

ТЕХНОЛОГИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В МОДЕЛИРОВАНИИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ МАГНИТОСФЕРНОЙ И ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

**Н.А. Бархатов^{1,2}, А.В. Королев²,
А.Е. Левитин³, С.Е. Ревунов²,
С.Ю. Сахаров², В.П. Урядов¹**

1 – Научно-исследовательский радиофизический институт

2 – НГПУ, Нижний Новгород

3 – ИЗМИРАН, Москва.

В настоящей работе изложены методы восстановления, коррекции, прогнозирования и классификации характеристик магнитосферной активности и прогнозирования параметров ионосферных слоев, основанных на технологии искусственных нейронных сетей (ИНС) с учетом изменяющихся условий космической погоды. Такой подход определяет связи между входными и выходными параметрами на основе экспериментальных данных без построения физических моделей. Это особенно эффективно для сложных геофизических систем, когда физическая модель слишком сложна или даже отсутствует [1-5]. Вместе с тем, там, где это оказалось возможным, при построении архитектуры ИНС учтены достижения, полученные на основе физических моделей изучаемых процессов.

В первой группе наших исследований, посвященных восстановлению магнитных записей, прогнозированию и коррекции индексов геомагнитной активности была использована рекуррентная ИНС с обратным распространением ошибки, петель обратной связи Элмана и линией задержки (Рис.1). Здесь обратная связь в скрытом слое отражает внутреннюю память изучаемого процесса. Моделирование воздействия предыстории изучаемого процесса осуществляется линией временной задержки, т.е. подачей на дополнительные входные нейроны рядов анализируемых значений за предыдущие временные интервалы. Линия задержки в этом случае играет роль краткосрочной внешней памяти [1-4].

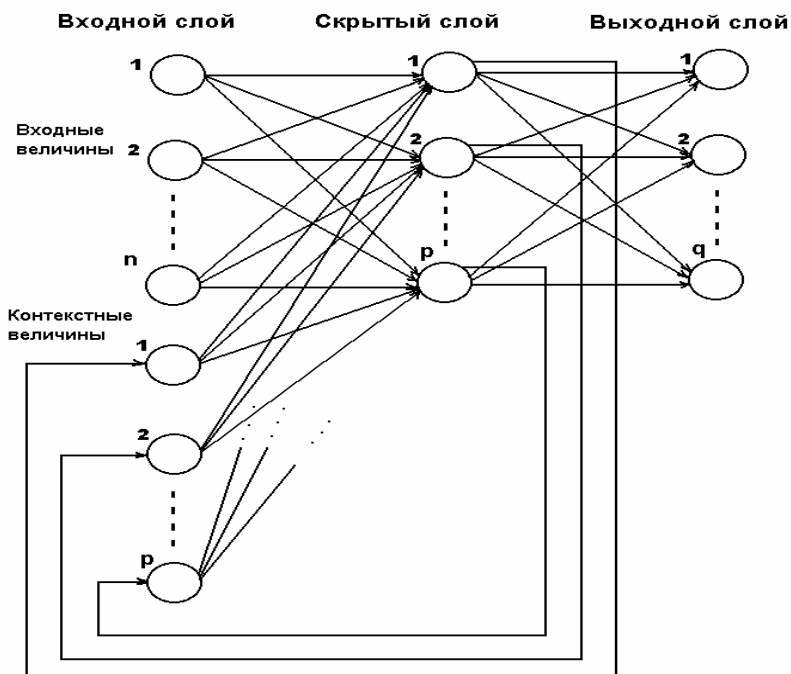


Рис. 1. Архитектура ИНС обратного распространения ошибки.

Прогнозирование критической частоты f_{cr} ионосферного слоя F2 выполнялось на ИНС обратного распространения ошибки, обладающих специальными архитектурами. Оценка качества прогнозирования делалась для интервалов наличия последовательностей реальных значений. Она вычислялась на основе эффективности прогноза (единицы, уменьшенной на величину отношения среднеквадратичной ошибки к дисперсии целевого процесса) и классического коэффициента корреляции между реальными и прогнозируемыми значениями [5].

Классификация комплексов, включающих геомагнитные и космические возмущенные параметры, проводилась путем создания самообучающихся ИНС, действующих по алгоритму Кохонена. Такие самонастраивающиеся схемы позволяют автоматизировать процесс космической классификации и привнести эффект интеллектуального разделения входных образов на классы.

Прогнозирование Dst

Методами ИНС рассмотрены вопросы прогнозирования динамики геомагнитного индекса Dst по параметрам солнечного ветра (ПСВ) и

межпланетного магнитного поля (ММП). Для этого была специально создана программа ИНС обратного распространения ошибки с алгоритмом подстройки весовых коэффициентов (связей между нейронами) на основе минимизации целевой квадратичной функции методом градиентного спуска. Предварительное обучение ИНС проводилось на временном ряде данных продолжительностью 899 часов с использованием модифицированной версии алгоритма градиентного снижения с адаптивной обучающей схемой. Для анализа работы ИНС были использованы усредненные на часовом интервале параметры солнечного ветра и ММП, взятые из данных спутниковой системы OMNI и полученные в 1978—1994 гг. Проверка функционирования ИНС проводилась на интервале продолжительностью 107 часов, с 03:00 UT 7 января 1979 года по 13:00 UT 11 января 1979 года, содержащем магнитную бурю. Результат прогнозирования на 1 час вперед отражен на Рис.2 где сплошная линия – измеренные значения индекса Dst, точечная линия-прогноз, полученная с помощью обученной ИНС (входные параметры: $|B|$, V_z , V , n ; число скрытых нейронов 4, линия задержки во входном слое 4 часа, обратная связь включена).

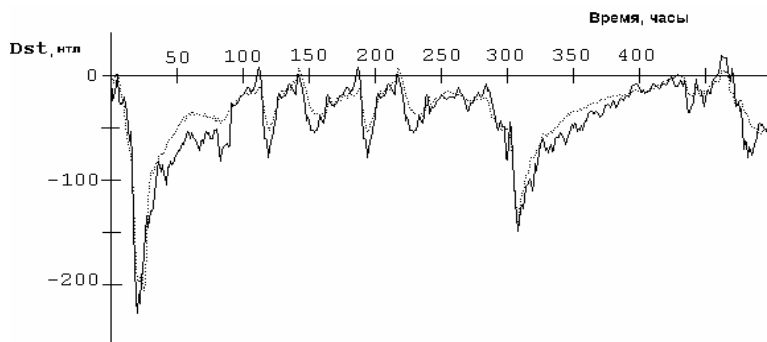


Рис. 2. Пример сопоставления измеренных значений Dst индекса (сплошная линия) и значений восстановленных при помощи ИНС (точечная линия).

В результате разработанной методики [1] реализуется надежное прогнозирование, с качеством 76% на час вперед, динамики геомагнитного индекса Dst. Определен набор гелиосферных параметров, определяющих динамику магнитосферы Земли. Наибольшее влияние на формирование геомагнитных бурь оказывают: компонента V_z ММП, скорость и плотность плазмы солнечного ветра. Добавление к ним параметров, которые с физической точки зрения не должны оказывать влияние на формирование геомагнитной бури, не влияет на точность прогнозирования. Наоборот, изъятие из указанного набора любого параметра сильно уменьшает точность прогнозирования. Включение обратной связи в скрытом слое и наличие

линии задержки во входном слое обеспечивают физически обоснованную временную задержку геомагнитных возмущений по отношению к изменениям в околоземном космическом пространстве, и поэтому прогнозирование индекса Dst улучшается.

Восстановление пробелов в записях магнитных обсерваторий

Ввиду различного рода проблем в настоящее время закрыт ряд магнитных обсерваторий. Кроме того, часто имеют место сбои в работе действующих центров регистрации геомагнитного поля. Для этого создана ИНС и разработана методика восстановления с ее помощью пробелов в записях магнитных обсерваторий по записям на других обсерваториях (3). В частности, исследовалась возможность восстановления записей магнитного поля на обсерватории Алма-Ата по данным обсерватории Какиока (Рис. 3.)

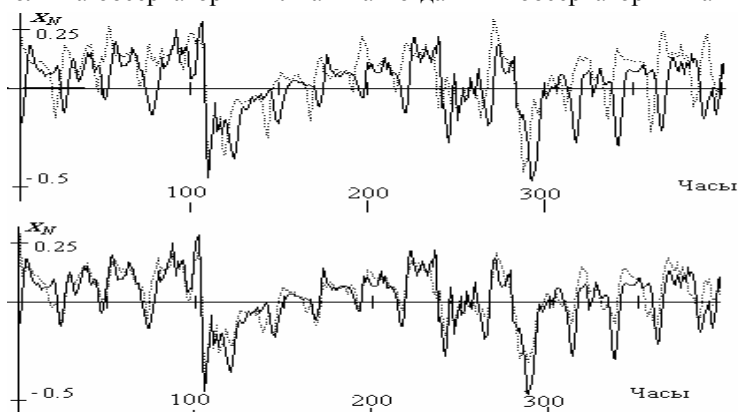


Рис 3. Реальные нормированные данные X_N обсерватории Алма-Ата (сплошная линия) и обсерватории Какиока (пунктирная линия) за период 12 августа, 12.00 UT – 30 августа 1979, 23.00 UT (вверху) и восстановленные данные (X_N) обсерватории Алма-Ата (пунктирная линия), наложенные на реальные данные этой обсерватории (сплошная линия) за тот же период времени (внизу).

Хорошо заметные на Рис. 3 солнечно-суточные магнитные вариации на обсерватории Какиока сдвинуты относительно тех же вариаций на обсерватории Алма-Ата за счет разницы в местном времени. Именно это является причиной, мешающей точно восстанавливать данные одной станции по наблюдениям на другой, если они значительно разнесены по долготе.

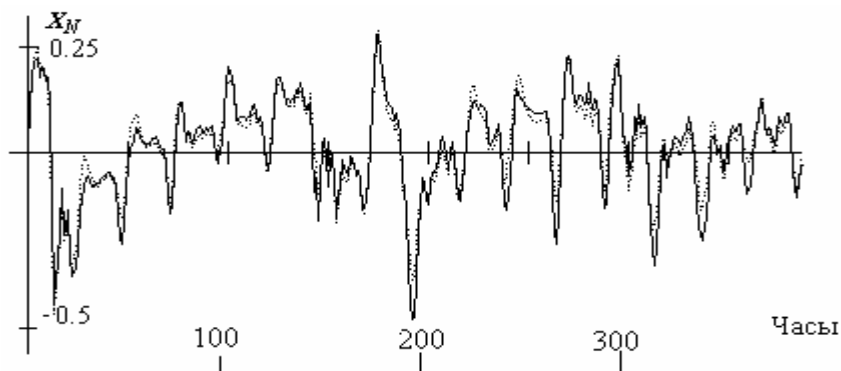


Рис 4. Реальные данные X_N обсерватории Какиока (сплошная линия) и 16 августа, 16.00 UT– 30 августа 1979, 23.00 UT и восстановленные данные (X_N) обсерватории Какиока (пунктирная линия) за тот же период времени.

Качество восстановления среднечасовых нормированных значений горизонтальной составляющей вектора геомагнитного поля X_N обсерватории Какиока по данным близко расположенной станции Каноя (эти точки наблюдения отличаются по долготе всего на 9 градусов, 500 км) с помощью ИНС характеризуется объективной оценкой 95% (Рис.3.).

Для уменьшения влияния солнечно-суточной вариации на восстановление магнитных данных в структуру ИНС вводилась периодическая функция в виде дополнительной входной величины. Были использованы два вида функций – пилообразную и синусоидальную. Наилучший результат получен при использовании пилообразной периодической функции. В этом случае качество восстановления данных Алма-Аты по данным обсерватории Какиока возросло с 61% до 70%. Если станции расположены в одном широтном поясе, то восстановление удастся делать с точностью превышающей 70%.

Предложенный способ восстановления информации с помощью ИНС может восполнять пробелы в записях отдельных обсерваторий мировой сети магнитных станций.

Коррекция индексов авроральных электроджетов

Известно, что на данный момент функционируют только 8 полярных магнитных станций для вычисления индексов полярной активности (AE, AU, AL). Поэтому возникают проблемы с проведением магнитосферных исследований, по традиции выполнявшихся на базе классического набора

станций. Стало невозможным применять разработанные соотношения между индексами AE, AU, AL и важными параметрами энергетики магнитосферы. Метод ИНС успешно применен (Рис. 4) для коррекции полярных индексов, рассчитываемых в настоящее время по данным с 8 станций, к классическим индексам, рассчитывавшихся ранее по данным с 12 обсерваторий. Исследована возможность улучшения коррекции индексов дополнением во входные величины ИНС ПСВ. Также разработана методика восстановления полярных индексов с привлечением данных только о ПСВ.

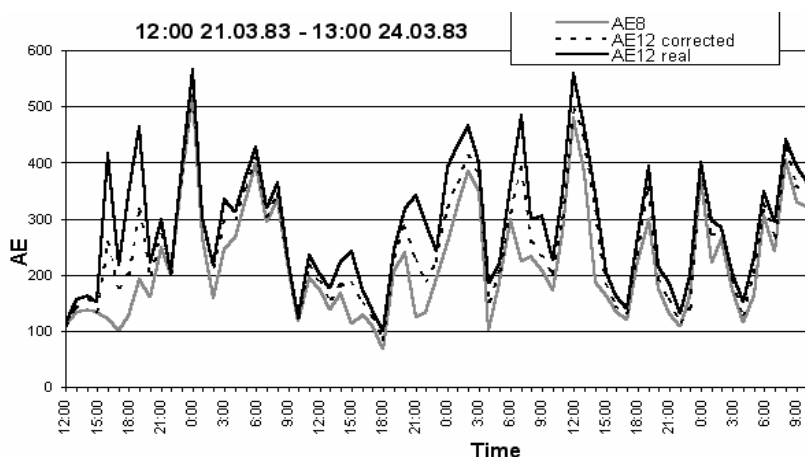


Рис. 5. Временные зависимости нормированных реального AE_{12} (черная линия) откорректированного AE (чёрная штриховая линия) и восьми станционного индекса AE_8 (серая линия) на части изучаемого интервала.

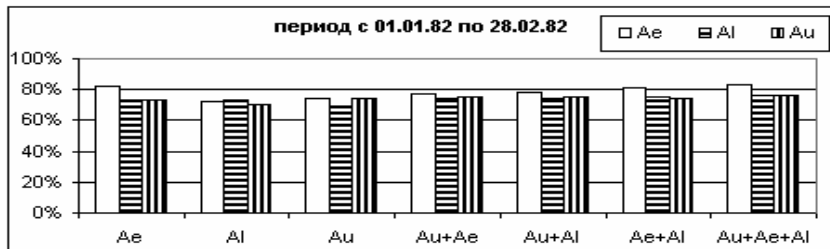
В ходе выполнения исследования были получены следующие основные результаты:

- 1). Наилучшая эффективность (95%) достигнута для коррекции индекса AE по AE_8 для летнего периода. Временные зависимости нормированных реального AE_{12} , откорректированного AE и восьми станционного индекса AE_8 на части изучаемого интервала приведены на Рис. 5. Наиболее благоприятным для коррекции является индекс AE, как в летнее, так и в зимнее время (95% и 82%, соответственно).
- 2). Эффективность коррекции любых индексов в летнее время всегда выше, чем в зимнее (Рис. 6).
- 3). Использование в качестве дополнительных входных величин ПСВ приводит к относительному улучшению эффективности коррекции

геомагнитных индексов с 74% (по комбинации AE_6 , AL_6 , AU_6) до 79% (по комбинации AE_6 , AL_6 , AU_6 , дополненной B, Bz, V).

- 4). При восстановлении 12 станционных классических полярных индексов только по ПСВ достигнута эффективность восстановления 69 % для AE

а)



б)

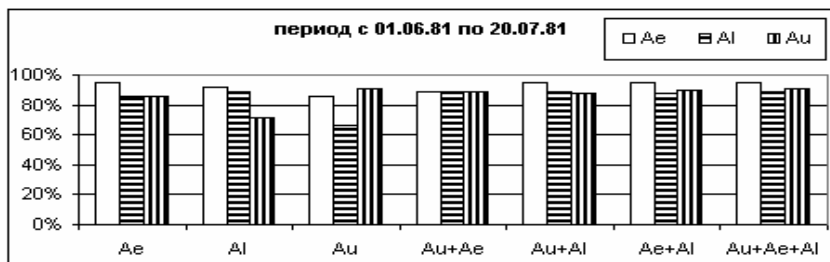


Рис. 6. Диаграммы результатов исследования сезонной зависимости коррекции индексов по восьми станционным индексам (зима - а, лето - б).

при использовании в качестве входных значений концентрации, скорости, модуля вектора межпланетного магнитного поля и его z-компоненты, дополненных единичным пороговым значением.

- 5). Подтверждена наибольшая геоэффективность z-компоненты магнитного поля при получении 12 станционных индексов по шести станционным индексам, дополненных ПСВ, и восстановлении 12 станционных индексов только по параметрам солнечного ветра.

Прогнозирование критической частоты $f_{кр}$ слоя F2

Другой важной прикладной задачей является прогнозирование ионосферных параметров на интервалы от 30 мин до нескольких часов, что используется для повышения надежности КВ радиосвязи. При решении задачи выясняется, что совершенствование физических моделей часто не приводит к желаемому результату. Кроме того, существенен учет

ионосферно-магнитосферного взаимодействия, обусловленного особенностями солнечно-земных связей, которые обычно не принимаются во внимание. В данной работе [5] разработана методика прогнозирования значений f_{kr} с использованием ИНС. Работоспособность метода продемонстрирована на массиве - февраль-март 2002 г. - получасовых значений f_{kr} для станции вертикального зондирования Chilton (Англия). Для реализации метода ИНС использовался специализированный пакет Neural Network Toolbox, являющийся прикладным математическим расширением системы MATLAB 6. Для решения поставленной задачи применялись различные архитектуры ИНС и алгоритма обучения, обрабатывались и использовались разные комбинации из обучающих последовательностей. В число входных данных, кроме самой последовательности f_{kr} и ее характеристик, были включены некоторые параметры солнечного ветра (ПСВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и данные по индексам магнитосферной возмущенности. Для обучения анализируемых ИНС использовались данные за февраль – март 2002 года, представляющие собой последовательности $f_{kr}(t)$, $\langle f_{kr}(t) \rangle$ (с устраненным сезонным эффектом), производной от $f_{kr}(t)$, ПСВ - скорость солнечного ветра и концентрация частиц; параметры ММП - модуль поля, z-компонента поля в SE системе координат; индексы Dst (геомагнитной активности), K_p (планетарной геомагнитной активности), PC (магнитной активности в полярных каспах). Всего было задействовано 2494 значения для каждого параметра с дискретизацией в 30 минут. Обучение сети проводилось по 1661 значению (для каждого входного параметра), а прогнозирование предполагало получение на выходе ИНС значений $f_{kr}(t+1)$, т.е. на час вперед, для оставшихся 833 значений, являвшимися тестовыми.

Основной методической целью исследования было создавать сети с как можно меньшим количеством связей, чтобы исключить эффект «запоминания» и сделать процесс прогнозирования более интеллектуальным. Во всех случаях применялся универсальный алгоритм обучения Левенберга-Марквардта.

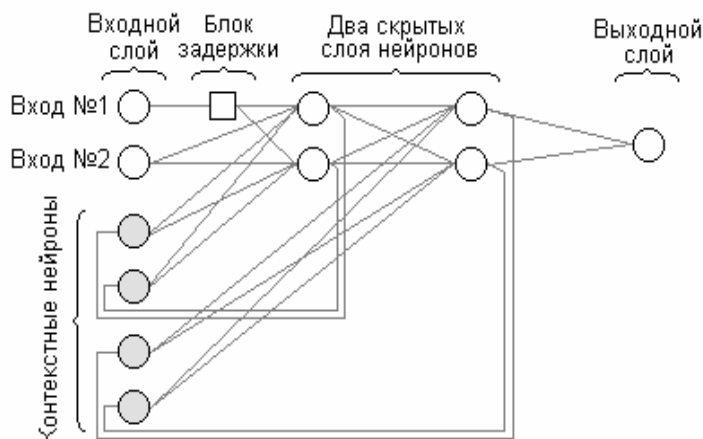


Рис. 7. Пример архитектуры сети с добавленным блоком динамической задержки входного сигнала на одном из входов сети.

Для «непрогретой» двухслойной сети с обратным распространением ошибки и обратными связями Элмана (Рис. 7), при подаче на вход $f_{кр}(t)$ и производной от $f_{кр}(t)$, общая эффективность прогноза для тестовой последовательности составила $PE=92\%$ и коэффициент корреляции $R=0,96$. Та же самая ИНС при подаче на вход $f_{кр}(t)$ и одного из параметров ММП или ПСВ с задержкой в 2,5 часа (с помощью блока задержки) выполняет прогноз с общей эффективностью $PE=93\%$ и коэффициентом корреляции $R=0,97$.

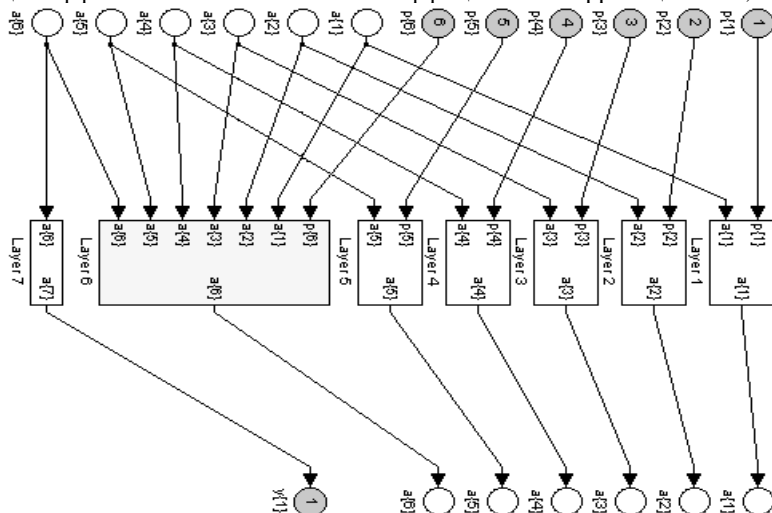


Рис. 8. Шестислойная ИНС с преимущественным выделением слоя.

13

Сопоставление прогнозируемой последовательности с реальным поведением критической частоты на анализируемом тестовом интервале представлено на Рис. 10.

Понижение точности прогноза в ночные и вечерние часы можно объяснить особенностью поведения ионосферного слоя F2 – в это время меняется его электронная концентрация и происходит перестройка ионосферы, зависящая от уровня солнечного освещения.

Космическая классификация геомагнитной активности

Существующие в настоящее время типы классификации геомагнитной активности по морфологическим признакам основаны на данных, полученных только по наземным записям магнитного поля. Другим недостатком является лишь косвенный учет предшествующих явлений космической погоды. Задачей, имеющей отношение к созданию новых стандартов цифровой оценки геомагнитной активности, является выполненная разработка классификации, учитывающей истинную космическую причину геомагнитных возмущений на Земле. В среде MATLAB была создана группа программ ИНС и обработки данных и проведена классификация Dst возмущений методом самообучающихся ИНС – в первой группе экспериментов – слоем Кохонена, во второй – картой Кохонена. При этом ставилась задача разделения возмущений на классы в зависимости от реальной причины их возникновения.

Архитектуры выбранных самообучающихся ИНС аналогичны (Рис.11), но алгоритмы их обучения значительно отличаются. Архитектура слоя Кохонена и алгоритм его настройки предполагает, что для каждого входного вектора будет активизирован лишь один нейрон (нейрон-победитель). В своей простейшей форме слой Кохонена функционирует по правилу «победитель получает все». Для данного входного вектора один и только один нейрон Кохонена выдает логическую единицу, все остальные выдают ноль. Слой Кохонена классифицирует входные векторы в группы схожих векторов. Это достигается с помощью такой подстройки весов и смещений, что близкие входные векторы активизируют один и тот же нейрон данного слоя. Слой Кохонена обучается без учителя. В результате обучения слой приобретает способность разделять несхожие входные векторы. Какой именно нейрон будет активизироваться при предъявлении конкретного входного сигнала, заранее трудно предсказать

Повышение точности отображений входных сигналов и, как следствие, возрастание точности в задаче классификации может быть достигнуто применением другого типа сетей – самообучающихся карт Кохонена. Её главное отличие от слоя Кохонена проявляется в том, что при работе активизируется не один нейрон-победитель, но еще и группа его ближайших соседей. Как и в случае слоя Кохонена, число предполагаемых классов

определяется количеством нейронов. Отличие состоит лишь в том, что нейроны не имеют смещений, а алгоритм обучения предполагает определение группы ближайших соседей с нейроном-победителем для совместной корректировки их весов в процессе обучения.

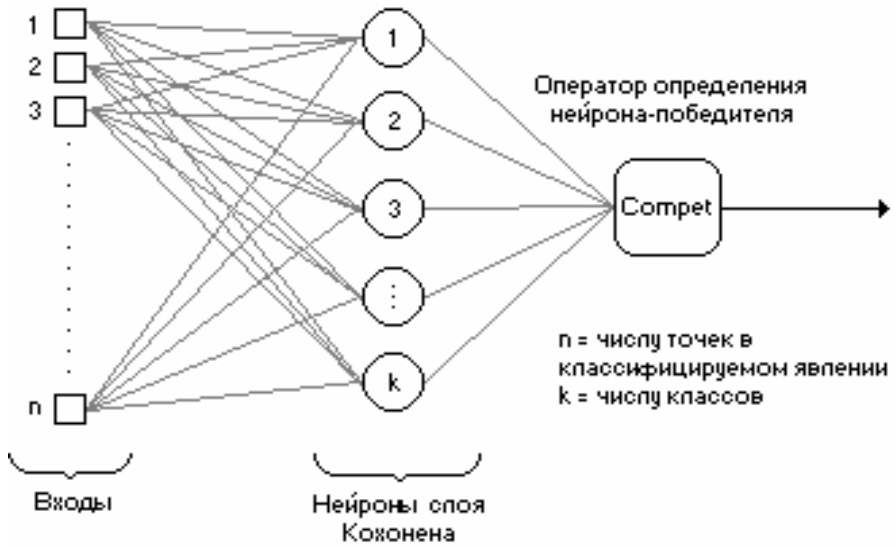


Рис. 11. Архитектура самоорганизующейся ИНС Кохонена.

В результате удалось выделить два основных класса комплексов возмущенных параметров, характеризующих рассматриваемые события, каждый из которых отвечает соответствующей глобальной магнитосферной ситуации. Первый класс - «Бухты» (Рис. 12а), обусловленные кольцевым током и вызванные повышением отрицательных значений B_z -компоненты межпланетного магнитного поля ниже уровня 5-7 нТл, что способствует понижению значений индекса Dst. Выяснилось, что чем ниже отрицательные значения B_z , тем интенсивнее снижается значение Dst. ИНС с большой точностью выявляют этот экспериментальный факт. Это свидетельствует о существовании реальных причинно-следственных связях между явлениями в околоземном космическом пространстве и глобальными изменениями в магнитном поле Земли.

Второй класс - «Поднятия» (Рис.12б) значений индекса Dst, вызванные параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля B_z , N , и V , меняющимися вблизи своих фоновых значений. Повышение горизонтальной составляющей геомагнитного поля обуславливается токовой системой, возникающей на магнитопаузе во время увеличения давления солнечного ветра. ИНС без привлечения сложного аналитического описания такого сценария смогла после обучения математически моделировать этот процесс.

Так же как и в предыдущем случае, нейронные схемы Кохонена выявили и эту закономерность, что лишний раз подтверждает эффективность их использования в геофизических приложениях.

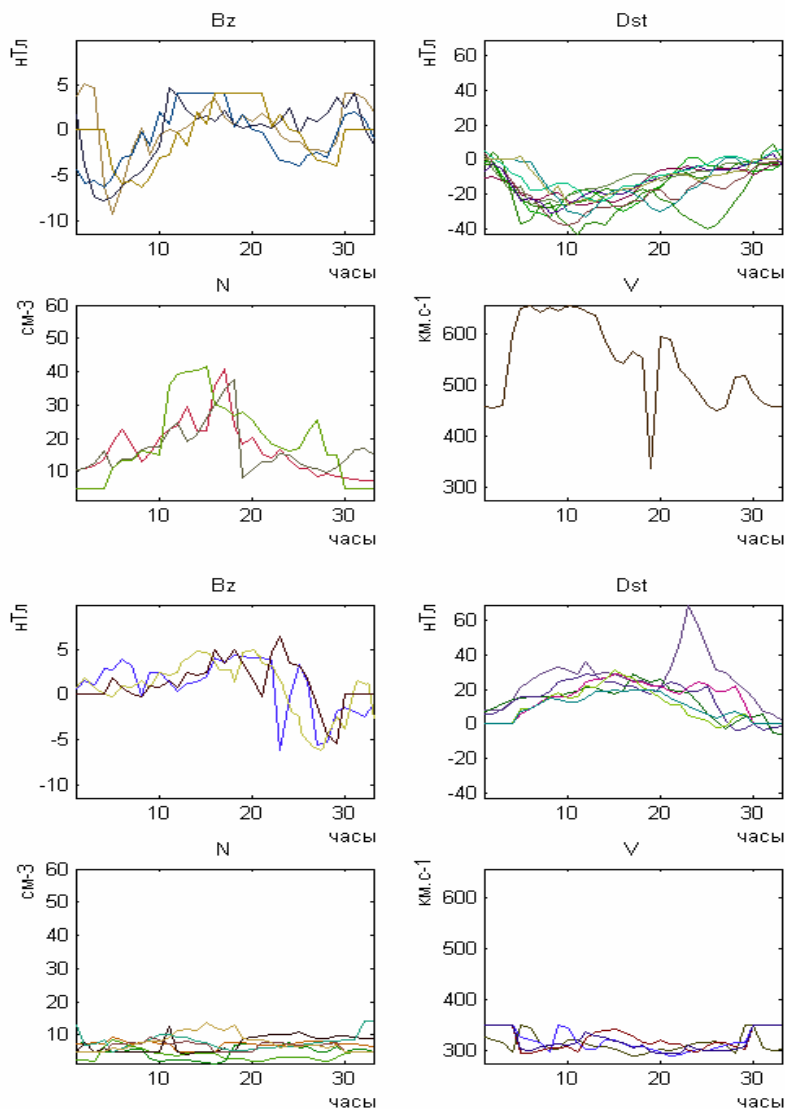


Рис. 12. Два класса в возмущениях Dst, соответствующих комплексам возмущенных параметров (левая и правая группа рисунков).

Отмечено также существование нескольких других классов, отличающихся от основных меньшим числом параллельных классифицируемых параметров. Часть таких классов может быть объединена с основными. Другая часть независима и нуждается в дальнейшем изучении.

Выполненная в работе классификация геомагнитных возмущений перспективна для создания на базе методики ИНС новых стандартов, касающихся описания явлений космической погоды. Подтверждение физической классификации альтернативным методом ИНС несет с собой все возможности, предоставляемые системами "on line", и позволяет автоматизировать процесс классификации. Подобный подход к классификации открывает новые возможности прогнозирования магнитных бурь.

В ы в о д ы

Таким образом, выполненные исследования продемонстрировали высокое качество решения ряда прикладных задач. Ценность методики также и в том, что во всех случаях ИНС позволяют решать поставленные задачи универсальным автоматизированным способом по непрерывным спутниковым данным, магнитным измерениям на земной поверхности и результатам зондирования ионосферы. В настоящее время такие данные можно получать в режиме «on line». В перспективе можно создать вычислительный комплекс, включающий в себя ИНС и сервис, позволяющий с высокой надежностью в автоматическом режиме выполнять необходимую работу с учетом изменяющейся солнечно-геомагнитной обстановки. Применение методики ИНС превращает прогнозирование требуемой величины из некоторой формальной, заранее установленной с какой-то точностью, операции в интеллектуальный процесс. Он непрерывно подстраивается под изменяющиеся солнечно-земные условия, учитывая при этом все особенности предыстории прогнозируемого процесса.

Л и т е р а т у р а

1. *Бархатов Н.А., Беллюстин Н.С., Левитин А.Е. и др.* Сравнение эффективности предсказания индекса геомагнитной активности Dst искусственными нейронными сетями. // Изв. ВУЗов "Радиофизика". 2000. Т. 43. N 5. С.385 - 394.
2. *Бархатов Н.А., Королев А.В., Пономарев С.М. и др.* Долгосрочное прогнозирование индексов солнечной активности методом искусственных нейронных сетей. Известия ВУЗов "Радиофизика". 2001. Т. 44. N 9. С. 806 - 814.
3. *Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Сахаров С.Ю.* Метод искусственных нейронных сетей как способ восстановления пробелов в записях отдельных магнитных обсерваторий по данным других станций. // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42. N 2. С. 195 - 198.

4. *Бархатов Н.А., Левитин А.Е., Рябкова Г.А.* Искусственные нейронные сети для прогнозирования индексов геомагнитной активности по параметрам околоземного космического пространства. В сб. "Солнечно-земная физика", вып.2 (115), Иркутск, 2002. С. 104 - 106.
5. *Бархатов Н.А., Валов В.А., Макаров А.В. и др.* Метод искусственных нейронных сетей и его применение к прогнозированию ионосферного КВ радиоканала. Труды IX Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация и связь", 22-24 апреля 2003 г., Воронеж, Том III. С. 1853-1864.