



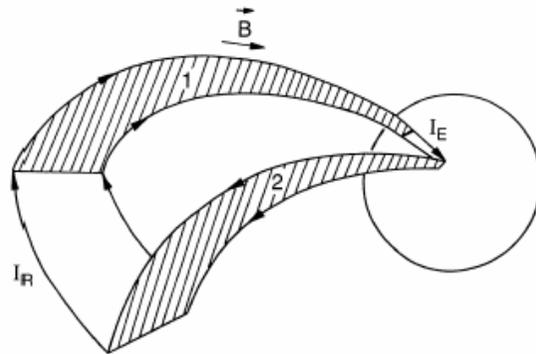
Классификационный анализ связи активности авроральных электроджетов и токовых систем симметричной и асимметричной частей кольцевого тока на главной фазе магнитной бури

Бархатов Н.А.^{1,2}, Бархатова О.М.^{1,2}, Шадруков Д.В.²

*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ)-1
Нижегородский государственный педагогический университет (НГПУ)-2*

Введение

Современные количественные модели магнитосферных и магнитосферно-ионосферных токовых систем: кольцевой ток и авроральные электроджеты составляют единую токовую систему [Liemohn et. al., 2001; Ganushkina et. al., 2004].



- Западный (AL) и восточный (AU) электроджеты могут рассматриваться как часть токовой системы, связанной со стационарной конвекцией (DP2), а могут быть результатом процесса взрывной фазы суббури (DP1) [Iijima and Potemra, J. Geophys. Res., 1976, 81, P.2165], [J. Geomagn. Geoelectr., 1986, 38, 633].
- Связь магнитного возмущения в авроральной зоне (AE, AU, AL), и возмущения в средних и низких широтах (Dst) в период магнитосферной бури до сих пор не полностью выяснен [Нишида, 1980; Grafe et.al., 1997; Grafe and Feldstein, 2000, и ссылки в них].

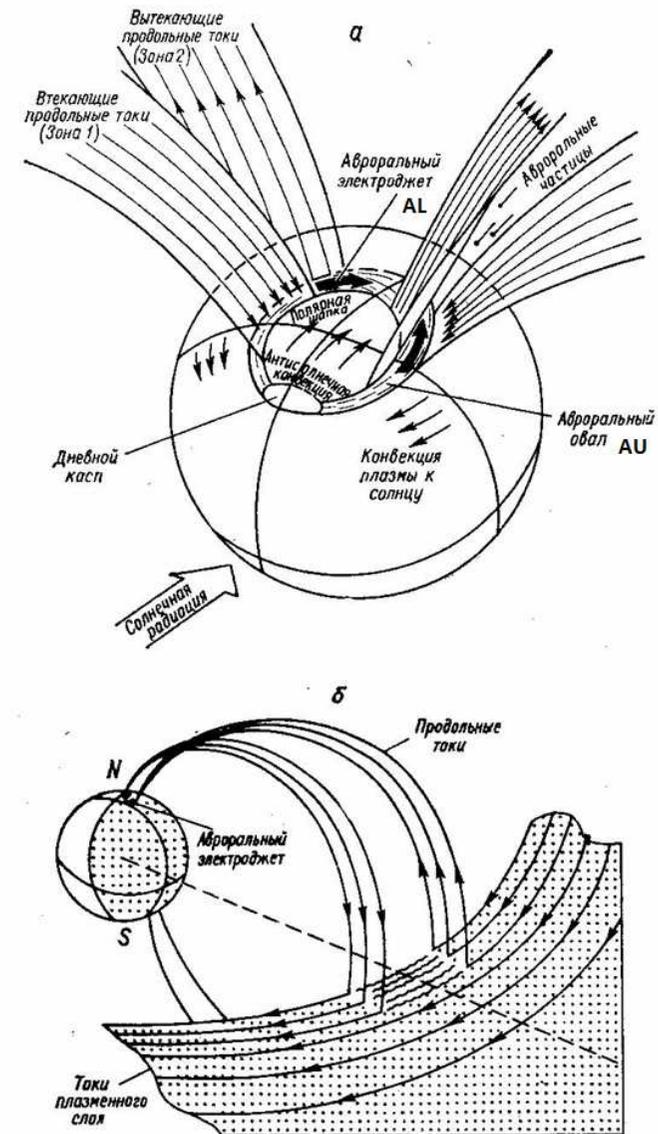
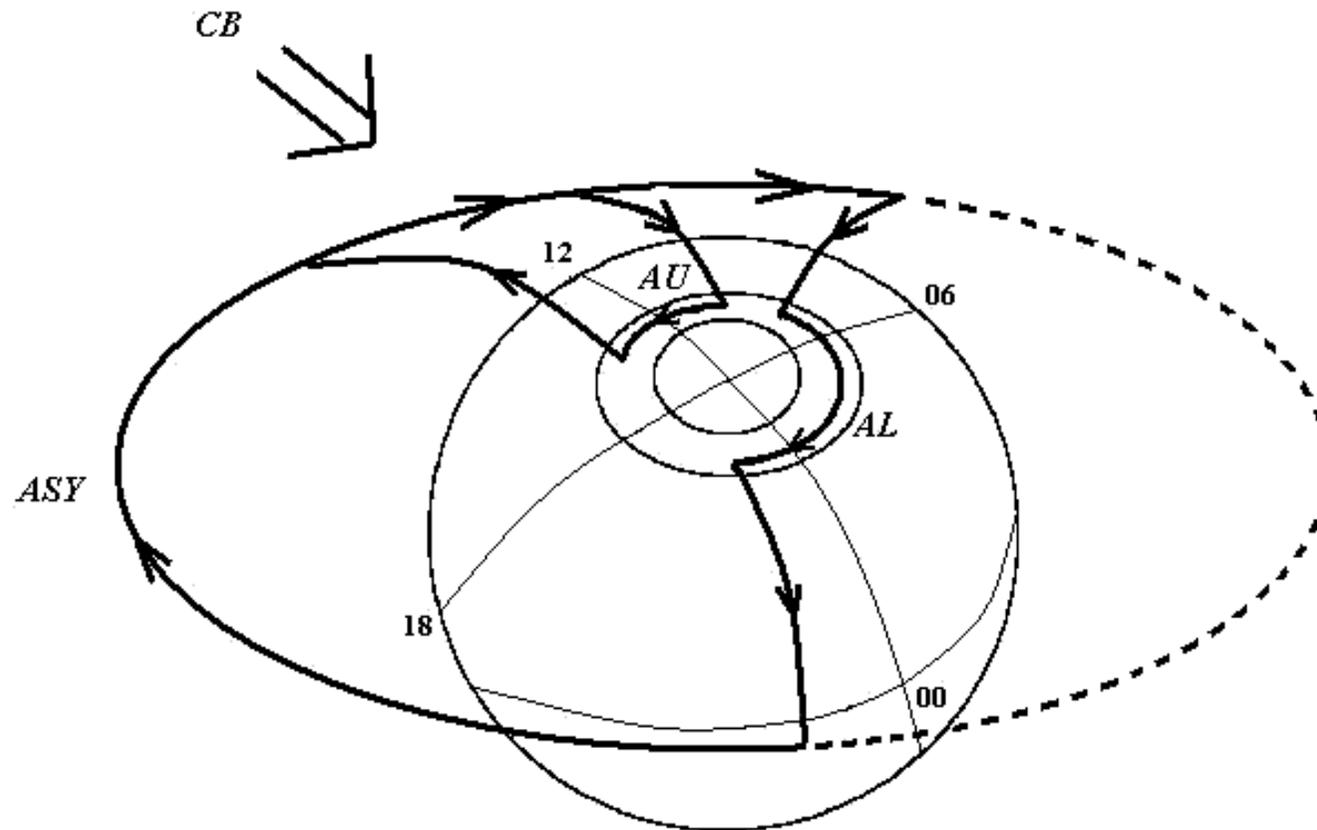


Рис. 1. Системы продольных токов в полярной области.
а — токи в период умеренных магнитных возмущений; б — токи, ответственные за взрывную фазу суббури.

Результат предыдущих исследований. Трехмерная ионосферно-магнитосферная токовая система на главной фазе бури



Показана возможность объединения электроджетов с асимметричной частью кольцевого тока в единую токовую систему.

Основная цель работы

Исследование пространственно-временной нелинейной динамики магнитосферной токовой системы в периоды магнитных бурь с помощью нейросетевой технологии.

Задачи предлагаемого исследования

1. Поиск нелинейной связи индексов SYM и ASY с индексами интенсивности авроральных электроджетов в периоды бурь различной интенсивности.
2. Анализ динамики поведения индексов среднеширотной и авроральной геомагнитной активности для установления особенностей их нелинейной связи классификацией рассматриваемых событий.

Инструмент исследования

Нейросетевой аппаратно-программный вычислительный комплекс для изучения нелинейных связей в солнечно-земной физике.

Search of connection geomagnetic activity indexes
Set parameters for neural network and fuzzy structure

Input parameters: 1

Data name	Use as input	Use d/dt	Advancing (min)
[1*] IMF/PSW data from ACE spacecraft (UT+ dT)			
n	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
v	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
T	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
nV	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
nV2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
Bx[gse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
By[gse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
Bz[gse]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
Bx[gsm]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
By[gsm]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
Bz[gsm]	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
Geomagnetic activity indexes (UT)			
AU	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
SYM	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
AL	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
ASY	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0
DST	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0

Output parameter: 2

Options: 3

[2*] Phase: Main
[3*] Spline coef: 1
[4*] Data composition method: Cumul
[5*] Neurons/classes: 4
[5*] Layers: 2
Epochs: 20

Events for learn (UT, yyyymmdd): 4

<input checked="" type="checkbox"/> 1 [20000111-20000114]	<input type="checkbox"/> 11 [20010411-20010413]	<input type="checkbox"/> 21 [20020903-20020906]
<input type="checkbox"/> 2 [20000122-20000124]	<input checked="" type="checkbox"/> 12 [20010417-20010418]	<input type="checkbox"/> 22 [20020907-20020909]
<input type="checkbox"/> 3 [20000408-20000408]	<input checked="" type="checkbox"/> 13 [20010618-20010618]	<input type="checkbox"/> 23 [20030129-20030131]
<input type="checkbox"/> 4 [20000424-20000425]	<input type="checkbox"/> 14 [20010817-20010818]	<input type="checkbox"/> 24 [20030529-20030531]
<input type="checkbox"/> 5 [20000518-20000518]	<input checked="" type="checkbox"/> 15 [20011124-20011124]	<input type="checkbox"/> 25 [20030801-20030803]
<input type="checkbox"/> 6 [20000523-20000526]	<input type="checkbox"/> 16 [20020228-20020302]	<input type="checkbox"/> 26 [20030818-20030820]
<input type="checkbox"/> 7 [20000608-20000609]	<input type="checkbox"/> 17 [20020318-20020320]	<input type="checkbox"/> 27 [20030805-20030807]
<input type="checkbox"/> 8 [20000715-20000715]	<input type="checkbox"/> 18 [20020511-20020513]	<input checked="" type="checkbox"/> 28 [20031001-20031002]
<input type="checkbox"/> 9 [20001011-20001011]	<input type="checkbox"/> 19 [20020518-20020520]	<input type="checkbox"/> 29 [20031104-20031105]
<input type="checkbox"/> 10 [20001028-20001031]	<input type="checkbox"/> 20 [20020523-20020526]	<input type="checkbox"/> 30 [20031119-20031125]

Event for test: 5

<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 11	<input type="radio"/> 21
<input type="radio"/> 2	<input checked="" type="radio"/> 12	<input type="radio"/> 22
<input type="radio"/> 3	<input checked="" type="radio"/> 13	<input type="radio"/> 23
<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 14	<input type="radio"/> 24
<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 15	<input type="radio"/> 25
<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 16	<input type="radio"/> 26
<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 17	<input type="radio"/> 27
<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 18	<input type="radio"/> 28
<input type="radio"/> 9	<input type="radio"/> 19	<input type="radio"/> 29
<input type="radio"/> 10	<input type="radio"/> 20	<input type="radio"/> 30

Batch
Reset
Exit

FF nnet [all] Elman nnet [all] Fuzzy [all] Kohonen [all]
Last New Last New Last New Last New

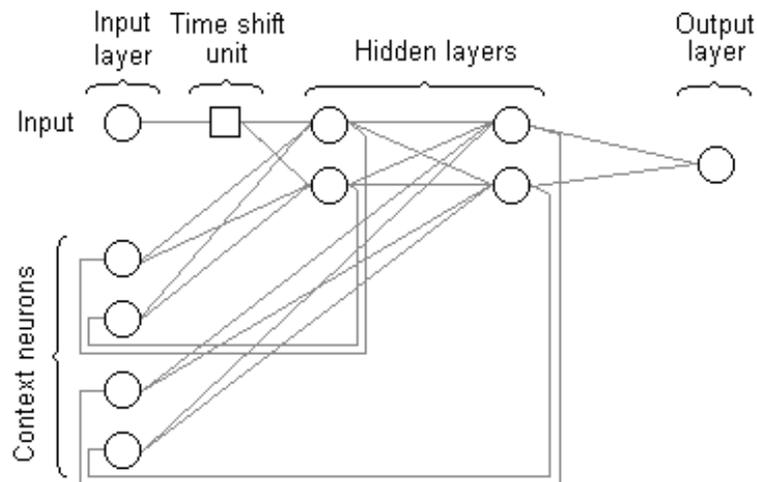
FF nnet [ind] Elman nnet [ind] Fuzzy [ind] Kohonen [ind]
Last New Last New Last New Last New

[1*] Delay time is included, "d/dt" not use with Kohonen network
[2*] Set storm phase: Main, Restoration or M-R
[3*] Apply spline: set resolution data in minutes
[4*] Set data composition method for Kohonen network: Cumul or Prod
[5*] Set neurons/layers for networks, exception: Fuzzy structure

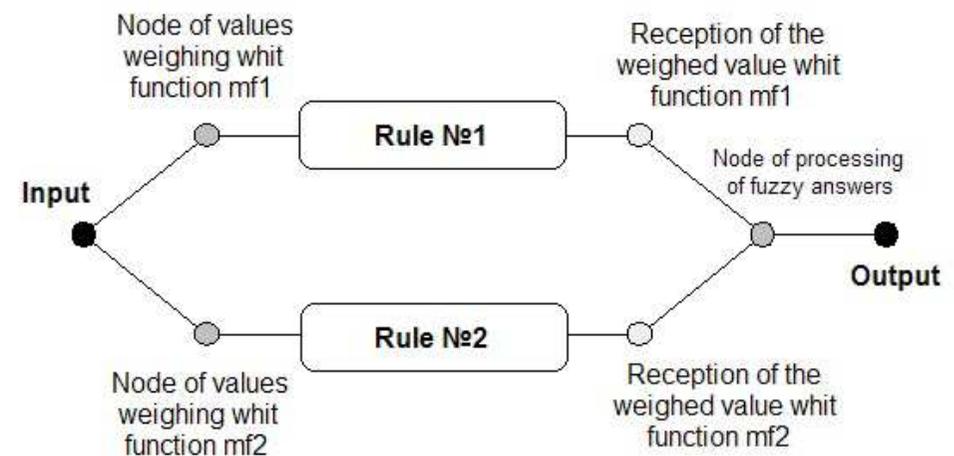
(c), STC Res. Lab, 2008 [ver 7.3]

Используемый математический аппарат ИНС

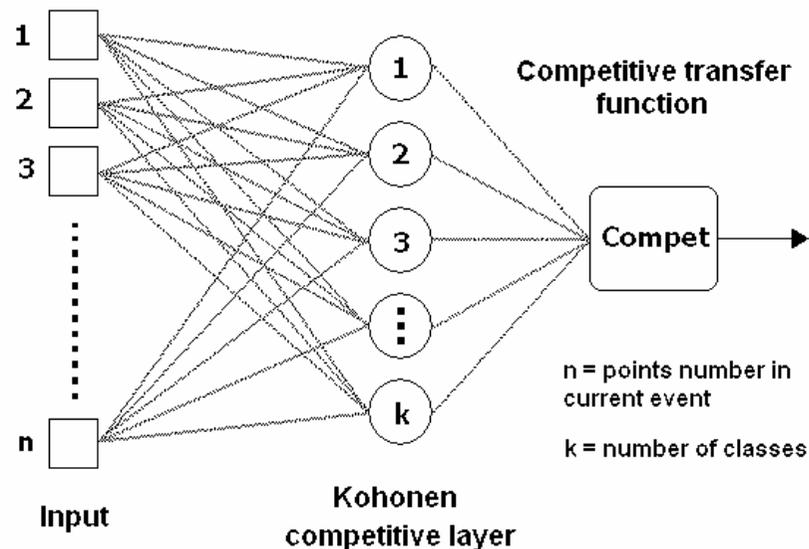
1. Сеть Элмана с добавленным блоком динамической задержки входного сигнала



2. Fuzzy-структуры для восстановления одного числового ряда по другому

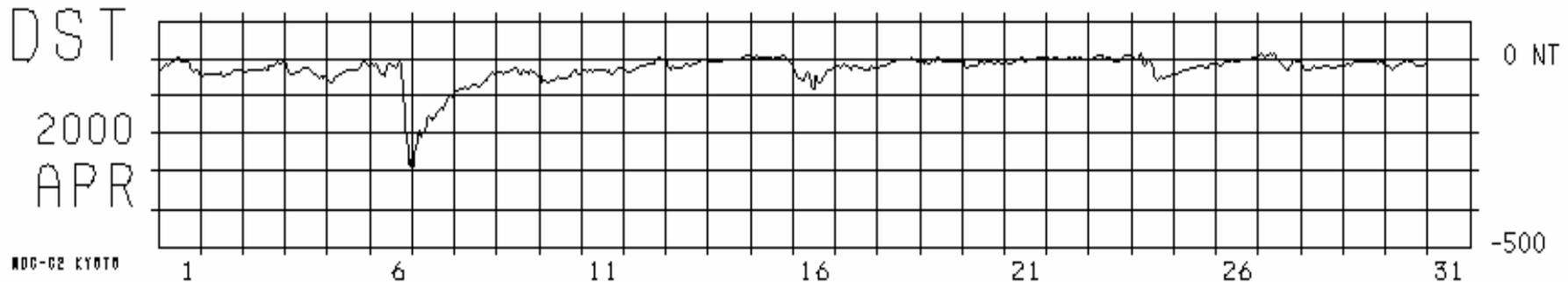


3. Нейросеть типа слоя Кохонена



Используемые данные и методика исследования

Исследование нелинейных связей внутри пар индексов SYM-AU, SYM-AL, ASY-AU и ASY-AL для 30 геомагнитных бурь различной интенсивности ($-300 \leq Dst \leq -50$ nT) за период с 2000 по 2003 г.

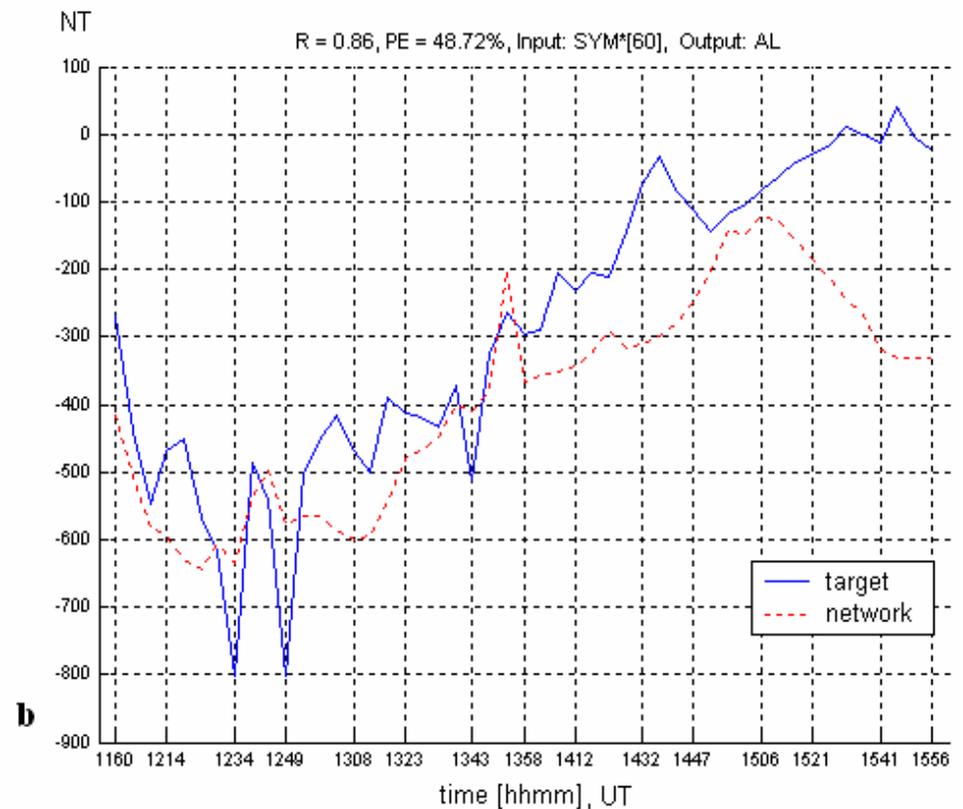
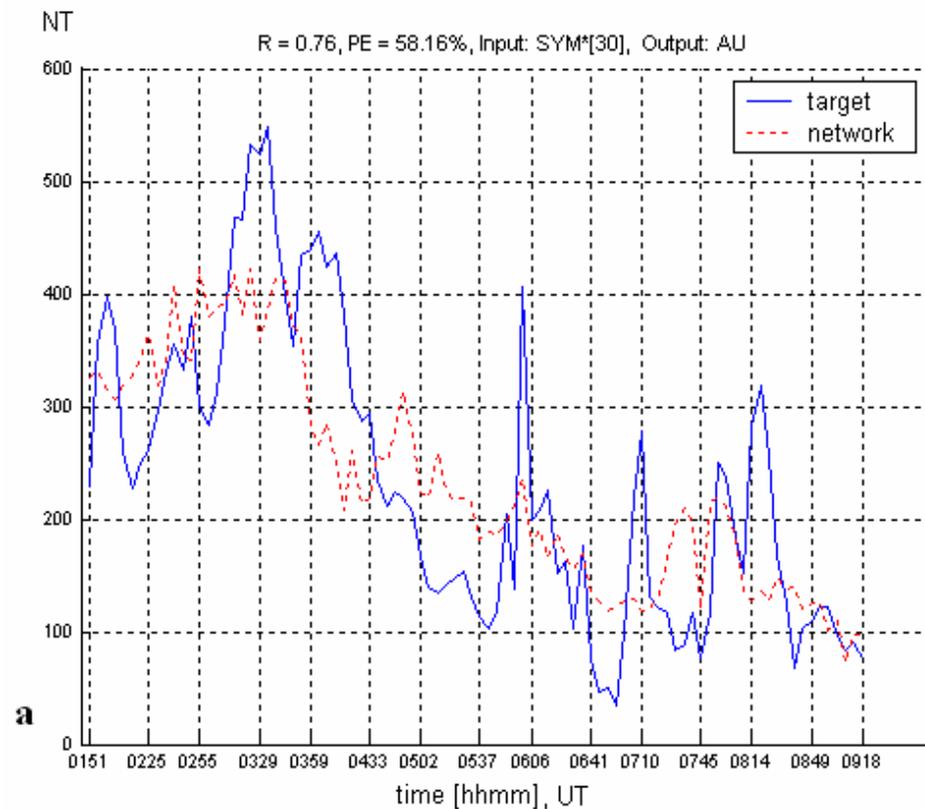


Последовательность анализа связи между парами индексов:

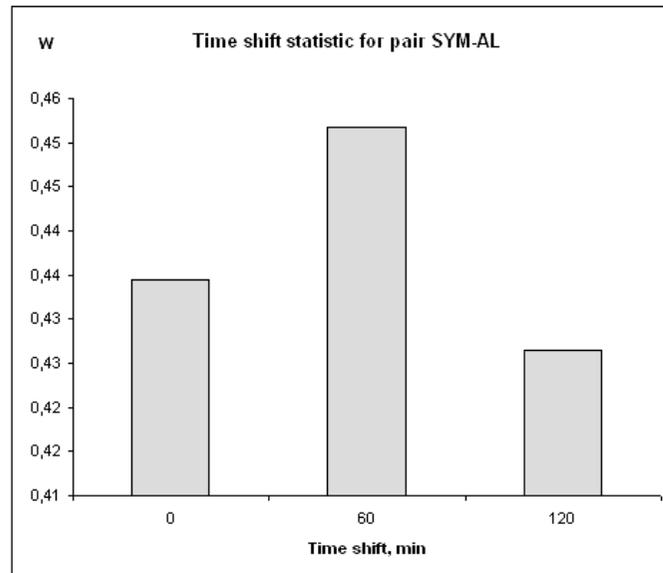
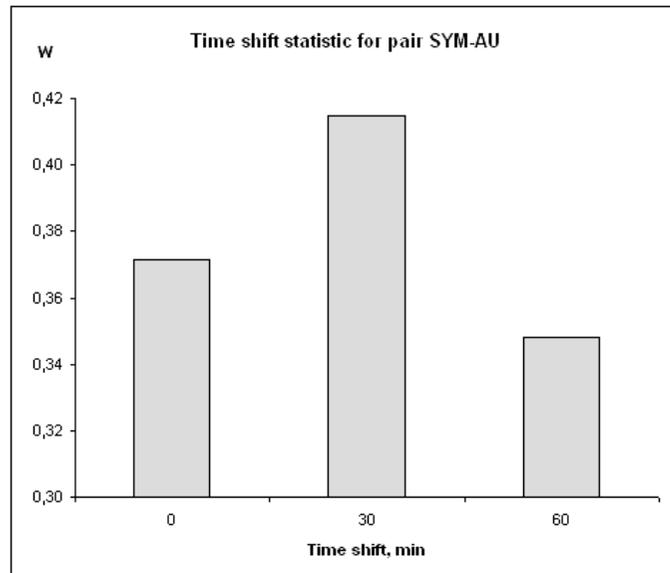
1. Пятиминутное усреднение для устранения резких скачков амплитуд AU и AL индексов в минутных значениях.
2. Обнаружение нелинейной связи между парами индексов с помощью нейросетей в виде возможности восстановления одного индекса по другому. Используется две ИНС: Элмана с алгоритмом обратной связи и сети с алгоритмом нечеткой логики Fuzzy.
3. Оценка качества восстановления индексов AU, AL по индексам SYM, ASY вычислением линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностью ($R > 0.4$ – удовлетворительное восстановление).
4. Результаты работы нечеткой сети Fuzzy, добавлялись в общую статистику, сформированную на основе результатов полученных при работе сети Элмана (5400 экспериментов для одной пары индексов).

1. Результаты нейросетевых экспериментов

1.1. Примеры восстановления индексов интенсивности авроральных электроджетов (AU, AL) по данным индекса интенсивности симметричной части кольцевого тока (SYM)



1.2. Временной сдвиг в развитии исследуемых токовых систем устанавливался при введении задержки задаваемой величины (*SYM*) по сравнению с восстанавливаемой (*AU, AL*)



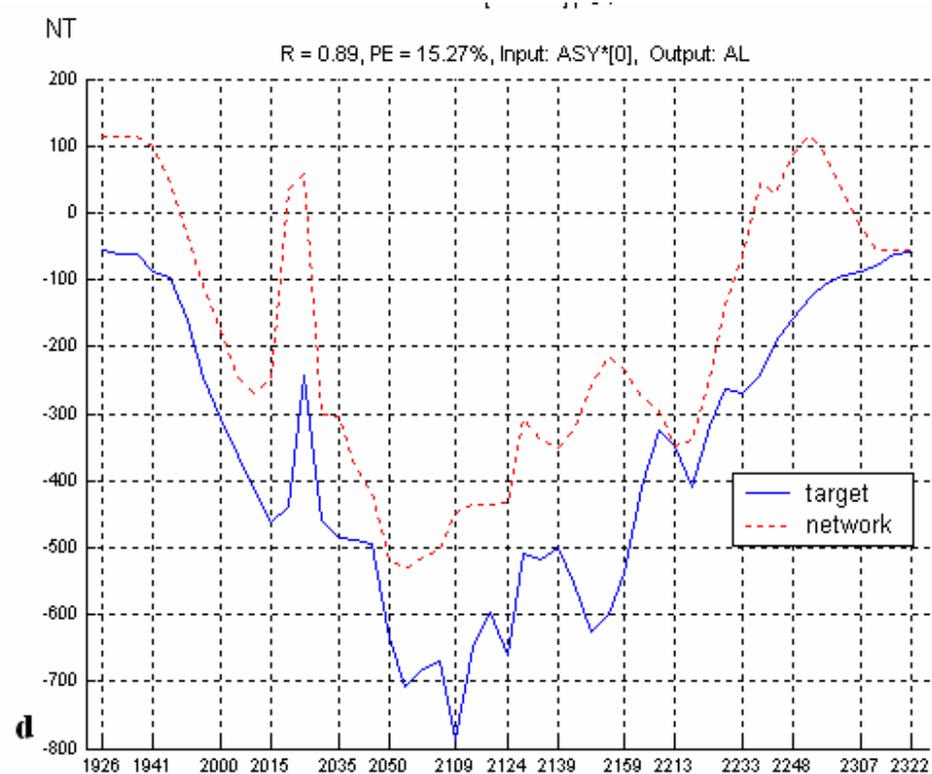
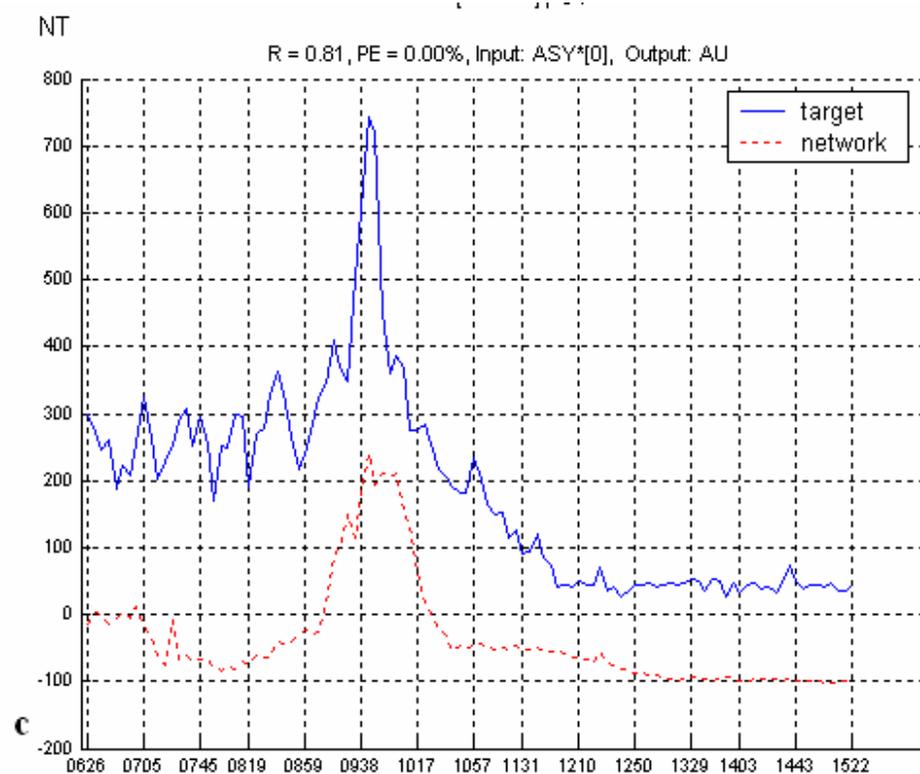
$$W = \frac{N}{C_n^m}$$

- Отношение удачных восстановлений к общему числу сочетаний индексов для разных случаев ($m=30, n=2$)

Результаты свидетельствуют **о существовании задержки** в развитии симметричной части магнитного поля кольцевого тока относительно восточного и западного электроджетов. Для SYM-AU величина задержки составляет 30 минут, для SYM-AL – 60 минут.

Временной сдвиг между индексами SYM-AU меньше чем между SYM-AL, поэтому восточный электроджет на главной фазе геомагнитной бури развивается раньше, чем западный. Т.о. среднее время запаздывания западного электроджета относительно восточного около 30 минут.

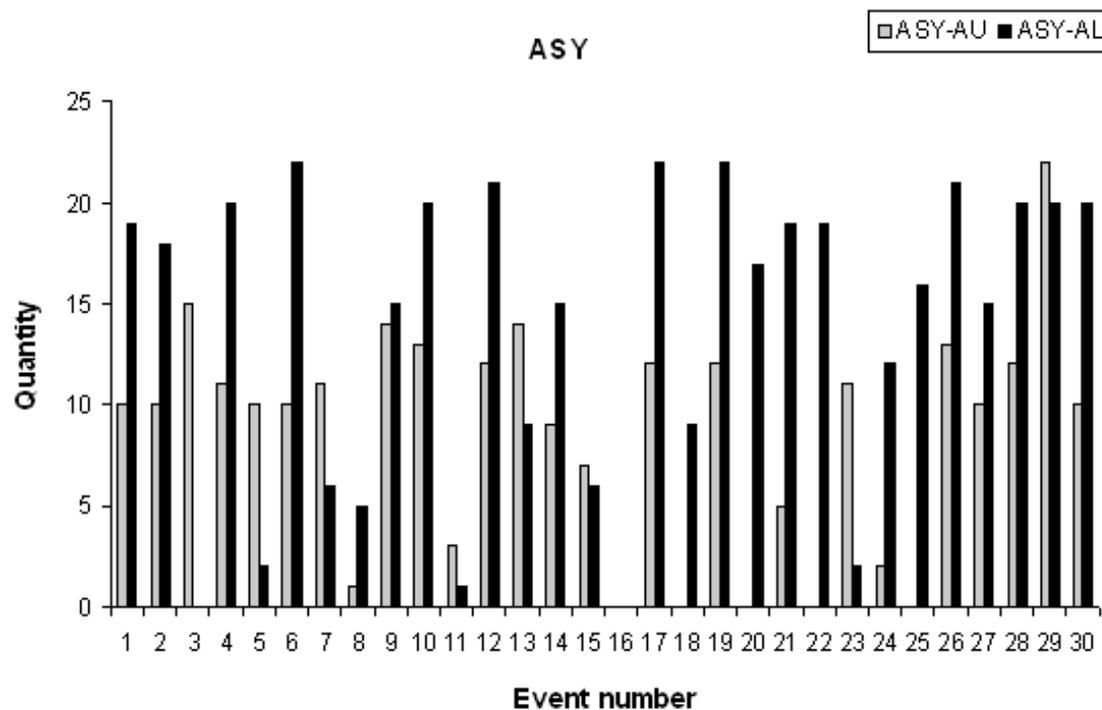
1.3. Примеры восстановления индексов интенсивности авроральных электроджетов (AU , AL) по данным индекса интенсивности асимметричной части кольцевого тока (ASY) (без задержек)



Таким образом, электроджеты (AU , AL) развиваются одновременно с асимметричной частью кольцевого тока (ASY)

Особенности нелинейной связи ASY-AU и ASY-AL

По оси Y представлены результаты подсчета числа удовлетворительных восстановлений индексов полярных электроджетов для пар индексов ASY-AU (серые столбики) и ASY-AL (черные столбики). По оси X последовательно отмечены 30 событий.

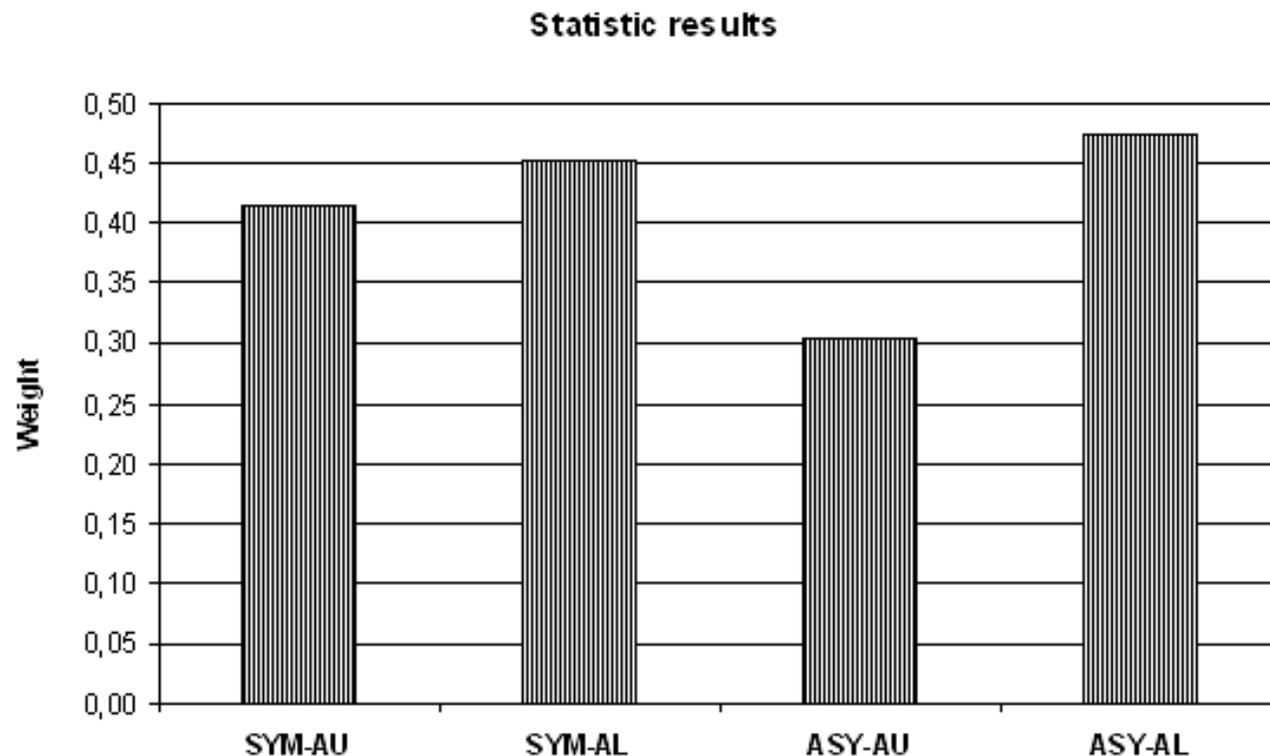


Max число восстановлений = 29

Сравнение столбиков в пределах каждого события демонстрирует «смещение» в развитии каждого из электроджетов: если одна из токовых систем сильно развита, другая - слабо.

«Смещение» имеет место в сторону пары **ASY-AL** (столбик выше). Такое лучшее восстановление м.б. связано с тем, что **западный электроджет на главной фазе геомагнитной бури более интенсивен, чем восточный.**

Суммарный статистический результат всех нейросетевых экспериментов



$$W = \frac{N}{C_n^m}$$

Вычисление весов для пар индексов **SYM-AU** и **SYM-AL** производилось с учетом установленных временных задержек.

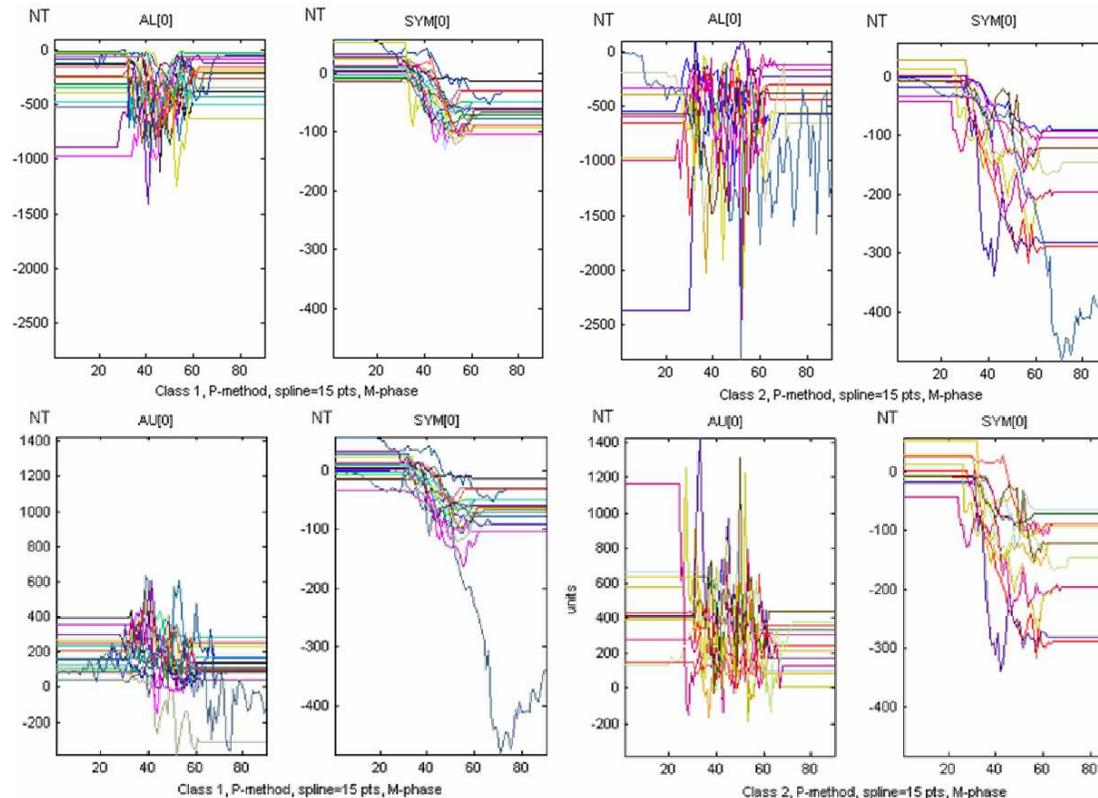
Наблюдается различный уровень связи (смещение) между ассиметричной частью кольцевого тока и авроральными электроджетами.

2. Классификация геомагнитных бурь по геомагнитным индексам

Классификация на основе ИНС типа слоя Кохонена по двум параметрам, которые соответствуют исследуемым парам индексов: SYM и AU; SYM и AL; ASY и AU; ASY и AL. Она разделяет исследуемые события по длительности и степени интенсивности:

- Первый класс - *короткие события малой интенсивности.*
- Второй класс – *длительные и интенсивные события.*

Анализ связи активности авроральных электроджетов и симметричной части кольцевого тока

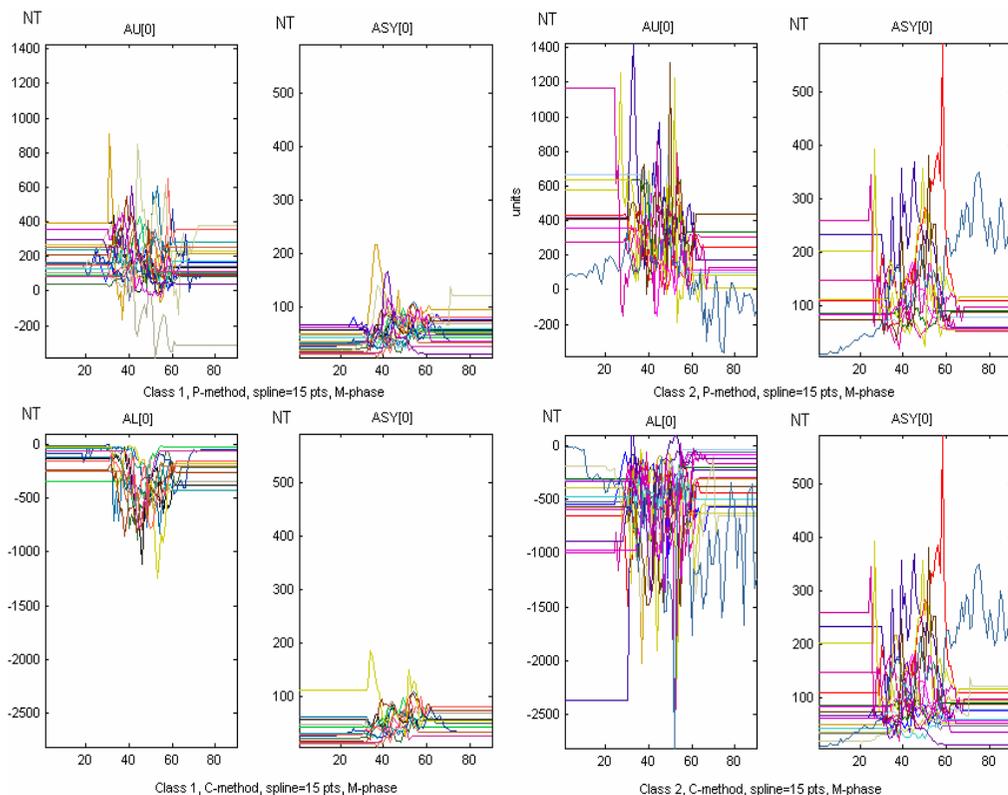


При классификации событий по параметрам **SYM** и **AL** в первый класс попадает 90% наиболее часто восстанавливаемых событий. События, редко встречающиеся в восстановлении, классифицируются плохо – они делятся поровну между классами.

При классификации событий по параметрам **SYM** и **AU** в первый класс попадает 80% наиболее часто восстанавливаемых событий. События, редко встречающиеся в восстановлении, классифицируются плохо – они делятся между двумя классами почти поровну.

Вывод: Хорошо восстанавливаемые события имеют небольшие амплитуды и длительности и по нашему мнению соответствуют «классическому» развитию геомагнитной бури и суббури. Поскольку они имеют похожий вид (**первый класс**) динамики симметричного кольцевого тока и авроральных электроджетов, то можно предположить, что физические ионосферные и магнитосферные процессы для хорошо восстанавливаемых событий имеют одну природу и один сценарий развития.

Анализ связи активности авроральных электроджетов и асимметричной части кольцевого тока



Классификация по параметрам ASY и AU: **80% восстанавливаемых событий оказались во втором классе**, а события, имеющие плохое восстановление, практически не классифицируются.

Классификация по параметрам ASY и AL: восстанавливаемые события не классифицируются. **90% редко восстанавливаемых событий попали во второй класс.**

Выводы: большинство из событий, входящих в одну группу (часто (ASY и AU) или редко (ASY и AL) восстанавливаемых событий), попадают **во второй класс** (интенсивных и продолжительных событий). Для параметров ASY и AU в такой класс попали «классические» события, которые часто встречаются в восстановлении. Для параметров ASY и AL в этот класс попали «неклассические» события, которые реже всех встречались в восстановлении. Это подтверждает гипотезу о том, что энергия асимметричного кольцевого тока перераспределяется между обоими авроральными электроджетами.

Выводы

1. Существует нелинейная связь между симметричной и асимметричной частями магнитного возмущения, создаваемого кольцевым током, и авроральными электроджетами.
2. В период главной фазы геомагнитной бури существует временной сдвиг между парами индексов SYM-AU и SYM-AL. Для первой пары он составляет 30 минут, а для второй – 60 минут. Это означает, что часть кольцевого тока, создающая симметричное магнитное поле в средних и низких широтах, запаздывает в развитии относительно развития авроральных электроджетов.
3. Обнаружено «смещение» в развитии авроральных электроджетов относительно друг друга: если западный электроджет оказывается высоко активным, то восточный электроджет слабо активен, и наоборот. **Следовательно, токовая система кольцевого тока, которая создает асимметричное магнитное поле, и токовые системы восточного и западного электроджетов имеют общий энергетический бюджет.**
4. Классификационные нейросетевые эксперименты продемонстрировали, что, в случае непродолжительных геомагнитных бурь малой или средней амплитуды, есть возможность вести восстановление индексов AU и AL по индексу SYM. При проведении классификации исследуемых событий по параметрам ASY, AU и ASY, AL в одном классе оказываются продолжительные интенсивные магнитные бури. В этом классе можно вести восстановление индекса AU по ASY.