

НЕЛИНЕЙНАЯ СВЯЗЬ АВРОРАЛЬНЫХ (AU, AL) И СРЕДНЕШИРОТНЫХ (SYM-H, ASY-H) ИНДЕКСОВ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГЛАВНОЙ ФАЗЕ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ

^{1,2}О.М. Бархатова

NONLINEAR CONNECTION BETWEEN THE AURORAL (AU, AL) AND MID-LATITUDE (SYM-H, ASY-H) GEOMAGNETIC ACTIVITY INDICES AT THE MAIN PHASE OF GEOMAGNETIC STORM

^{1,2}O.M. Barkhatova

Исследована нелинейная связь магнитных возмущений в авроральной области и магнитного возмущения на средних и низких широтах на главной фазе геомагнитной бури с применением метода искусственных нейронных сетей. Уровень геомагнитной возмущенности в авроральной области оценивался на основе индексов интенсивности авроральных электроджетов (*AU*, *AL*), а в области средних широт – на основе индексов интенсивности кольцевого тока (*SYM-H*, *ASY-H*). Анализ результатов показал, что симметричная часть кольцевого тока имеет связь с восточным и западным электроджетами, однако для восточного электроджета эта связь выражена более отчетливо. Асимметричный кольцевой ток имеет нелинейную связь только с западным электроджетом. Обнаружено, что восточный электроджет во времена геомагнитных бурь развивается раньше западного электроджета. Определены характерные времена опережения в развитии среднеширотных магнитосферных процессов относительно авроральных. Эти выводы подтверждают гипотезу о существовании объединенной ионосферно-магнитосферной токовой системы, содержащей асимметричный кольцевой ток, восточный и западный электроджеты. Нелинейная связь между симметричной частью кольцевого тока и авроральными электроджетами достигается за счет активации этих токовых систем единым источником. Продемонстрирована возможность приемлемого нейросетевого восстановления индексов интенсивности авроральных электроджетов по данным об индексах кольцевого тока. Нейросетевая классификация рассматриваемых событий устанавливает связь динамики и продолжительности геомагнитного возмущения с эффективностью нейросетевого восстановления этого события.

Nonlinear connection between the magnetic disturbances in the auroral region and those at middle and low latitudes at the main phase of a geomagnetic storm has been analyzed. The method of artificial neural network was applied. The level of geomagnetic storminess in auroral region was estimated from indices of auroral electrojet intensities (*AU*, *AL*). At middle latitudes, it was estimated from indices of ring current intensities (*SYM-H*, *ASY-H*). The results showed the connection between the symmetric part of ring current and the eastward and westward electrojets, but it was more apparent for the eastward electrojet. Asymmetric ring current showed nonlinear interaction with the westward electrojet only. The eastward electrojet was found to develop before the westward one during geomagnetic storms. The characteristic times of advancing in development of mid-latitude magnetospheric processes relative to auroral ones were determined. These conclusions confirm the hypothesis of integrated ionosphere-magnetospheric current system including asymmetric ring current, eastward and westward electrojets. Nonlinear interaction between the symmetric part of ring current and the auroral electrojets is caused by the activation of these current systems by the same source. The possibility of satisfactory neural network restoration of indices of auroral electrojet intensity from the ring current indices is shown. The neural network classification of events under study determines the relationship of geomagnetic disturbance dynamics and duration with efficiency of neural network restoration of this event.

Введение

В рамках классических представлений о развитии ионосферных и магнитосферных токовых систем существует множество моделей, которые описывают их эволюцию в зависимости от уровня геомагнитной активности [Liemohn et al., 2001; Ganushkina et al., 2004]. В частности, существует мнение, что глобальные низкоширотные возмущения тем или иным образом связаны с возмущениями в авроральной области [Kamide et al., 1998; Huang, Foster, 2007]. В работе [Sun, Akasofu, 2000] показано, что во время геомагнитной бури кольцевой ток насыщается ионами O^+ , которые поступают к нему вдоль силовых линий во время развития магнитосферных суббурь. По сути это означает, что кольцевой ток и авроральные электроджеты составляют единую ионосферно-магнитосферную токовую систему. Анализ связи асимметричного кольцевого тока с восточным и западным электроджетами показал [Grafe et al., 1997], что асимметричный ток не связан с восточным электроджетом, однако с западным электроджетом такая связь есть.

Поскольку ионосферно-магнитосферные процессы обладают разными масштабами, токовые системы кольцевого тока и авроральных электроджетов могут иметь разные времена развития и, как след-

ствие, относительный временной сдвиг. В работе [Francia et al., 2004] изучалась связь между низкоширотным полем возмущения и суббуревой активностью с различными временными задержками. Было обнаружено, что развитие низкоширотного возмущения запаздывает относительно суббури на время порядка часа. В работах [Barkhatov et al., 2007a; Бархатов и др., 2008] был произведен поиск линейной связи между индексами, характеризующими развитие симметричной (индекс *SYM-H*) и асимметричной (индекс *ASY-H*) частей кольцевого тока, и индексами интенсивности восточного (*AU*) и западного (*AL*) электроджетов на примерах конкретных геомагнитных бурь. Анализ корреляционных связей между указанными индексами на главной фазе геомагнитной бури показал, что симметричная часть кольцевого тока отстает в развитии от восточного электроджета на время порядка получаса и от западного электроджета – на время порядка 2 ч. Асимметричная часть кольцевого тока имеет связь с обоими электроджетами и в течение главной фазы геомагнитной бури развивается с ними синхронно. Таким образом, результаты представленных выше работ свидетельствуют в пользу предположения о наличии связи между среднеширотными и авроральными токовыми системами. Однако необходимо

отметить, что существует предположение и об отсутствии непосредственной связи между этими токами [Grafe, Feldstein, 2000]. Согласно такому предположению токовые системы развиваются независимо друг от друга, а возникновение корреляции между индексами интенсивности указанных токовых систем является следствием наличия у них общего источника.

Таким образом, проблема развития и объединения этих токовых систем в настоящее время не решена до конца. В связи с этим остаются актуальными исследование пространственно-временного поведения геомагнитного поля и построение соответствующих теоретических моделей, описывающих процесс генерации, развития и распада токовых систем в земной магнитосфере.

В настоящем исследовании изучаются общие тенденции нелинейной связи элементов кольцевого тока с авроральными электроджетами для бурь различной интенсивности, а также проводится поиск характерных времен развития авроральных электроджетов на главной фазе геомагнитной бури. Для этих целей применяется нейросетевой подход, в котором используются искусственные нейронные сети (ИНС) Элмана с алгоритмом обратной связи и сеть с алгоритмом нечеткой логики Fuzzy. Установление степени влияния динамики *SYM-H*, *ASY-H*, *AU* и *AL* на наличие или отсутствие нелинейной связи между соответствующими индексами проводилось путем классификации всех рассматриваемых событий нейронной сетью типа слоя Кохонена.

Отметим, что искусственные нейронные сети успешно применялись в качестве инструмента для обнаружения связей между физическими величинами, характеризующими авроральную и среднеширотную геомагнитную активность [Munsami, 2000]. Используемый в данном исследовании подход позволяет обнаружить общие закономерности в развитии геомагнитных бурь и выполнить восстановление индексов интенсивности авроральных электроджетов по индексам кольцевого тока на главной фазе геомагнитной бури.

1. Инструменты исследования нелинейных связей

В настоящей работе рассматриваются последствия глобального ионосферно-магнитосферного процесса, что требует учета большого числа факторов. В связи с этим создание конкретных физических моделей затруднено [Круглов, Борисов, 2000], поэтому нейросетевой подход в данном случае является результативным.

1. Изучение нелинейной связи элементов кольцевого тока с авроральными электроджетами выполнялось с помощью ИНС обратного распространения ошибки, использующей алгоритм Левенберга–Марквардта (Levenberg–Marquardt) [Медведев, Потемкин, 2002]. Этот алгоритм входит в группу так называемых квазиньютоновых методов и основан на дополнительном вычислении вторых частных производных по весам и смещениям от функционала ошибки. Такой алгоритм позволяет быстро выполнить обучение ИНС, сохраняя монотонность

убывания ошибки, и устранить неизбежно возникающие осцилляции вблизи искомого глобального минимума в многомерном пространстве весов. Для обеспечения внутренней памяти анализируемого процесса в ИНС применяется алгоритм обратной связи Элмана.

Архитектура применяемой ИНС (рис. 1) определяется, исходя из физических представлений об изучаемых причинно-следственных связях. В данном случае необходимость учета и поиска оптимального временного сдвига в развитии полярных и среднеширотных токовых систем потребовала добавления блока динамической задержки (от нуля до двух часов с минутным шагом) сигнала в архитектуру сети. Количество скрытых слоев и нейронов в сети определялось экспериментальным путем для каждого численного эксперимента.

2. Общие тенденции нелинейной связи кольцевого тока с авроральными электроджетами анализировались с помощью сети, построенной на основе алгоритмов нечеткой логики. Аппарат нечетких множеств и нечеткой логики применяется для решения задач, в которых исходные данные являются ненадежными и слабо формализованными. Сильной стороной этого подхода является его универсальность: любая реальная система может быть аппроксимирована системой, основанной на нечеткой логике [Fuzzy Logic Toolbox..., 2000; Дьяконов, Круглов, 2001].

Сеть нечеткой логики на основе генерируемых правил реализует поиск всех возможных нечетких решений, и их усреднение объявляется конечным результатом. В этом заключается отличие такой сети от элмановской, которая ориентирована на поиск единственного локального минимума с помощью алгоритма градиентного спуска. Проектирование Fuzzy-сети для решения задачи восстановления числового ряда значений индексов кольцевого тока и авроральных электроджетов требует создания системы правил, согласно которым Fuzzy-сеть будет принимать взвешенные решения. Сеть нуждается в задании на входе как минимум пары функций принадлежности (membership function). В данном случае применялись две входные функции вида «колокол». Это означает, что количество нечетких ответов после воздействия на каждое входное значение функции принадлежности равно двум, а их усреднение в узле обработки нечетких ответов объявляется окончательным результатом (выходом Fuzzy-сети). Архитектура используемой в работе сети представлена на рис. 2.

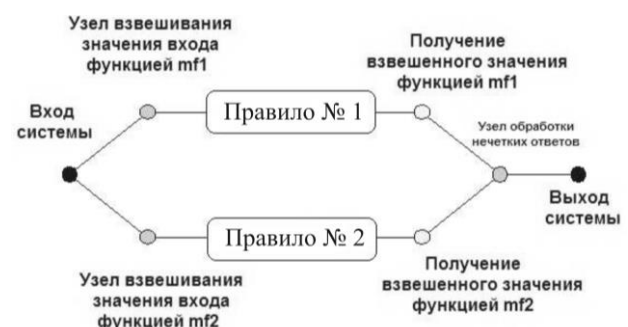


Рис. 1. Архитектура сети Элмана с добавленным блоком динамической задержки входного сигнала.

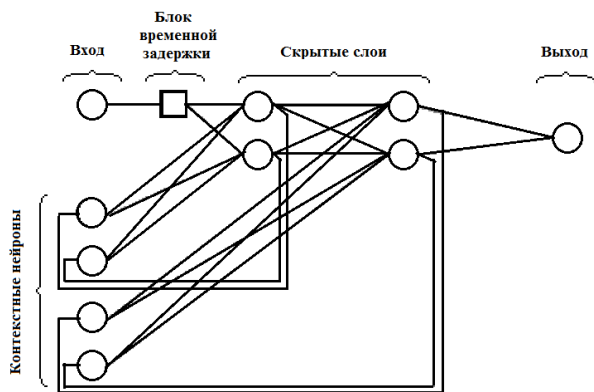


Рис. 2. Архитектура Fuzzy-структуры для решения задачи восстановления одного числового ряда по другому.

Обучение нечеткой логической системы сводится к оптимизации параметров для каждой из двух входных функций методом наименьших квадратов с таким расчетом, чтобы ответ Fuzzy-сети был близок к целевому результату в обучающем массиве данных. Настройка системы выполняется циклами, в течение каждого из которых оптимизируемые параметры получают положительное или отрицательное малое приращение. Таким образом, происходит обучение сети, после чего она готова к использованию. Восстановление неизвестного ряда числового происходит после подачи на вход значений известного параметра путем пересчета этих значений через оптимизированные функции принадлежности. Достоинством сети нечеткой логики является отсутствие эффекта переобучения и, соответственно, снижения ее интеллектуальных свойств. Фактически обучение Fuzzy-сети сводится к поиску многомерной поверхности ответов, максимально удовлетворяющей условиям конкретной задачи. Отметим, что данный инструмент работает над видоизменением своей многомерной рабочей поверхности, в отличие от ИНС, обучение которой сводится к поиску глобального минимума на уникальной для каждой задачи поверхности ошибок в пространстве весов и смещений. Подобный подход к решению задачи менее трудоемок в вычислительном плане и позволяет добиться хороших результатов за меньшее число циклов обучения.

3. Изучение уровня связи магнитных возмущений в авроральной области и магнитного возмущения на средних и низких широтах выполнялось с применением классификационного подхода к анализу рядов индексов AU, AL, SYM-H, ASY-H. При этом использовалась классификационная сеть типа слоя Кохонена, построенная по принципу самообучения. Алгоритм Кохонена [Круглов, Борисов, 2000; Медведев, Потемкин, 2002] заключается в том, что в процессе самообучения путем коррекции весов усиливаются связи между возбужденными нейронами. Это означает, что происходит коррекция и закрепление образа, отвечающего конкретной части из всей группы рассматриваемых событий, т. е. сеть способна обобщать схожие образы, относя их к одному классу. В данном случае под образами понимается динамика числовых рядов анализируемых индексов. Алгоритм настройки сети предполагает,

что для каждого входного вектора будет активизирован лишь один нейрон (нейрон-победитель). Этот нейрон обозначает номер класса, к которому отнесены конкретные числовые ряды индексов из всего набора анализируемых событий.

Отметим, что ввод входных числовых рядов в классификационную нейронную сеть выполнялся кумулятивным и продуктивным методами. При кумулятивном методе данные анализируемой пары индексов вводились последовательно, при продуктивном методе эти данные предварительно перемножались. В результате такого представления вводимых данных нейросеть в первом случае выполняла классификацию, в основном ориентируясь на амплитуду, продолжительность и динамику изменения данных. Во втором случае создавался «квадратичный» энергетический ряд данных и нейросеть в основном оценивала только интенсивность характеристик события.

Все представленные выше нейронные сети были для удобства объединены в программно-вычислительный комплекс, позволяющий выполнить необходимые нейросетевые эксперименты, направленные на обнаружение нелинейной связи между авроральными и среднеширотными геомагнитными возмущениями.

2. Данные и методика исследования

Исследование нелинейных связей внутри пар индексов SYM-H-AU, SYM-H-AL, ASY-H-AU и ASY-H-AL было проведено на данных тридцати одношаговых «классических» геомагнитных бурь различной интенсивности ($-300 \leq D_{st} \leq -50$ нТл) за период с 2000 по 2003 г. Отбор анализируемых событий проводился по индексу D_{st} . Под «классической» бурей здесь понимается уединенная одношаговая геомагнитная буря, включающая в себя главную фазу (характеризуется резким спадом значений индекса D_{st} по сравнению с невозмущенным уровнем) и более длительную, по сравнению с главной фазой, фазу восстановления. При этом из рассмотрения исключались V-образные и многошаговые бури.

Нелинейная связь между токовыми системами устанавливалась только на главной фазе рассматриваемых геомагнитных бурь, поскольку именно в этот период кольцевой ток и авроральные электроджеты наиболее развиты. Для этого выполнялись обработка, анализ данных и оценка полученных результатов согласно приведенной ниже последовательности.

1. Устранение резких скачков амплитуды, имеющих место в минутных значениях индексов AU и AL, выполнялось пятиминутным усреднением входных данных. Такое предварительное действие устраняет «дрожание» на выходе нейронной сети и позволяет более надежно выявить общую тенденцию в развитии авроральных токовых систем.

2. Поскольку нелинейные связи между среднеширотными и авроральными индексами геомагнитной активности имеют неоднозначный характер, их обнаружение производилось с помощью нейросетей двух типов – ИНС Элмана с алгоритмом обратной связи и сетью с алгоритмом нечеткой логики Fuzzy. Обучение ИНС в каждом из проведенных экспериментов выполнялось всегда заново по одному из событий, а остальные 29 событий последовательно

предлагались ей в качестве тестовых. В процессе обучения происходила подстройка весов, т. е. ИНС устанавливала связь между индексами *SYM-H*, *ASY-H* и *AU*, *AL* в пределах главной фазы конкретной геомагнитной бури. После того как сеть проходила 29 тестов, ей для обучения предлагалось следующее событие и т. д. Согласно данной методике были рассмотрены все тридцать событий. Эффективное восстановление тестовой последовательности на выходе ИНС продемонстрировало наличие нелинейной связи между рассматриваемыми парами индексов. Сеть Элмана является более динамичной по сравнению с сетью нечеткой логики Fuzzy. В связи с этим каждый эксперимент с ИНС типа Элмана был проведен пять раз.

3. Оценка качества восстановления индексов интенсивности авроральных электроджетов по индексам интенсивности кольцевого тока выполнялась на основе вычисления линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностью. Восстановление считалось удовлетворительным, если коэффициент корреляции превышал значение 0.4. Наличие линейной корреляции в этом случае показывает, что связь между среднеширотными и авроральными токовыми системами имеет тот же характер, что и в событии, по которому происходило обучение. Отсутствие линейной корреляции говорит о том, что в новом событии характер связи принципиально иной. Таким образом, на основании полученных результатов можно выявить общие тенденции в развитии единой ионосферно-магнитосферной токовой системы для разных геомагнитных бурь.

4. Результаты, полученные с помощью сети Fuzzy, добавлялись в общую статистику, сформированную на основе полученных при работе сети Элмана результатов. Таким образом, для каждой пары индексов было проведено 5400 нейросетевых экспериментов.

Необходимо отметить, что среди полученных результатов встречались случаи с низким коэффициентом линейной корреляции, однако форма кривой, восстановленной нейросетью, повторяла форму исходной кривой. В данном случае малое значение коэффициента линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностями может объясняться небольшим сдвигом кривых относительно друг друга. При совпадении форм кривых и при наличии повторяемости результата подобные случаи включались в общую статистику. Такой подход позволяет дополнить результаты по выявлению нелинейных связей между авроральными и среднеширотными токами, опирающиеся на формальное значение коэффициента линейной корреляции между реальной и восстановленной последовательностями.

3. Результаты установления временного сдвига в развитии симметричной части кольцевого тока и авроральных электроджетов

Во время геомагнитных бурь среднеширотные и авроральные токовые системы могут иметь относительный временной сдвиг в развитии, обусловленный различными механизмами их формирования. Как отмечалось выше, в работе [Francia et al., 2004] был обнаружен временной сдвиг 1 ч между значе-

ниями горизонтальной компоненты геомагнитного поля и индексом *AE* во время геомагнитных возмущений с $D_{st} \leq 100$ нТл. Это свидетельствует о более раннем развитии авроральной активности по сравнению со среднеширотной. В работе [Barkhatov et al., 2007a] также было установлено существование временного сдвига в развитии среднеширотных и авроральных токовых систем: симметричный кольцевой ток задерживался в развитии относительно восточного электроджета на 30 мин, а относительно западного электроджета – 120 мин. Для асимметричной части кольцевого тока временных задержек относительно электроджетов не обнаружено, что может свидетельствовать о синхронном развитии этих токовых систем.

В настоящем исследовании была проведена нейросетевая проверка отмеченных выше значений временного сдвига для среднеширотных и авроральных токовых систем. Для пары *SYM-H–AU* был выполнен поиск нелинейных корреляций с временными сдвигами 0, 30 и 60 мин согласно методике, изложенной в разделе 2. При этом индекс *SYM-H* задерживался относительно *AU*. Для пары *SYM-H–AL* были проведены аналогичные нейросетевые эксперименты с временными сдвигами 0, 60 и 120 мин, причем индекс *SYM-H* задерживался относительно *AL*. В общей сложности было выполнено 32400 экспериментов с нейронными сетями типа Элмана и Fuzzy.

Установление конкретных значений временного сдвига, при котором наблюдается наибольшее количество удачных восстановлений для рассматриваемых пар индексов, проводилось методом статистического анализа полученных результатов. Для этого был вычислен параметр *W*, представляющий собой отношение числа случаев с удовлетворительной корреляцией для каждой пары индексов (*SYM-H–AU*, *SYM-H–AL*) к общему числу возможных сочетаний для всех событий геомагнитных бурь:

$$W = \frac{N}{2C_m^n},$$

где *N* – число случаев с коэффициентом корреляции > 0.4 , C_m^n – общее число сочетаний для рассматриваемых событий из $m = 30$ (все рассматриваемые события) по $n = 2$ (одно событие, по которому происходило обучение, другое – восстанавливаемое нейросетью).

Полученные результаты позволили установить значения временных сдвигов: для пары *SYM-H–AU* параметр *W* имеет максимальное значение ($W = 0.43$) при временном сдвиге 30 мин, а для пары *SYM-H–AL* – при сдвиге 60 мин ($W = 0.45$). Это означает, что для геомагнитных бурь разной интенсивности в общем случае характерно запаздывание в развитии кольцевого тока относительно авроральных электроджетов.

Согласно представлениям [Grafe, Feldstein, 2000], нашедшим подтверждение в исследованиях [Бархатова и др., 2011; Бархатов и др., 2008; Barkhatov et al., 2007a], симметричный кольцевой ток и авроральные электроджеты развиваются независимо друг от друга. Это означает, что разный временной сдвиг восточного и западного электроджетов по от-

ношению к симметричной части кольцевого тока позволяет установить их характерные времена развития. Поскольку временной сдвиг между индексами $SYM-H-AU$ меньше, восточный электроджет спустя 30 мин после начала геомагнитной бури развит более интенсивно, чем западный.

4. Статистический анализ результатов восстановления индексов интенсивности авроральных электроджетов

Нейросетевые эксперименты по установлению временных сдвигов в развитии авроральных и среднеширотных токовых систем показали существование связи между индексами, характеризующими их интенсивность. Возможно приемлемое восстановление индексов интенсивности восточного (AU) и западного (AL) электроджетов по данным о симметричной части кольцевого тока ($SYM-H$) и западного электроджета (AL) – по данным о его асимметричной части ($ASY-H$). Введение установленной (см. раздел 3) задержки в развитии симметричной части кольцевого тока относительно полярных токовых систем существенно улучшает качество восстановления индексов AU и AL по индексу $SYM-H$.

Примеры восстановления индексов интенсивности авроральных электроджетов по индексам интенсивности кольцевого тока для каждой из рассматриваемых пар приведены на рис. 3.

Статистический анализ результатов нейросетевых экспериментов проводился путем вычисления параметра W для каждой пары рассматриваемых индексов. Для пар $SYM-H-AU$ и $SYM-H-AL$ вычисление производилось с учетом установленных ранее временных задержек. В данном случае значения параметра W позволяют характеризовать общность рассматриваемых ионосферно-магнитосферных процессов на главной фазе геомагнитной бури. Полученные значения этого параметра для каждой пары индексов представлены на рис. 4.

Для пар индексов $SYM-H-AU$, $SYM-H-AL$ и $ASY-H-AL$ $W > 0.4$. Это может означать наличие устойчивой связи между соответствующими токовыми системами и их аналогичный сценарий развития в пределах геомагнитных возмущений разной интенсивности.

Для пар $SYM-H-AU$, $SYM-H-AL$ это может быть обусловлено активацией рассматриваемых токовых систем единым источником. Действительно, токовая система симметричной части кольцевого тока замкнута и не нуждается в объединении с авроральными электроджетами. Для пары $ASY-H-AL$ заметная корреляция может объясняться объединением соответствующих токовых систем. Такой вывод согласуется с результатами работ [Grafe et al., 1997; Barkhatov et al., 2007a]. Полученный невысокий уровень связи для пары $ASY-H-AU$ также не противоречит исследованиям [Grafe et al., 1997].

Для установления дополнительных особенностей нелинейной связи токовой системы асимметричного кольцевого тока с авроральными электроджетами было подсчитано число удовлетворительных восстановлений каждого из событий. Такой анализ позволяет установить, насколько развитие того или иного

события является типичным для главной фазы геомагнитной бури. На рис. 5 представлены результаты подсчета числа удовлетворительных восстановлений для пар индексов $ASY-H-AU$ и $ASY-H-AL$. По оси X последовательно отмечены тридцать событий, а по оси Y – число удовлетворительных восстановлений. Серым цветом показаны результаты для пары $ASY-H-AU$, черным цветом – для пары $ASY-H-AL$.

При рассмотрении полученных результатов можно обнаружить, что существуют события, одинаково хорошо восстанавливаемые для пар $ASY-H-AU$ и $ASY-H-AL$, например 9, 29. Есть события, которые для этих же пар индексов восстанавливаются одинаково плохо, – 11, 15, 16. Но для большинства событий наблюдается «смещение равновесия» от индекса AU к индексу AL : если для пары $ASY-H-AU$ число восстановлений конкретного события велико, то для пары $ASY-H-AL$ в пределах того же события число восстановлений будет малым, и наоборот. Такая тенденция наиболее заметна для событий 3 и 25 – для этих случаев «смещение равновесия» максимально, соответственно, нет черного и серого столбиков.

Исходя из предположения, что асимметричный кольцевой ток образует с восточным и западным электроджетами единую ионосферно-магнитосферную токовую систему, можно заключить, что наличие указанного «смещения» внутри пар $ASY-H-AU$ и $ASY-H-AL$ свидетельствует о степени развития каждого из электроджетов. Иными словами, если один из электроджетов развит значительно, то другой имеет слабое развитие. Это может означать, что восточный и западный электроджеты имеют единый энергетический бюджет. Согласно рис. 5, для наибольшего числа случаев «смещение» имеет место в сторону пары $ASY-H-AL$. Таким образом, хорошая связь асимметричного кольцевого тока с западным электроджетом, полученная в работах [Grafe et al., 1997; Barkhatov et al., 2007a] и подтвержденная в настоящей работе, может объясняться тем, что на главной фазе геомагнитной бури западный электроджет обычно развит интенсивнее восточного.

Исследуя уровень корреляции западного электроджета с симметричной и асимметричной частями кольцевого тока, можно определить характерное время изменения его интенсивности. Как было отмечено выше, при отсутствии временной задержки западный электроджет наиболее развит, что видно при рассмотрении пары $ASY-H-AL$. Однако спустя 30 мин после начала геомагнитной бури его интенсивность спадает и наибольшее развитие получает восточный электроджет, что видно при анализе значений параметра W для пары $SYM-H-AU$. При дальнейшем развитии бури, приблизительно через 60 мин после ее начала, западный электроджет снова оказывается более развитым по сравнению с восточным (параметр W для пары $SYM-H-AL$). Таким образом, можно сделать вывод, что характерное время изменения интенсивности западного электроджета составляет в среднем порядка одного часа. Полученное значение согласуется с результатами [Francis et al., 2004].

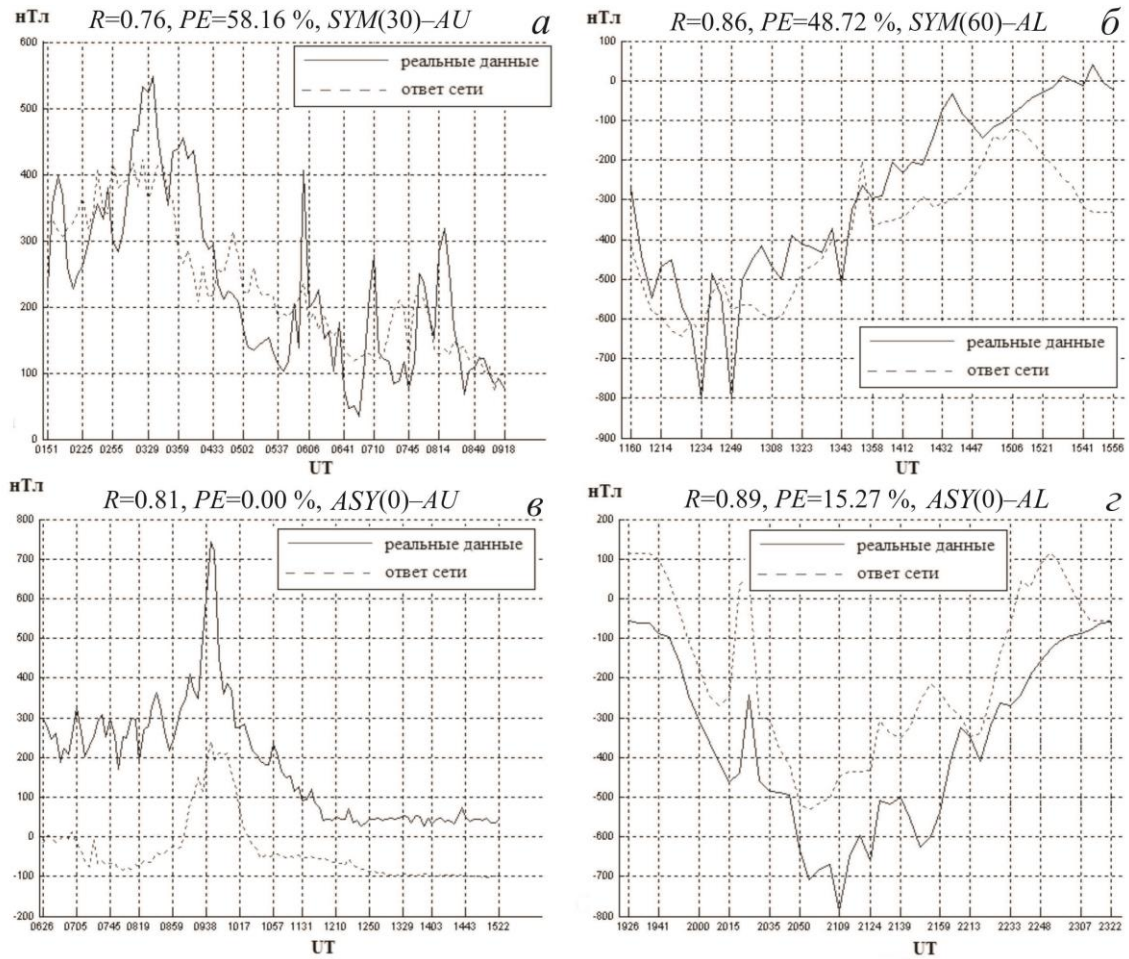


Рис. 3. Примеры восстановления индексов AU (а) и AL (б) по индексу SYM-H; индексов AU (в) и AL (г) по индексу ASY-H.

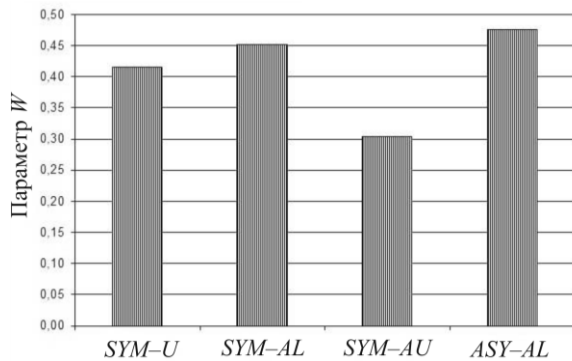


Рис. 4. Значения параметра W для каждой пары рассматриваемых индексов с учетом установленных временных задержек.

5. Классификационный подход к анализу связи магнитных возмущений в авроральной области и магнитного возмущения на средних и низких широтах

Рассматриваемые в данной работе геомагнитные бури имеют разные интенсивности и продолжительности главных фаз. Несмотря на то, что временной ход индекса D_{st} для всех рассмотренных событий имеет «классическую» форму, динамика симметричной и асимметричной частей кольцевого тока, а также авроральных электроджетов в пределах разных событий существенно различается. Для установ-

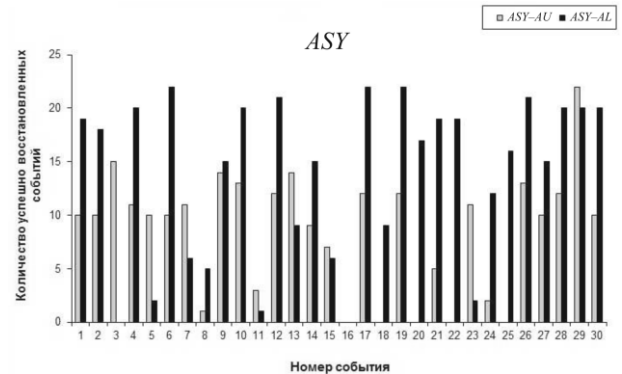


Рис. 5. Количество случаев удовлетворительного восстановления каждого из рассматриваемых событий.

ления степени влияния динамики SYM-H, ASY-H, AU и AL на наличие или отсутствие нелинейной связи между соответствующими индексами была проведена нейросетевая классификация всех рассматриваемых событий.

Классификация сетью типа слоя Кохонена проводилась по двум параметрам, которые соответствовали исследуемым парам индексов: SYM-H и AU; SYM-H и AL; ASY-H и AU; ASY-H и AL. В каждом эксперименте нейронной сети предлагалось разделить все тридцать событий на два класса. Для оценки эффективности работы сети Кохонена в каждой из рассматриваемых пар индексов были выбраны собы-

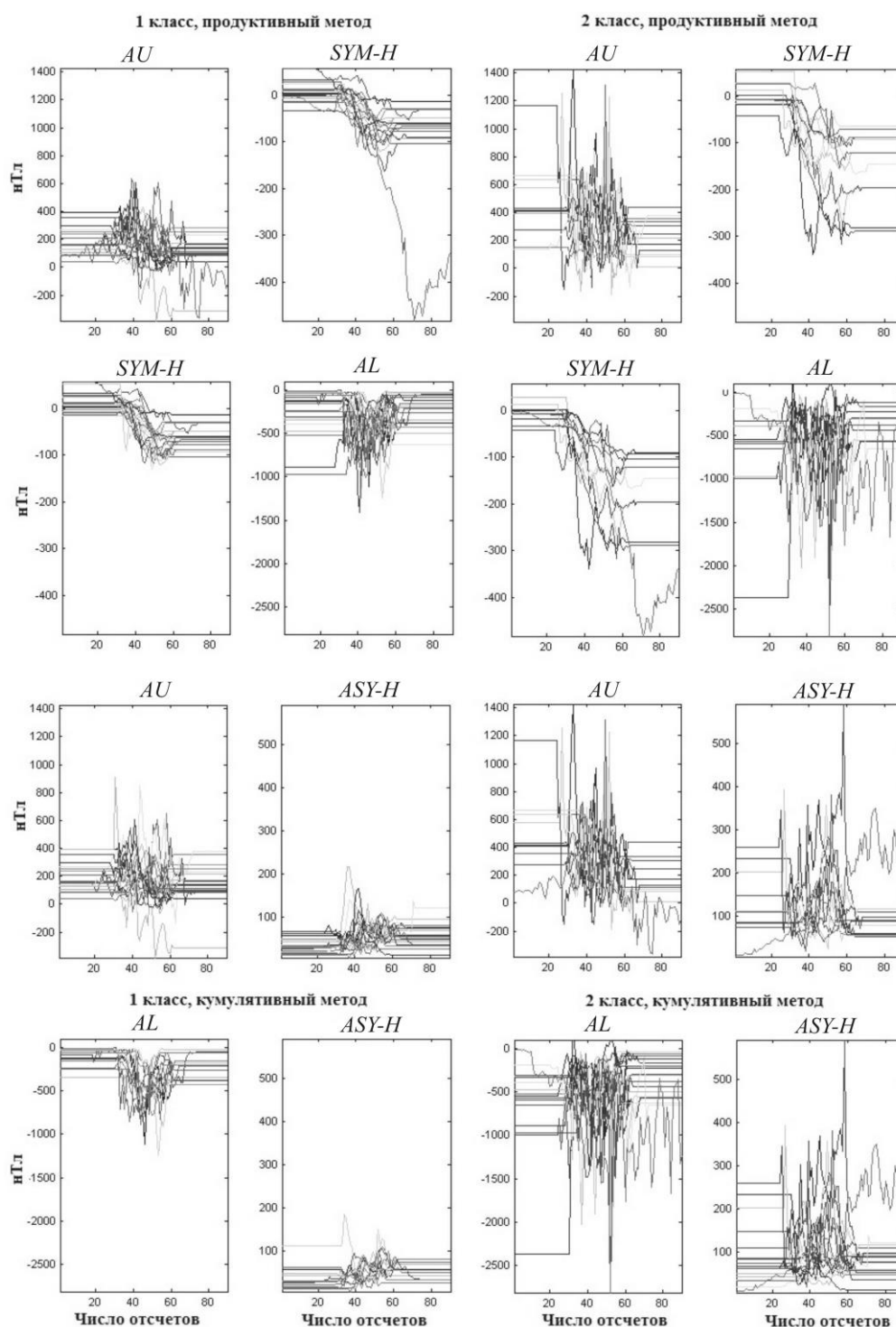


Рис. 6. Классификация 30 геомагнитных событий, выполненная продуктивным ($SYM-H-AU$, $SYM-H-AL$, $ASY-H-AU$) и кумулятивным ($ASY-H-AL$) методами. По оси абсцисс отложено число пятиминутных интервалов, соответствующих числу отсчетов значений рассматриваемых индексов для геомагнитной бури максимальной продолжительности, по оси ординат – значения рассматриваемых индексов (в нТл).

тия, имеющие наибольшее количество удовлетворительных восстановлений, и события, имеющие наименьшее число удовлетворительных восстановлений для всех рассматриваемых пар индексов. Предполагалось, что эти события должны оказаться в разных классах. Эксперименты выполнялись кумулятивным и продуктивным методами для каждой пары классификационных параметров. Результаты представлены на рис. 6. Они свидетельствуют о том,

что классификация исследуемых событий выполнена по их продолжительности и степени интенсивности. В первый класс в основном попали короткие события с малой интенсивностью, а во второй класс – длительные и интенсивные.

Анализ нейросетевых результатов показал, что при классификации исследуемых событий только по параметрам $SYM-H$ и AU в первый класс попадает 80 % наиболее часто восстанавливаемых событий.

События, которые в нейросетевом восстановлении встречаются редко, классифицируются плохо и делятся между двумя классами почти поровну. При классификации только по параметрам *SYM-H* и *AL* нейросеть помещает 90 % событий, наиболее часто встречающихся в восстановлении, в первый класс. События, редко встречающиеся в восстановлении, как и для предыдущей пары, делятся поровну между классами. Заметим, что продуктивный метод классификации параметров *SYM-H*, *AU* и *SYM-H*, *AL*, в отличие от кумулятивного, дает более четкую картину разделения хорошо восстанавливаемых событий. Согласно полученным результатам для классификационных параметров *SYM-H* и *AU* и *SYM-H* и *AL*, хорошо восстанавливаемые события объединяет общий вид динамики симметричного кольцевого тока и авроральных электроджетов. Почти все эти события имеют небольшие амплитуды и длительности и соответствуют «классическому» развитию геомагнитной бури и суббури. Можно предположить, что физические ионосферные и магнитосферные процессы в них имеют одну и ту же природу и развиваются по одному сценарию.

При классификации тридцати событий по параметрам *ASY-H* и *AU* наблюдаются сходные закономерности: 80 % событий, наиболее часто встречающихся в восстановлении, оказались в одном (втором) классе, а события, имеющие плохое нейросетевое восстановление, практически не классифицируются. Второй класс, как отмечалось выше, состоит из интенсивных и длительных событий. Здесь результаты получены продуктивным методом, который в этих экспериментах также оказался более эффективным, чем кумулятивный. Для параметров *ASY-H* и *AL* наблюдается совершенно иная картина распределения событий. События, наиболее часто встречающиеся в восстановлении, в равной степени разделились между классами. Однако 90 % событий, которые в нейросетевом восстановлении встречались редко, попали во второй класс. Отметим, что для классификации параметров *ASY-H* и *AL* кумулятивный метод оказался эффективнее, чем продуктивный.

Таким образом, при классификации по двум параметрам, одним из которых является индекс *ASY-H*, большинство событий, часто (*ASY-H* и *AU*) или редко (*ASY-H* и *AL*) встречающихся в восстановлении, попадает в класс интенсивных и продолжительных событий. В случае с параметрами *ASY-H* и *AU* в такой класс попали «классические» события, которые в восстановлении встречаются часто. В случае с параметрами *ASY-H* и *AL* в этот класс попали «неклассические» события, которые реже всех встречались в восстановлении. Этот факт подтверждает гипотезу о существовании ионосферно-магнитосферной токовой системы, составными частями которой являются асимметричный кольцевой ток и оба авроральных электроджета. Иными словами, если в такой токовой системе связь *ASY-H*–*AU* сильна, то связь *ASY-H*–*AL* практически незаметна, и наоборот. Полученный вывод полностью подтверждает результаты, полученные в разделе 4 (см. рис. 5).

Выше было отмечено, что нейросетевая классификация выполнялась двумя методами. Кумулятив-

ный метод, основанный на последовательном рассмотрении предлагаемых функций, описывающих изменения индексов, учитывает динамику классификационных параметров. Продуктивный метод, основанный на перемножении параметров, предлагаемых сети, учитывает энергетику процесса. Численные эксперименты показали, что для пар индексов *SYM-H* – *AU* и *SYM-H* – *AL* продуктивный метод оказался предпочтительнее для выделения событий, в которых индексы коррелируют. Это подтверждает нашу гипотезу о существовании хорошей нелинейной корреляции внутри пар *SYM-H*–*AU* и *SYM-H*–*AL* за счет активации соответствующих токовых систем единым энергетическим источником. При классификации по параметрам индексов *ASY-H*, *AU* и *ASY-H*, *AL* при выделении событий с коррелируемыми индексами для первой пары предпочтительным оказался продуктивный метод, а для второй – кумулятивный. Согласно предположению об объединении токовых систем асимметричной части кольцевого тока и обоих авроральных электроджетов, коррелируемость индексов обусловлена динамикой и распределением энергии магнитосферно-ионосферных процессов.

Выводы

В представленной работе исследовалась нелинейная связь между симметричной, асимметричной частями кольцевого тока и авроральными электроджетами. Для этого нейросетевым методом выполнялось восстановление индексов интенсивности восточного (*AU*) и западного (*AL*) электроджетов по индексам интенсивности симметричного (*SYM-H*) и асимметричного (*ASY-H*) кольцевого тока. Степень влияния динамики *SYM-H*, *ASY-H*, *AU* и *AL* на наличие или отсутствие нелинейной связи между соответствующими индексами изучалась при нейросетевой классификации всех рассматриваемых событий. На основе численных экспериментов и статистической обработки полученных результатов сделаны следующие выводы.

1. Обнаружена нелинейная связь авроральных электроджетов с симметричной и асимметричной частями кольцевого тока на главной фазе геомагнитной бури, о чем свидетельствует возможность удовлетворительного нейросетевого восстановления значений соответствующих индексов интенсивности.

2. Анализ временных сдвигов между индексами *SYM-H*, *AU* и *SYM-H*, *AL*, а также значений параметра *W* для всех рассматриваемых пар индексов позволяет установить временную схему развития соответствующих токовых систем в пределах магнитной бури. В момент начала бури (при нулевой задержке) асимметричная часть кольцевого тока объединена с обоими авроральными электроджетами, однако западный электроджет развит интенсивнее восточного. Спустя 30 мин после начала бури наблюдается связь симметричной части кольцевого тока с восточным электроджетом, что может означать более интенсивное развитие восточного электроджета по сравнению с западным. Спустя еще 30 мин (1 ч после начала бури) усиливается связь симметричной части кольцевого тока с западным электроджетом, что означает более интенсивное развитие западного электроджета по сравнению с восточным. Таким

образом, западный электроджет является наиболее интенсивным в момент начала бури и через час после начала, а восточный электроджет – спустя 30 мин после начала бури.

3. Установлено наличие «смещения» в развитии авроральных электроджетов относительно друг друга: при значительном развитии западного электроджета восточный электроджет развит слабо, и наоборот. Можно предположить, что токовые системы асимметричного кольцевого тока и восточного, и западного электроджетов имеют общий энергетический бюджет. Это подтверждает гипотезу об объединении указанных токовых систем на главной фазе магнитной бури.

4. По результатам нейросетевой классификации кумулятивным и продуктивным методами установлено, что хорошее восстановление индексов AU и AL по индексу SYM-H в большинстве случаев происходит для непродолжительных главных фаз геомагнитных бурь малой или средней амплитуды («классические» геомагнитные бури). При классификации по параметрам ASY-H, AU и ASY-H, AL подтверждено обнаруженное «смещение» в развитии авроральных электроджетов.

Таким образом, в данной работе нейросетевым анализом подтверждена гипотеза [Бархатов и др., 2008; Barkhatov et al., 2007a; Grafe et al., 1997; Grafe, Feldstein, 2000] об объединении токовой системы кольцевого тока с восточным и западным авроральными электроджетами на главной фазе геомагнитной бури. Уровень связи между указанными токами определяется динамикой и энергетикой ионосферно-магнитосферных физических процессов.

Благодарю Бархатова Н.А. за постановку задачи и полезные обсуждения.

Работа поддержана грантами РФФИ № 12-02-31043, 12-05-00425 и по проекту госзадания Министерства образования и науки «Разработка современных методов прогнозирования магнитосферно-ионосферного состояния в целях обеспечения успешных коммуникаций на основе поиска фундаментальных закономерностей влияния солнечной активности».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Церковнюк О.М. Анализ связи индексов, характеризующих симметричный SYM и асимметричный ASY кольцевой ток, с индексами активности авроральных электроджетов AE (AU, AL) // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48, № 4. С. 520–525.

Бархатова О.М., Бархатов Н.А., Беспалов П.А. Выступы плазмосферы и вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51, № 2. С. 214–223.

Дьяконов В.П., Круглов В.В. Математические пакеты расширения MATLAB: Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 480 с.

Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2000. 384 с.

Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 496 с.

Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk O.M. Analysis of connection of indices SYM, ASY of the ring current magnetic field with indices AE (AU, AL) // Proc. 29th Annual Seminar. Apatity, 2007a. P. 17.

Barkhatov N.A., Levitin A.E., Tserkovniuk O.M. The analysis of the relationship between magnetic field global indices (SYM, ASY) and auroral electrojet indices (AU, AL) under the account of parameters of a solar wind and an interplanetary magnetic field // Proc. 30th Annual Seminar. Apatity, 2007b. P. 13–16.

Barkhatova O.M., Revunov S.E., Barkhatov N.A., Levitin A.E. Polar current systems at the main phase of a geomagnetic storm // Proc. 31st Annual Seminar. Apatity, 2008. P. 13–16.

Barkhatova O.M., Revunov S.E. Nonlinear connection of ring current and auroral electrojets activity with solar wind and interplanetary magnetic field parameters // Proc. 33rd Annual Seminar. Apatity, 2010. P. 21–24.

Huang C., Foster J.C. Correlation of the subauroral polarization streams (SAPS) with the D_{st} index during severe magnetic storms // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A11302. doi:10.1029/2007JA012584.

Francia P., Villante U., Adorante N., Gonzalez W.D. The storm-time ring current: A statistical analysis at two widely separated low-latitude stations // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 3699–3705.

Ganushkina N.Yu., Pulkkinen T.I., Kubysheva M.V., Singer H.J., Russell C.T. Long-term evolution of magnetospheric current systems during storms // Ibid. 2004. V. 22. P. 1317–1334.

Grafe A., Bespalov P.A., Trakhtengerts V.Y., Demehov A.G. Afternoon mid-latitude current system and low-latitude geomagnetic field asymmetry during geomagnetic storm // Ibid. 1997. V. 15. P. 1537–1547.

Grafe A., Feldstein Y.I. About the relationship between auroral electrojets and ring currents // Ibid. 2000. V. 18. P. 874–886.

Kamide Y., Baumjohann W., Daglis I.A., et al. Current understanding of magnetic storms: Storm–substorm relationships // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N. AS. P. 17,705–17,728.

Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F., et al. Dominant role of the asymmetric ring current in producing the stormtime D_{st} // Ibid. 2001. V. 106, N. A6. P. 10,883–10,904.

Munsami V. Determination of the effects of substorms on the storm-time ring current using neural networks // Ibid. 2000. V. 105, N. A12. P. 27,833–27,840.

Sun W., Akasofu S.-I. On the formation of the storm-time ring current belt // Ibid. 2000. V. 105, N. A3. P. 5411–5418.

¹Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный педагогический университет, Нижний Новгород, Россия