d*b*/d*t|* от Dst для разных лет солнечного цикла.



**Рис. 2.** Зависимость относительной частоты появления надпороговых возмущений *bY* компоненты геомагнитного поля на субавроральных (слева) и средних (справа) широтах от интенсивности бури на разных фазах солнечного цикла.

На рис. 2 представлены зависимости относительной частоты появления надпороговых возмущений |d*b*/d*t|*, имеющих пространственный масштаб от 200 до 400 км, от Dst для трех лет: 2005, 2012 и 2015, приходящихся, соответственно, на фазы спада, роста и максимума солнечной активности. В 2009 г. в минимуме солнечной активности таких возмущений не было зарегистрировано. Частота появления экстремальных значений |d*b*/d*t|* во время бури с данным Dst отличаются для разных фаз цикла солнечной активности и на разных геомагнитных широтах. Так на субавроральных широтах более опасными оказываются бури на фазах роста и спада солнечной активности, а для средних – в максимуме.

**Обсуждение и выводы**

Проведенное исследование экстремальных возмущений горизонтальных компонент магнитного поля и их пространственных масштабов выявило, что только небольшая доля потенциально опасных для электрических сетей возмущений геомагнитного поля связана с магнитными бурями большой интенсивности, а большая часть таких возмущений приходится на бури умеренной интенсивности. Выявленная существенная вероятность появления экстремальных возмущений |d*b*/d*t|* вне бури ставит вопрос о принципиальной осуществимости прогноза потенциально опасных возмущений.

Первым шагом для решения задачи прогноза являлось бы создание эмпирической модели для экстремальных возмущений производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля для заданной геомагнитной широты. Для создания такой модели необходим учет пространственного масштаба возмущений и выявление факторов космической погоды вне и внутри магнитосферы, контролирующих вероятность их появления. Возможность создания такой модели и в перспективе – прогноза потенциально опасных для электрических сетей геомагнитных возмущений, зависит от решения ряда промежуточных задач. Существуют как принципиальные физические ограничения, связанные с возможностью спонтанного возникновения возмущений внутри магнитосферы или «большой магнитосферы», т.е. магнитосфере вместе с магнитослоем, без триггера в солнечном ветре (Hurricane, 1999; Ягова, 2015), так и технические проблемы, вызванные недостаточной плотностью имеющихся в российской Арктике сетей регистрации геомагнитного поля с высоким временным разрешением.

**Благодарности**. Работа поддержана грантом РНФ № 16-17-00121 (Пилипенко В. А., Федоров Е. Н.). Авторы благодарят организации, поддерживающие наблюдения на сети IMAGE за предоставленные данные (http://space.fmi.fi/image/index.html).

**Литература**

Allen, J., L. Frank, H. Sauer, P. Reiff: Effects of the March 1989 solar activity, EOS, 14, 1479–1488, 1989.

Boteler, D.: Methodology for simulation of geomagnetically induced currents in power systems. J. Space Weather Space Clim., A21, 4, 2014.

Gircis, R., Vedante, K., Gramm, K.: Effects of geomagnetically induced currents on power transformers and power systems, CIGRE, A2-304, 2012.

Hurricane, O.A., Fong, B.H., Cowley, S.C., Coroniti, F.V., Kennel, C.F., Pellat, R., Substorm detonation: J. Geophys. Res., 104, 10221, 1999.

Pulkkinen, A., Pirjola, R., Viljanen, A.: Statistics of extreme geomagnetically induced current events, Space Weather, 6, S07001, 2008.

Schulte in den Bäumen H., D. Moran, M. Lenzen, I. Cairns, A. Steenge: How severe space weather can disrupt global supply chains, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 2749–2759, 2014.

Tanskanen, E.I.: A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993-2003 examined, J. Geophys. Res., 114, A05204, doi:10.1029/2008JA013682, 2009.

Viljanen, A., Tanskanen, E. I., Pulkkinen, A.: Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field, Ann. Geophys., 24, 725-733, 2006.

Вахнина, В.В., Кувшинов, А.А., Кузнецов, В.А.: Снижение рисков развития аварий в системах электроснабжения при геомагнитных бурях. Гелиогеофизические исследования. № 5, 115-123, 2013.

Ягова, Н.В.: Наклон спектра высокоширотных геомагнитных возмущений диапазона 1–5 мГц. Контролирующие параметры вне и внутри магнитосферы, Геомагнетизм и Аэрономия, 55, 35–44, 2015.