

Определение связности геомагнитной сети: синхронизация с глобальными солнечными индексами

Я. В. Золотухин, Н. С. Пыко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Abstract. Geomagnetic disturbances largely affect the performance of various engineering systems including power networks due to the increased risk of blackouts on major power grids leading to the loss of electric power in large urban communities [1], time delays in satellite radio transmissions including positioning and communication links as well as many other technological and human factors. The geomagnetic networks represent a novel approach that aims at providing additional information about the occurrence, classification and variability of various geomagnetic disturbances. Since pronounced magnetic storms are often associated with increased solar activity, here we study the synchronization patterns between the recently suggested geomagnetic network connectivity index and several well-established solar activity indices, using phase synchronization metric based on Hilbert transform. We reveal typical connectivity patterns including both quiet and disturbed days as well as during moderate geomagnetic storm conditions.

Keywords: *geomagnetic disturbances; geomagnetic network; solar activity; phase synchronization index; Hilbert transform*

I. ВВЕДЕНИЕ

Планета Земля непрерывно проявляет геомагнитное поле, характеризующееся временными вариациями. Интенсивные колебания электромагнитных полей могут проникать в работу различного электронного оборудования и даже приводить к перебоям в подаче электроэнергии [1, 2]. Сегодня современное общество сильно зависит от электронных технологий, а мощная магнитная буря может привести к повсеместному отключению электрооборудования с потенциально разрушительными последствиями. Таким образом, необходимо получить предсказания геомагнитных возмущений, которые могут быть получены путем анализа исторических данных геомагнитных возмущений.

Компонента Н геомагнитного поля Земли является характерным предиктором геомагнитных возмущений, поэтому анализ был проведен с этим параметром. Данные для нашего исследования были взяты из открытой базы данных INTERMAGNET для изучения геомагнитного поля в Северном полушарии.

Для локального анализа геомагнитной обстановки мы используем модель, реализованную в виде графа связности,

Мы хотели бы выразить признательность Министерству образования и науки Российской Федерации за финансовую поддержку этой работы в рамках Основного государственного заказа Санкт-Петербургского электротехнического университета.

в котором узлы соответствуют конкретным наборам данных, полученным из разных обсерваторий, а ребра связаны с их взаимной корреляцией. Соответственно, общая кооперативность графа определяется суперпозицией кросс-корреляций для всех доступных ребер. Чтобы связать эту общую кооперативность графов с солнечной активностью, здесь мы анализируем индекс связи геомагнитной сети и несколько хорошо зарекомендовавших себя индексов солнечной активности с использованием показателя фазовой синхронизации на основе преобразования Гильберта.

II. ГРАФ СВЯЗНОСТИ ГЕОМАГНИТНОЙ СЕТИ

Недавно мы предложили сетевой метод оценки геомагнитных возмущений, наблюдаемых во время магнитной бури. Хорошей характеристикой для этого является кооперативность геомагнитной сети, которая может быть оценена как из исторических, так и из реальных наблюдений. Эта модель реализуется в виде графа с узлами, представляющими исходные данные из обсерваторий в разных географических точках и ребрами, представляющими взаимные корреляции между наблюдаемыми возмущениями геомагнитного поля [3].

Прежде всего, мы перевели все данные в единую систему координат HDZ и сосредоточились только на анализе горизонтальной составляющей геомагнитного поля Н. Затем мы проанализировали исходные данные, первоначально взятые с 1-минутным разрешением в двухдневном движущемся окне. Также был рассчитан общий индекс кросс-корреляций для каждой пары ij , соответствующей обсерваториям i и j , (Красные линии на рис. 1). Наконец, мы оценили кросс-ковариацию с 24-часовым максимальным запаздыванием, ведущим к [4]

$$C_{ij}(-\tau) = [Ti(t)Tj(t-\tau)] - [Tj(t)Ti(t-\tau)],$$

где скобки характеризуют усреднение по каждому дню. Полученные функции взаимной корреляции нормированы к стандартному отклонению, как в [5]. Для каждого 2-дневного временного окна максимальные кросс-ковариации были нормированы к их стандартным отклонениям. Общая кооперативность $Coop$ была получена как средняя мера связи для всего графа, таким образом обеспечивая изменения кооперативности для всей изученной сети. На рис. 1 показан граф, представляющий общую сетевую модель с 32 узлами с имеющимися годовыми геомаг-

нитными наблюдениями с 2010 по 2015 год, расположенными в разных географических точках в Северном полушарии. Узлы показаны черными точками, а ребра показаны красными линиями.

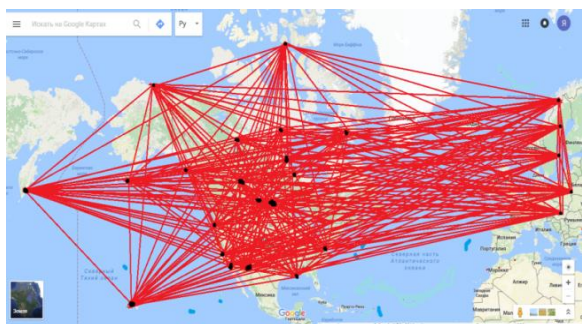


Рис. 1. Графическое представление сетевой модели, включающей набор доступных геомагнитных наблюдений из разных географических мест в Северном полушарии

III. ИССЛЕДОВАННЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ИНДЕКСЫ

Чтобы подтвердить, что наши данные точно соответствуют солнечной активности, мы анализируем диаграммы синхронизации между индексом кооперативности геомагнитной сети Соор и несколькими хорошо зарекомендовавшими себя индексами солнечной активности, используя метрику фазовой синхронизации на основе преобразования Гильберта. Индексы, представляющие интерес, включают такие, как индекс потока солнечного излучения, число солнечных пятен, индекс Лаймана-Альфа и т.д.

Индекс потока солнечной радиации (также известный как индекс F10.7) представляет собой измеренное значение солнечного излучения на частоте 2800 МГц, соответствующее длине волны 10,7 см [6]. Число солнечных пятен – это количество солнечных пятен и групп солнечных пятен, присутствующих на поверхности Солнца. Относительное число пятен R рассчитывается по формуле:

$$R = k(10g + s)$$

где g – количество групп солнечных пятен, s – количество одиночных пятен, k – индекс, который изменяется за счет местоположения и инструментария (также известный как фактор обсерватории). [7] Линия Лаймана-альфа представляет собой спектральную линию водорода [8]. Индекс AE получается из геомагнитных вариаций горизонтальной компоненты, наблюдаемых в отобранных (10–13) обсерваториях вдоль авроральной зоны в северном полушарии. [9]. Индекс возмущений шторма (Dst, Kyoto Dst) дает информацию об энергии кольцевого тока вокруг Земли, вызванного солнечными протонами и электронами [10]. PC индекс определяется максимальным изменением горизонтальной составляющей магнитного поля у полюсов Земли или может рассматриваться как детектор величины электрического поля, создаваемой в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой. Наконец, индекс Ap обеспечивает средний дневной уровень геомагнитной активности.

IV. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для исследования взаимной динамики индекса графа связности геомагнитной сети Соор и описанных выше показателей солнечной активности мы использовали подход, основанный на анализе разности фаз обрабатываемых процессов, подробно описанный в [14]. В соответствии с данным подходом мгновенные значения фаз определяются на основе преобразования Гильберта. Разность фаз двух процессов обрабатывается в скользящем окне. Соседние фазовые точки считаются принадлежащими интервалу синхронизации, если среднеквадратическое отклонение разности фазы в окне оказывается меньше заданного порога. Коэффициент фазовой синхронизации Syncs вычисляется как доля интервалов синхронизации в общей последовательности данных. Порог, с которым сравнивается среднеквадратическое отклонение разности фаз в скользящем окне, является одним из основных параметров применяемого алгоритма. На первом этапе исследований мы установили значения порогов, при которых коэффициент синхронизации показателя Соор в стационарных условиях с каждым из рассматриваемых показателей солнечной активности составляет 25%. Полученные интервалы синхронизации представлены на рис. 2. Верхний график на рис. 2 показывает изменения показателя Соор на протяжении 1000 часов наблюдений. Расположенные ниже графики иллюстрируют особенности интервалов синхронизации Соор с остальными показателями. На этих графиках сплошными линиями показаны разности фаз обрабатываемых рядов данных, а пунктирными линиями – их среднеквадратические отклонения, определенные в скользящем окне. Жирными линиями отмечены выявленные интервалы синхронизации, на основе которых для каждой пары анализируемых показателей был вычислен коэффициент фазовой синхронизации Syncs, составляющий 25%. При сравнении графиков видно, что интервалы синхронизации Соор и таких показателей как Lyman-alpha и F10.7, Ap и PC или AU и AE практически совпадают или весьма близки. В то же время интервалы синхронизации Соор и некоторых других показателей, например R, имеют индивидуальные особенности. На рис. 3 представлены аналогичные зависимости, полученные при тех же значениях порогов, с которыми сравниваются среднеквадратические отклонения разности фаз двух рядов данных, соответствующие периоду от 1 марта 2015 года до 11 апреля 2015 года. Сравнение аналогичных графиков на рис. 2 и рис. 3 показывает, что в нестационарных условиях степень синхронизации показателя Соор с такими показателями как Dst и Ap существенно увеличилась. При этом коэффициент синхронизации между Соор и показателями F10.7, PC и AL значительно уменьшился. При этом степень синхронизации между Соор и Lyman-alpha, R, AU и AE практически не изменилась. Исходя из данных результатов, можно сделать вывод о том, что индекс кооперативности геомагнитной сети Соор является хорошей альтернативой рассматриваемым глобальным солнечным индексам для выявления предикторов геомагнитных бурь. На рис. 1 и 2, выделен временной промежуток, когда было зафиксировано северное сияние в Санкт-Петербурге и близлежащих территориях.

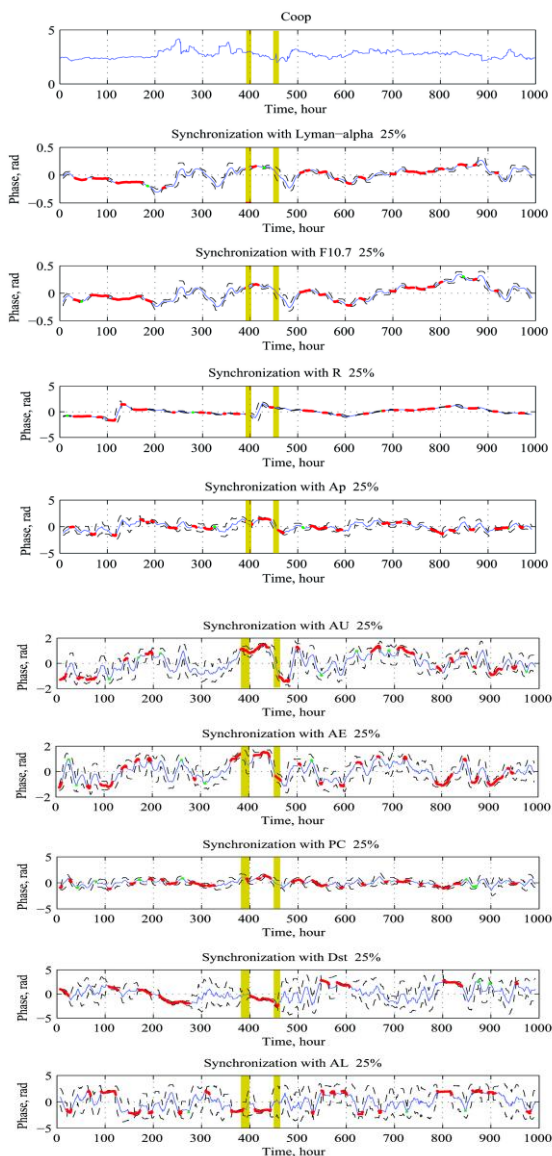


Рис. 2. Интервалы синхронизации между показателем Coop и другими показателями солнечной активности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mandrikova O.V., Solovyev I.S., Khomutov S.E., Geppener V.V., Klionskiy D.M., Bogachev M.I. Multiscale variation model and condition estimation algorithm of the Earth's magnetic field based on wavelet packets, *Annales Geophysicae*, (2017).
- [2] Pulkkinen Antti, et al. "Regional-scale high-latitude extreme geoelectric fields pertaining to geomagnetically induced currents." *Earth, Planets and Space* 67.1 (2015): 1-8.
- [3] Ya.V. Zolotukhin, O.A. Markelov, M.I. Bogachev. A network-based approach to the analysis of geomagnetic fluctuations, *Proc. ElConRusNW, IEEE* (2017): pp.1-2.
- [4] Josef Ludescher, Avi Gozolchiani, Mikhail I. Bogachev, Armin Bunde, Shlomo Havlin, Hans J. Schellnhuber. Improved El Nino forecasting by cooperativity detection.//*Proceedings of the National Academy of science of the USA*. 2013 Vol. 110 no.29.
- [5] Matzka J., Stolle C. Clasification quiet and disturbed days//*Helmholtz-Zentrum Posdam*. 2015 Available at:<http://www.gfz-potsdam.de/>

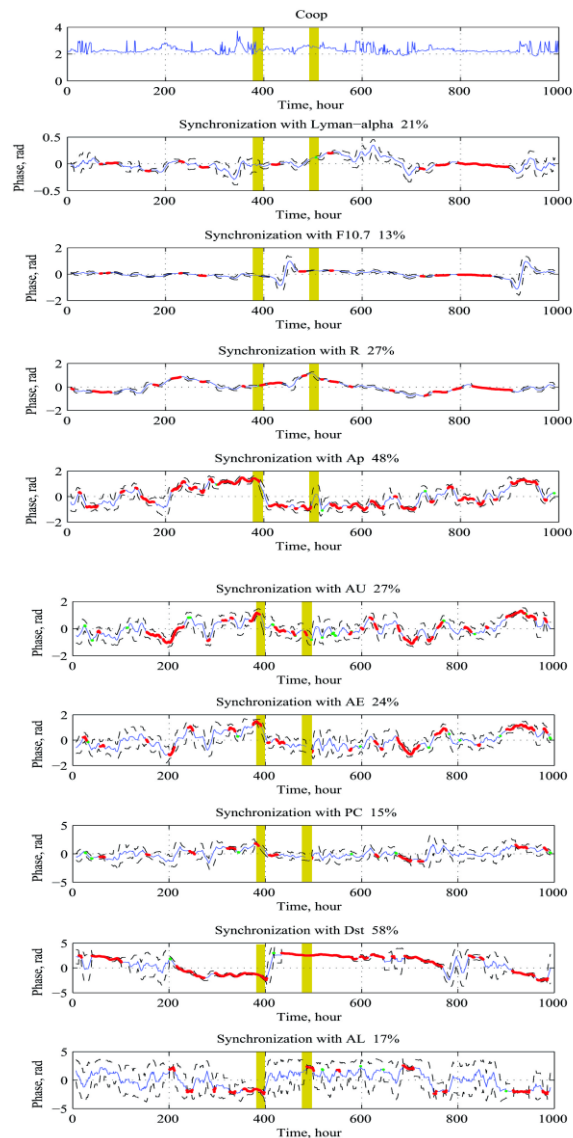


Рис. 3. Интервалы синхронизации между показателем Coop и другими показателями солнечной активности в нестационарных условиях

sektion/erdmagnetfeld/daten-produkte-dienste/kp-index/erklarung/qd-days/

- [6] Wolfram Heß: *Sonnenwetter-Fachbegriffe*.auf: Deutsche Welle.
- [7] Draine, Bruce T. (2010).*Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*. Princeton, N.J.: Princeton University Press. p. 83.
- [8] A.A. Nusinov, V.V. Katushina. (1994).Lyman-alpha line intensity as a solar activity index in the far ultraviolet range. *Institute of Applied geophysics*, p. 1
- [9] Clette, Frédéric; Svalgaard, Leif; Vaquero, José M.; Cliver, Edward W. "Revisiting the Sunspot Number". *Space Science Reviews*.
- [10] Toyohisa Kamei, Masahisa Sigura, and Tohru Araki (1992) *Auroral Electrojet Indices*. Kyoto University
- [11] N.S. Pyko, S.A. Pyko, O.A. Markelov, M.I. Bogachev, O.V. Mamontov. "Phase Synchronization in a Double-Loop Feedback Model of Blood Pressure Regulation". *Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 ElConRusNW)*, 2-3 February, St. Petersburg, Russia, 2016, pp. 817-821.