

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Итоги Электронного Геофизического Года
3–6 июня 2009 • Переславль-Залесский, Россия

Обнаружение и анализ геомагнитных событий методами нечеткой логики

Р. Г. Кульчинский,¹ Е. П. Харин,¹ И. П. Шестопалов,¹ А. Д. Гвишиани,¹ С. М. Агаян,¹ и
Ш. Р. Богоутдинов¹

Получено 25 декабря 2009; принято 12 февраля 2010; опубликовано 23 марта 2010.

A geomagnetic field is subject to fluctuations of different time scales. In order to describe the magnetic activity in the planetary scale there were established geomagnetic indexes: 24 hours' *C*-index, three hours' *Kp*-index, hourly indexes *Dst*, *AE* and others. Let us note that the principal idea of the introduction of these indexes was to give equal estimation of relative strength of disturbances in various observatories. However the more detailed study of the morphology of geomagnetic disturbances and their sources shows that various indexes of geomagnetic activity used nowadays show an activity of a geomagnetic field not on the whole Earth surface but in its separate regions. In the process of research of solar-terrestrial phenomena there emerged the necessity of simultaneous determination of the strength of geomagnetic disturbances in all observatories of the world stations' net i.e. an introduction of new parameters independent of geomagnetic latitudes and longitudes becomes necessary. To solve this problem a new geo-informational approach named "Discrete mathematical analysis" (DMA), FCARS algorithm in particular, is suggested. The approach has been developed by the Geophysical Centre of the Russian Academy of Sciences. The DMA is based on fuzzy logic methods and is meant to study multidimensional arrays and time series. The FCARS represents an attempt to model the logics of an interpreter who identifies "by eye" anomalies in records. This algorithm is supposed to be used for the purpose of further automated analysis of great arrays of data not analyzable by manual processing. The algorithm gives an estimation of limits of anomalies sought and conducts morphological review of these anomalies in form of initial, central and final stages with separation of strong and weak phases in the central stage. A sufficient "flexibility" of the algorithm is provided by a wide set of "rectifications" which appears during modelling of the work of an interpreter. As the result of the execution of these works based on algorithms of separation and analysis of anomalies in time series using fuzzy logic methods there were: introduced concepts of inner and outer strength of an anomaly of a geomagnetic variation; suggested an analysis of geomagnetic events based on data from the global network of observatories Intermagnet; described a new way of study of the dynamics of geomagnetic disturbances spreading. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Геомагнитные индексы; геомагнитные бури; методы нечеткой логики.

Ссылка: Кульчинский, Р. Г., Е. П. Харин, И. П. Шестопалов, А. Д. Гвишиани, С. М. Агаян, и Ш. Р. Богоутдинов (2010), Обнаружение и анализ геомагнитных событий методами нечеткой логики, *Росс. жс. наук о Земле*, 11, RE4003, doi:10.2205/2009ES000371.

Введение

Геомагнитное поле испытывает флуктуации различных временных масштабов. С целью описания магнитной активности в планетарном масштабе введены геомагнит-

¹Геофизический центр РАН, Москва, Россия

ные индексы. Наиболее простой индекс геомагнитной активности, C -индекс, характеризует возмущенность геомагнитного поля в течение суток и имеет трехбалльную шкалу (0, 1, 2). Наиболее спокойные записи оцениваются нулем, наиболее бурные – числом 2. Такие определения, естественно, являются субъективными. Для того, чтобы сгладить следы индивидуальности, на смену C -индексу введен Ci -индекс, который вычисляется как среднеарифметическое значение Ci -индексов по данным 30 обсерваторий. Значения Ci -индекса вычисляются с точностью до одной десятой и изменяются от 0.0 до 2.0.

Для более коротких периодов (3 часа) используется наиболее распространенный индекс Kp , предложенный Бартельсом в 1949 г. как новый планетарный индекс. Но более детальное изучение морфологии геомагнитных возмущений и их источников показало, что используемые в настоящее время всевозможные индексы геомагнитной активности характеризуют активность геомагнитного поля не по всей поверхности Земли, а отдельных ее регионов. Так, даже при расчете планетарного Kp -индекса используют только 12 обсерваторий, расположенных между 63 и 48 северной и южной геомагнитными широтами. Позже введены индексы Kp , вычисляемые по 11 обсерваториям северного полушария и Ks , вычисляемые по 7 обсерваториям южного полушария.

Позже были введены часовые индексы Dst , AE и другие. Исторически сложилось так, что Kp и Km индексы являются мерами геомагнитной активности для средних широт; Dst характеризует интенсивность кольцевого тока, возникающего в экваториальной зоне во время магнитосферной бури; AE , AU , AL , AO – являются мерой геомагнитной активности в высоких широтах, они отражают изменение токов в ионосфере, связанное с электропотоками.

Отметим, что при введении этих индексов основной была идея – дать одинаковую оценку относительной силы возмущений на разных обсерваториях. Один и тот же индекс – Ki или Dst – соответствует разным вариациям магнитного поля Земли на разных широтах. При этом предполагается, что вдоль широт долготного изменения вариаций не существует, т.е. предполагается взаимодействие только одного магнитного диполя Земли с магнитосферой, а не полного магнитного поля, включающего в себя как дипольное поле, так и поля региональных и других аномалий. [Фельдштейн и Обриджо, 1980].

При исследовании же солнечно-земных явлений появилась необходимость одновременного определения величины возмущенности геомагнитного поля по всем обсерваториям мировой сети станций, т.е. введение новых параметров, независимых от геомагнитных широт и долгот. Для решения этой проблемы предлагается использовать алгоритмы, созданные в Геофизическом центре (ГЦ) РАН, основанные на методах нечеткой логики.

Исходные данные и обозначения

St – сеть станций Intermagnet, состоящая из 83 станций st_i : $St = \{st_i\}_1^{83}$.

$y_i = y_i(t) = y(st_i)(t)$ – ведущаяся на станции st_i запись магнитных возмущений.

T – период наблюдения и анализа всех записей $y_i(t)$.

F – один из разработанных в ГЦ алгоритмов поиска аномалий на записях $y_i(t)$ методами нечеткой логики: $F = \{DRAS, FLARS, FCARS\}$. [Агаян и др., 2005; Гвишани и др., 2003; Zlotnicki et al., 2005].

$F(y_i|T) = A_i$ – аномалия, найденная на записи y_i алгоритмом F с носителем $Supp A_i \subset T : A_i = y_i|_{Supp A_i}$.

Сила стационарной (внутренней) аномальности

Каждый из алгоритмов F представляет собой результат мягкого моделирования логики интерпретатора, ведущего “на глаз” поиск аномалий A_i на записи $y_i(t)$. Она состоит в следующем: специалист скользит взглядом по $y_i(t)$, оценивая для себя положительными числами $\Phi_{y_i}(t)$ активность небольших ее фрагментов $y_i|_{[t-\Delta, t+\Delta]}$. Так от исходной записи $y_i(t)$ интерпретатор переходит к неотрицательной функции $t \rightarrow \Phi_{y_i}(t)$, которую называют выпрямлением $y_i(t)$, поскольку более активным точкам на $y_i(t)$ соответствуют большие значения $\Phi_{y_i}(t)$.

Таким образом, поиск интерпретатором аномалий на записи сводится к поиску возвышенностей на ее выпрямлении, отвечающим наиболее активным участкам записи. Так же поступают и все алгоритмы F : они находят возвышенность B_i на Φ_{y_i} и их подножия $supp B_i$ отождествляют с аномалиями A_i на $y_i : A_i = y_i|_{supp B_i}$.

Алгоритм F дает оценку границ st_i -аномалии A_i и осуществляет их морфологический разбор в виде начальной, центральной и конечной стадии с выделением сильных и слабых фаз в центральной стадии.

Пример работы алгоритма F представлен на Рис. 1. Красным цветом выделены аномальные области, зеленым – потенциально аномальные, синим – фоновые (не аномальные) области магнитной записи.

Кроме того, алгоритм F позволяет придать точный смысл важному, но аморфному понятию силы $f(A_i)$ аномалии A_i , поэтому однозначности толкования $f(A_i)$ ожидать не стоит. Приведем два варианта $f(A_i)$, имеющие естественный статистический характер.

Вариант 1 (Конструкция Max). Алгоритм делит запись на аномальную и фоновую части: $T = A_i \oplus (T - A_i)$.

Обозначим через s_i среднее фоновое значение y_i на T :

$$s_i = \frac{\sum y_i(t) : t \in T - A_i}{|T| - |A_i|}$$

Определим $\text{Max}(A_i)$ как максимальное по модулю отклонение от s_i аномалии A_i :

$$\text{Max}(A_i) = \max(|y_i(t) - s_i| : t \in Supp A_i) \quad (1)$$

Вариант 2 (Конструкция MaxDisp). Пусть d_i фоновая дисперсия y_i на $T : d_i$ – среднее отклонение по

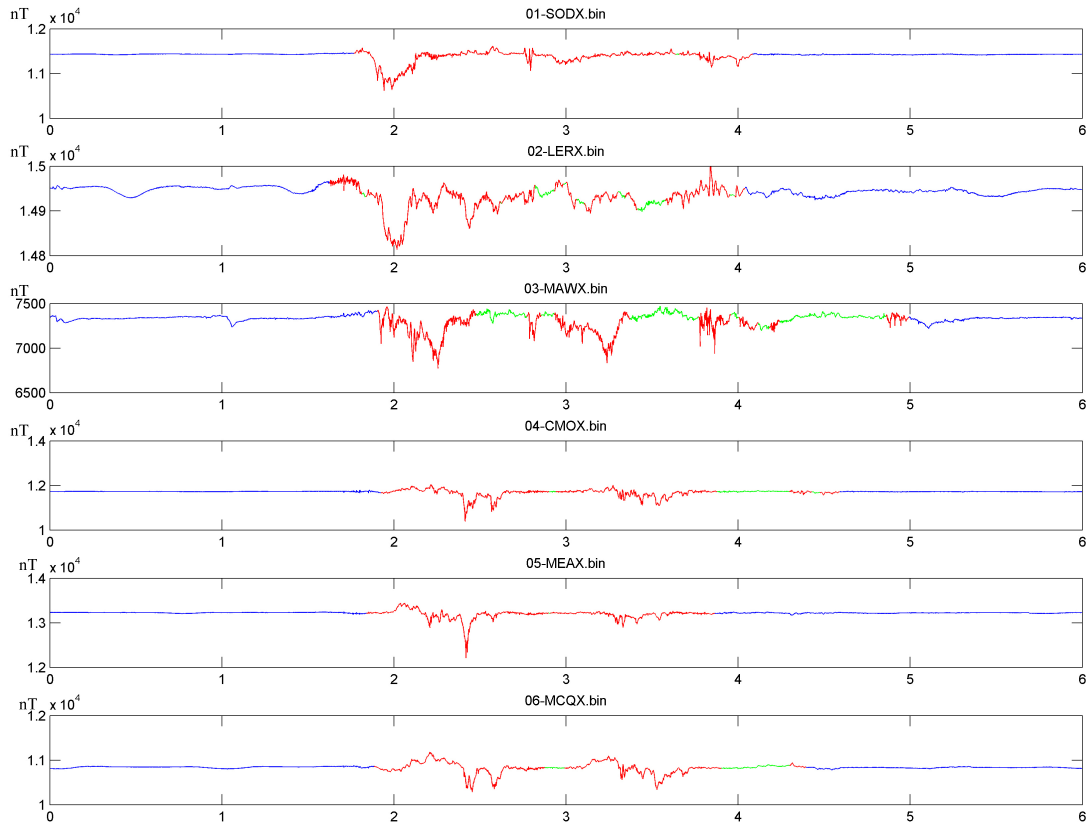


Рис. 1. Графики характера вариаций BH составляющей магнитного поля для обсерваторий SOD, LER, MAW, CMO, MEA, MCQ (8–13 ноября 2006 года).

модулю от s_i на $T - A_i$:

$$d_i = \frac{\sum |y_i(t) - s_i| : t \in T - A_i}{|T| - |A_i|}$$

Определим $\text{MaxDisp}A_i$ как отношение к d_i того или иного варианта отклонения y_i от s_i в процессе аномалии A_i :

$$\text{MaxDisp}(A_i) = \frac{\max(|y_i(t) - s_i| : t \in \text{Supp}A_i)}{d_i} \quad (2)$$

$$\text{MaxDisp}(A_i) = \frac{\sum |y_i(t) - s_i| : t \in \text{Supp}A_i}{d_i |A_i|} \quad (3)$$

Для проверки применимости описанного подхода к задаче обнаружения и анализа геомагнитных событий анализируются данные сети станций Intermagnet во время магнитной бури, которая была вызвана событиями на

Солнце в ноябре 2006 г. Эти события были связаны с появлением активной области на Солнце и выбросом коронального вещества в межпланетное пространство. В результате высокоскоростной поток солнечного ветра, наблюдаемый в межпланетном пространстве с 9 по 15 ноября, вызвал магнитную бурю, максимум которой наблюдался 10 ноября 2006 г. [Shestopalov and Kharin, 2006].

Были получены данные различных обсерваторий для анализа характера вариаций возмущения геомагнитного поля в различных точках земной поверхности во время данной магнитной бури. Для этого использовались данные 83 обсерваторий.

На Рис. 2 представлены станции сети Intermagnet в геомагнитных координатах с указанием распределения параметра станционной аномальности – конструкция $\text{Max}(1)$ по всей земной поверхности. Величина параметра представлена в виде кружков разного диаметра, рядом указано их числовое значение. При анализе этих данных был сделан вывод о том, что в данном событии отмечалось резкое увеличение амплитуд магнитных вариаций в отдельной области Земли.

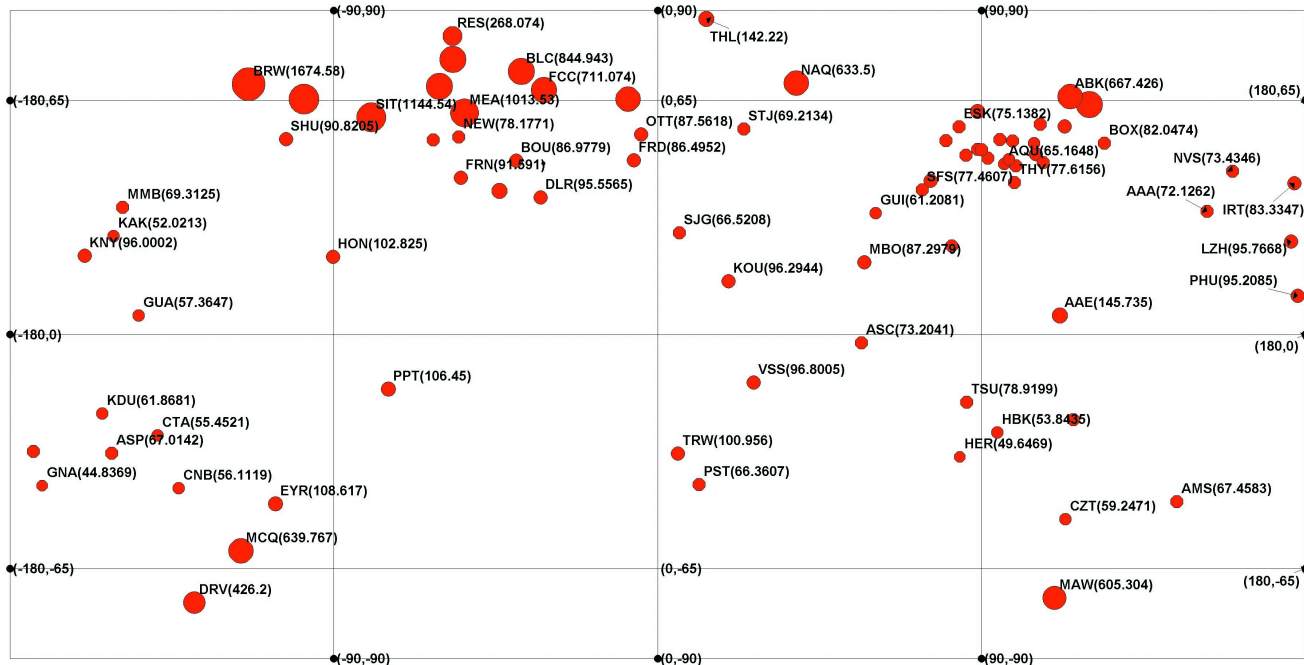


Рис. 2. Распределение параметра станционной аномальности (конструкция Max).

Из Рис. 2 видно, что в северном полушарии на западе амплитуда магнитных вариаций на геомагнитных широтах $55^\circ - 68^\circ$ значительно превышала соответствующие вариации на востоке. То есть в данном событии в северном полушарии наблюдалась западно-восточная асимметрия амплитуд магнитных вариаций во время магнитной бури. Здесь также имеется тенденция увеличения амплитуды геомагнитных вариаций с увеличением широты в северном и южном полушариях. Следовательно, в данном событии наблюдается нарушение стандартного распределения поля мировых магнитных бурь.

Этот метод амплитуд Max(1) для определения характера вариаций возмущения геомагнитного поля имеет ряд недостатков.

На Рис. 1 представлены графики характера вариаций VH составляющей магнитного поля для нескольких обсерваторий. Также на рисунке показаны результаты работы алгоритмов выявления аномалий на записях [Агалян и др., 2005; Гвишиани и др., 2003; Zlotnicki et al., 2005].

Из Рис. 1 видно, что вариации магнитного поля в данном случае отличаются не только амплитудой магнитных вариаций, но и характером вариаций и временными характеристиками. Видно также, что форма кривых и продолжительность магнитного возмущения для разных обсерваторий неодинакова. Наблюдаются также значительные изменения величины магнитного поля перед началом магнитной бури. Все это необходимо учитывать для оцен-

ки характера вариаций возмущения геомагнитного поля. Поэтому наряду с конструкцией Max(1) использовалась конструкция MaxDisp(2).

На Рис. 3 представлено распределение параметра станционной аномальности (конструкция MaxDisp), отражающего характер магнитных вариаций по всей земной поверхности.

В общих чертах здесь сохраняется картина распределения параметров магнитного поля, представленная на Рис. 2, в северном полушарии на западе амплитуда магнитных вариаций на геомагнитных широтах $55^\circ - 68^\circ$ значительно превышает соответствующие вариации на востоке. Однако есть и различия. Отмечалось, что в данном событии имеется тенденция увеличения параметров геомагнитных вариаций с увеличением широты в северном и южном полушариях.

Например, параметры аномальности, вычисленные по методу Max, обсерваторий SJG, MBO, AAE, KOU, имеют большие значения по сравнению с параметрами обсерваторий HON, GUI, TAM, которые расположены на более высоких геомагнитных широтах. Параметры аномальности этих же обсерваторий, вычисленные по методу MaxDisp, имеют другое распределение. Их значения меньше по сравнению со значениями параметров обсерваторий, расположенных на более высоких широтах. Это связано с тем, что в методе MaxDisp учитывается характер вариаций фона.

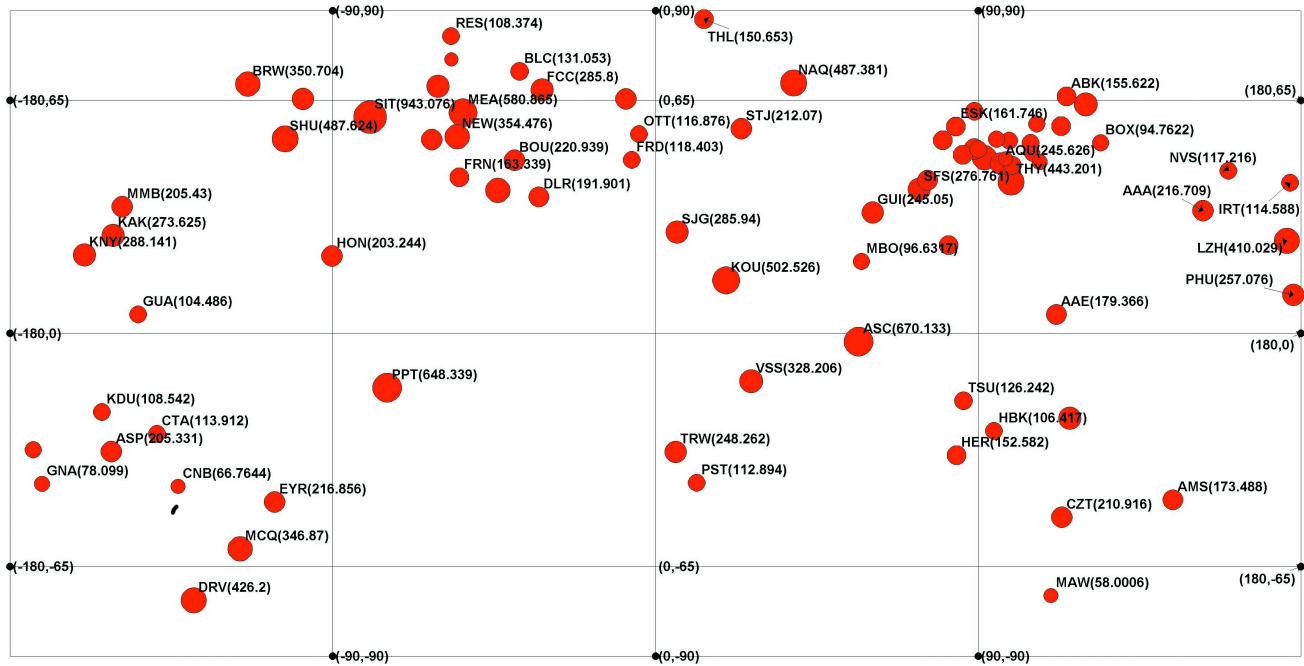


Рис. 3. Распределение параметра станционной аномальности (конструкция MaxDisp).

Сила межстанционной (внешней) аномальности

Аномалию A_i естественно считать проявлением геомагнитного события A на станции st_i , а силу аномалии $f(A_i)$ – количественным показателем такого проявления.

Основанная на нечетком сравнении конструкция $nf(A_i)$ дает возможность количественно ответить на вопрос о внешней (межстанционной) аномальности A_i , то есть в шкале отрезка $[-1, 1]$ охарактеризовать силу аномалии $f(A_i)$ на фоне остальных $f(A_j)$, при $j \neq i$:

$$nf(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^{82} n(f(A_j), f(A_i))}{82} \in [-1, 1] \quad (4)$$

где

$$n(f(A_j), f(A_i)) = \frac{f(A_i) - f(A_j)}{\max(f(A_i), f(A_j))} \in [-1, 1]$$

Число $n(f(A_j), f(A_i))$ представляет собой меру превосхождения $f(A_i)$ над $f(A_j)$ (нечеткое сравнение $f(A_i)$ с $f(A_j)$), а конструкция $st_i \rightarrow nf(A_i)$ характеризует динамику распространения геомагнитного события в сети St .

На Рис. 4 и Рис. 5 представлены распределения параметра межстанционной аномальности для конструкций

Max и MaxDisp соответственно. При этом числовые значения параметра внешней аномальности $nf(A_i)$ распределены в отрезке $[-1, 1]$ и характеризуются следующим образом:

- сильная аномальность, если $nf(A_i) \in [0.5, 1]$ (на Рис. 4 и Рис. 5 представлено красным цветом);
- слабая аномальность, если $nf(A_i) \in [0, 0.5)$, представлено желтым цветом;
- слабая неаномальность, если $nf(A_i) \in [-0.5, 0)$, представлено зеленым цветом;
- сильная неаномальность, если $nf(A_i) \in [-1, -0.5)$, представлено синим цветом.

Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные на основе анализа распределений станционной аномальности (см. Рис. 2 и Рис. 3). Из Рис. 4 и Рис. 5 видно, что сильно аномальные свойства больше выражены в северо-западном полушарии. Наличие слабо аномальных и неаномальных областей вблизи экватора свидетельствует о нарушении стандартного распределения поля мировых магнитных бурь.

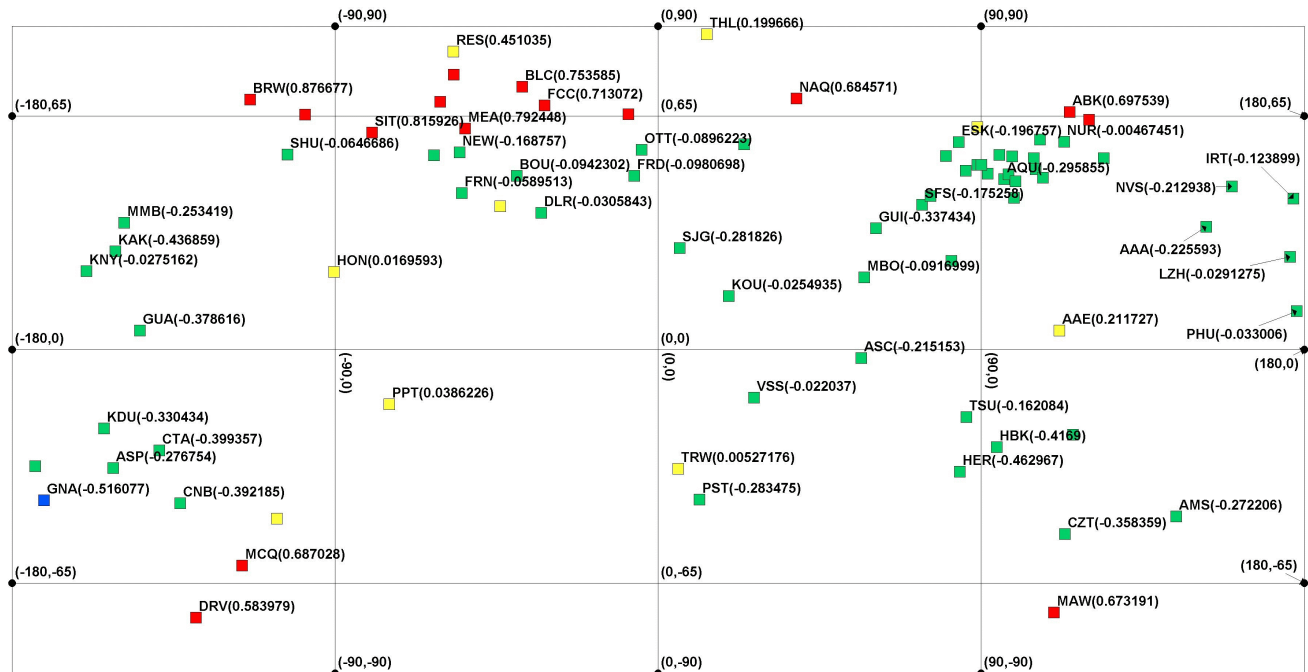


Рис. 4. Распределение параметра межстанционной аномальности $nf(A_i)$ для конструкции Max.

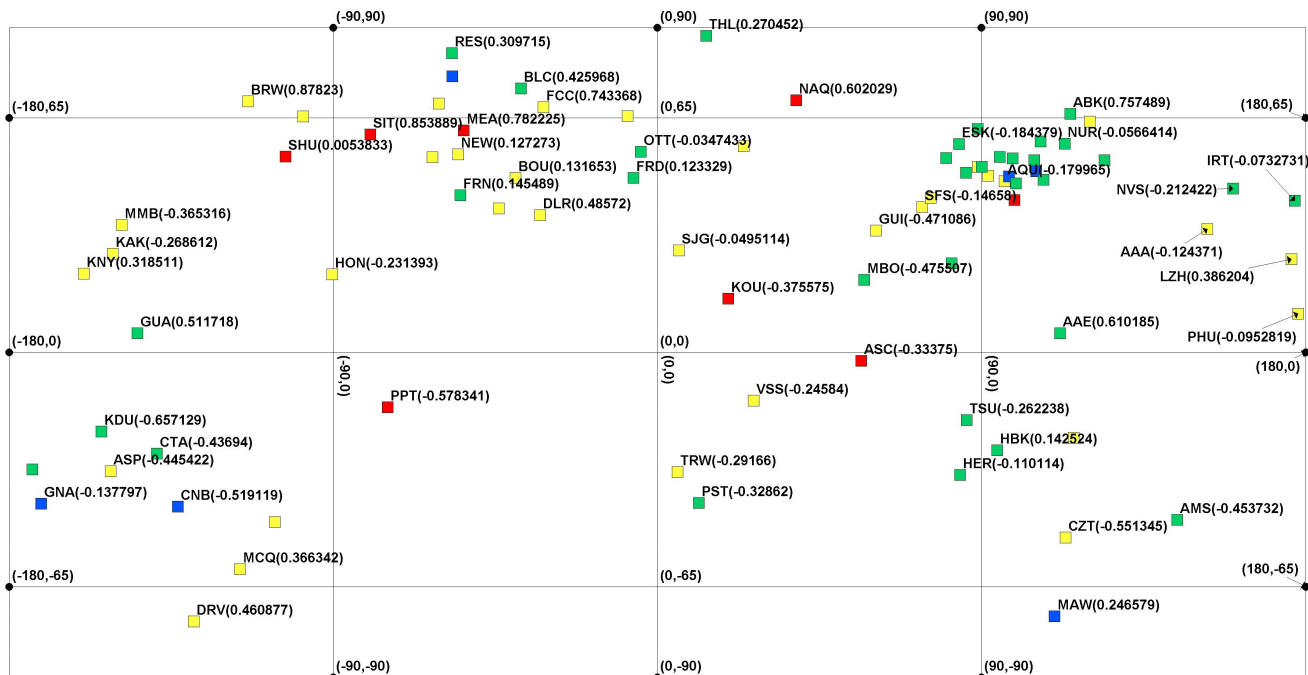


Рис. 5. Распределение параметра межстанционной аномальности $nf(A_i)$ для конструкции MaxDisp.

Заключение

В статье предложен новый способ изучения динамики распространения геомагнитных возмущений с использованием данных сети станций Intermagnet, основанный на алгоритмах выделения и анализа аномалий на временных рядах методами нечеткой логики.

Литература

Агаян, С. М., Ш. Р. Богоутдинов, А. Д. Гвишиани, Е. М. Граева, М. Диаман, Ж. Злотники, М. В. Родкин (2005), Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики, *Геофизические исследования. Сборник научных трудов. Выпуск 1*, 143–155, ИФЗ РАН, Москва.

Гвишиани, А. Д., С. М. Агаян, Ш. Р. Богоутдинов, А. В. Леденев, Ж. Злотники, Ж. Боннин (2003), Математические методы геоинформатики. II. Алгоритмы нечеткой

логики в задачах выделения аномалий на временных рядах, *Кибернетика и системный анализ*, No. 4, 103–111.

Фельдштейн, Я. И., ред., В. Н. Обридко, ред., (1980), *Солнечная и солнечно-земная физика. Иллюстрированный словарь терминов*, Мир, Москва.

Shestopalov, I. P., E. P. Kharin (2007), Situation of preflare during two solar rotations before a flare on December 13, 2006, *International Symposium "International Heliophysical Year 2007: New insights into solar-terrestrial physics", November 5–11, 2007, Zvenigorod, abstracts*, 110, GC RAS, Moscow. doi:10.2205/2007-IGY50conf

Zlotnicki, J., J.-L. LeMouel, A. Gvishiani, S. Agayan, V. Mikhailov, Sh. Bogoutdinov (2005), Automatic fuzzy-logic recognition of anomalous activity on long geophysical records. Application to electric signals associated with the volcanic activity of la Fournaise volcano (R'eunion Island), *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 234, 261–278. doi:10.1016/j.epsl.2005.01.040

С. М. Агаян, Ш. Р. Богоутдинов, А. Д. Гвишиани, Р. Г. Кульчинский, Е. П. Харин, и И. П. Шестопалов, Геофизический центр РАН, ул. Молодежная 3, 119296 Москва, Россия. (kulchinskiy@gmail.com, kharin@wdcb.ru)