

ДЕМОНСТРАЦИЯ ОТРАЖЕНИЯ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Н.А. Бархатов¹, В.Г. Воробьев², С.Е. Ревунов¹, О.И. Ягодкина², А.Б. Виноградов¹

¹Нижегородский Государственный Педагогический Университет им. К. Минина,
г. Нижний Новгород

²Полярный геофизический институт, г. Апатиты
e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

Аннотация. Предложен интеллектуальный алгоритм типа искусственной нейронной сети (ИНС) для восстановления динамики AL индекса, характеризующего развитие суббури. Используемый алгоритм учитывает особенности загрузки хвоста магнитосферы кинетической энергией солнечного ветра и связанные с этим суббуревые процессы в авроральной магнитосфере. Применяемая нейросетевая архитектура построена по принципу Элмана, что позволяет реализовывать внутреннюю память о предыстории развития причинно-следственных связей, отвечающих физической модели формирования суббури. Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на численных нейросетевых экспериментах по восстановлению динамики AL индекса по параметрам солнечного ветра и ММП в периоды развития суббурь различной интенсивности.

1. Введение

Актуальные проблемы современной гелиогеофизики связаны с решением задач надежного и своевременного прогнозирования геомагнитных возмущений с применением данных группировки патрульных космических аппаратов. Как показывают данные многочисленных наблюдений, в периоды возмущенного солнечного ветра в полярных областях наблюдается комплекс геофизических явлений известных как магнитосферная суббурия. Ключевым событием начала подготовительной фазы суббури, как правило, является поворот вектора межпланетного магнитного поля к югу. Полное понимание механизма суббури еще впереди, но достоверно известно, что началом активной фазы суббури является взрывной переход накопленной потенциальной энергии искаженного магнитного поля полярной магнитосферы в кинетическую энергию заряженных частиц, заполняющих радиационные пояса и ионизирующих ионосферу. Накопление энергии в магнитосфере в период подготовительной фазы суббури обеспечивается усилением крупномасштабного западного электрического поля конвекции поперек хвоста магнитосферы. Этот процесс возможен только при условии непрерывного поступления в магнитосферу кинетической энергии частиц ($N \cdot V^2$) солнечного ветра на интервале подготовительной фазы суббури (плотности N – концентрация частиц, V – скорость потока солнечного ветра). Постепенное накопление энергии невозможно учесть на основе мгновенных значений (B_z, N, V) [Лазутин, 2001]. В связи с этим обстоятельством нами предлагается использование интегрального параметра в виде кумулятивной суммы $\sum [N \cdot V^2]$ наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра для описания интенсификации суббуревых процессов.

Современная гелиогеофизика ввиду большого числа параметров, участвующих в магнитосферных процессах, и неоднозначности их связи, оперирует многокритериальными математическими моделями. В основном эти модели предназначены для описания крупномасштабных физических явлений, к которым применимы уравнения магнитной гидродинамики (МГД). В МГД уравнениях используются мгновенные значения входных параметров, поэтому такие модели крайне затруднительно использовать для восстановления или прогнозирования данных, поскольку они не принимают во внимание предысторию происходящих процессов. Применяемое в настоящем исследовании нейросетевое моделирование позволяет учесть многокритериальные причинно-следственные связи и динамику предшествующих геофизических процессов. Создаваемый алгоритм описания процессов формирования и развития суббури с помощью интеллектуального инструмента в виде искусственной нейронной сети типа Элмана позволяет восстанавливать значения индекса западной полярной электроструи (AL). В качестве входных данных использована динамика текущих параметров солнечного ветра с учетом их интегральных характеристик. Учет интегральных характеристик дополнит возможности ИНС по реализации памяти о предыстории моделируемого процесса.

2. Применяемые данные и описание инструмента

В настоящем исследовании применена нейронная сеть Элмана, содержащая дополнительный слой нейронов (контекстные нейроны), обеспечивающий «внутреннюю память» о предыстории восстанавливаемого динамического процесса [Бархатов и Ревунов, 2010]. Разрабатываемая ИНС относится к классу так называемых рекуррентных сетей с обратным распространением ошибки и включенной петлей обратной связи, исходящей из скрытого слоя (см. рис. 1). Большинство решаемых прогностических задач или задач по восстановлению рядов данных доводятся до конечного результата благодаря использованию именно таких нейронных сетей [Barkhatov et al., 2004].

В качестве входных последовательностей нейросетевой модели, использованы два параметра – Vz компонента ММП и интегральный параметр $\sum[N*V^2]$, учитывающий предысторию процесса накачки кинетической энергии ветра в магнитосферу в течение 2-3 часов в рамках 60 минутных окон (здесь N и V – плотность и скорость солнечного ветра, соответственно). Единственный выходной нейрон генерирует последовательность восстанавливаемых значений AL индекса.

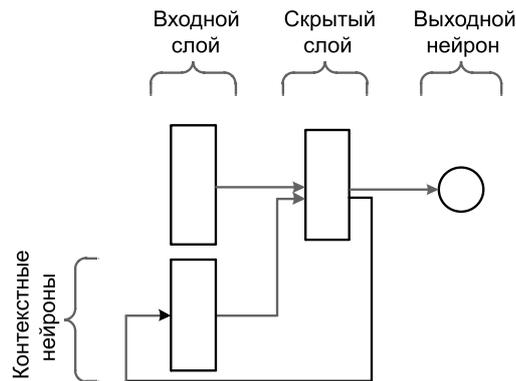


Рисунок 1. Применяемая архитектура ИНС Элмана.

Объективная оценка качества восстановления AL индекса выполнялась путем вычисления классического коэффициента корреляции R и коэффициента эффективности восстановления PE между реальными (целевыми) и сгенерированными нейронной сетью значениями. Эффективность восстановления PE вычислялась по формуле [Barkhatov et al., 2004]:

$$PE = \left(1 - \frac{\sum_{\mu=1}^N (T^{\mu} - O^{\mu})^2}{\sum_{\mu=1}^N (T^{\mu} - \langle T \rangle)^2} \right) \cdot 100\%, \quad \mu = 1, 2, \dots, N,$$

где T^{μ} – целевое (реально зарегистрированное) значение для сопоставления с выходом для μ -го примера во входной последовательности, O^{μ} – значение μ -го выхода ИНС для μ -го примера входной последовательности, $\langle T \rangle$ – среднее по всем целевым значениям выхода ИНС, N – число точек целевого процесса. Таким образом, под эффективностью восстановления понимается единица, уменьшенная на величину средней относительной вариации, которая в свою очередь является отношением среднеквадратичной ошибки к дисперсии целевого процесса.

Численные эксперименты выполнялись на 1-минутных данных AL, Vz, N, V, полученных с узла CDAWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) в интервалы магнитосферных бурь различной интенсивности, зарегистрированных по показаниям AL индекса в ноябре-январе 1995-2013 гг. Условия отбора событий следующие: 1) временной интервал от предыдущего возмущения не менее 3-х часов; 2) диапазон амплитуд индекса AL должен соответствовать критерию $250 \text{ nT} < |AL| < 1500 \text{ nT}$; 3) длительность суббури < 3 часов; 4) критерий окончания возмущения время UT, когда возмущение $|AL| < 0.2 \max|AL|$.

3. Результаты нейросетевых численных экспериментов по восстановлению динамики AL индекса

Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на численных нейросетевых экспериментах по восстановлению динамики AL-индекса по параметрам солнечного ветра и ММП в периоды развития

суббурь. Показана важность учета интегрального параметра $\sum[N*V^2]$. Для численных экспериментов использованы данные на временных интервалах продолжительностью 8 часов, включающих в себя периоды 74 изолированных магнитосферных суббурь. При этом обучающий массив включал 70 событий, а тестовый массив содержал 4 события. С целью минимизации эффекта «запоминания» последнего обучающего образца предлагаемые пакеты данных нормировались и подавались на вход ИНС в случайном порядке. Таким образом, тестирование качества настройки ИНС всегда выполнялось на пакетах данных, исключенных из обучающего массива. На рис. 2а, 3а, 4а представлены примеры восстановления индекса AL по мгновенным значениям, а на рис. 2б, 3б, 4б индекс AL восстановлен с учетом интегрального параметра. В подрисуночных подписях указаны значения линейных классических коэффициентов корреляции (R) между уровнями официального и восстановленного индекса AL. Для объективной оценки качества работы ИНС по восстановлению AL была вычислена и эффективность восстановления (PE).

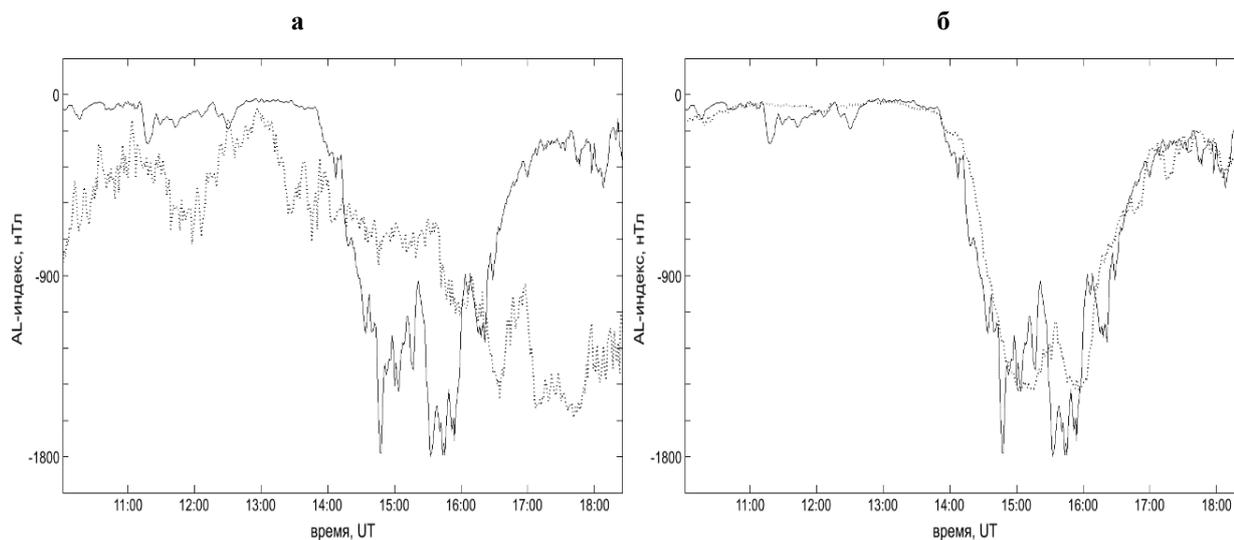


Рисунок 2. Результат восстановления индекса AL во время суббури 07.01.2005: **а** - без интегрального параметра по мгновенным значениям (R=0.27, PE=0%), **б** - с применением интегрального параметра (R=0.92, PE=74%). Сплошная линия – реальные данные, пунктир – ответ ИНС.

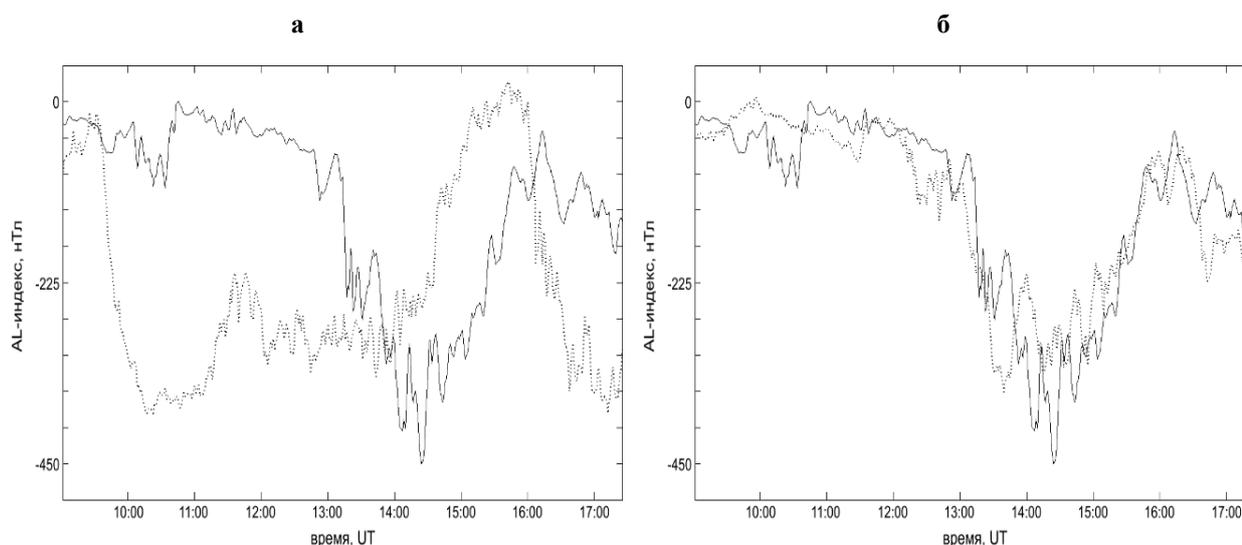


Рисунок 3. Результат восстановления индекса AL во время суббури 29.11.2007: **а** - без интегрального параметра по мгновенным значениям (R=0.12, PE=0%), **б** - с применением интегрального параметра (R=0.92, PE=75%). Сплошная линия – реальные данные, пунктир – ответ ИНС.

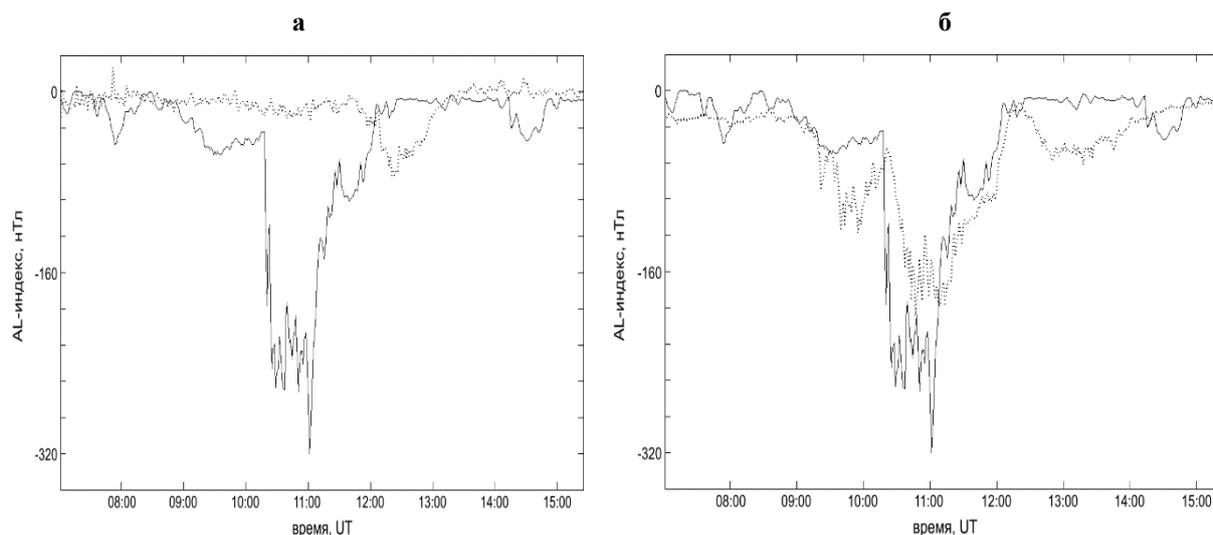


Рисунок 4. Результат восстановления индекса AL во время суббури 02.11.2007: **а** - без интегрального параметра по мгновенным значениям ($R=0.46$, $PE=6\%$), **б** - с применением интегрального параметра ($R=0.77$, $PE=55\%$). Сплошная линия – реальные данные, пунктир – ответ ИНС.

4. Заключение

Созданный нами инструмент при учете физических явлений, приводящих к суббуре, оказался вполне интеллектуальным и эффективным. Его возможности по восстановлению динамики AL индекса или его краткосрочного прогнозирования при использовании данных патрульного космического аппарата подтверждены объективными оценками путем вычисления классического коэффициента корреляции R и коэффициента эффективности восстановления PE между реальными и сгенерированными нейронной сетью значениями. По нашему мнению, решающим фактором, способным обеспечить качественное восстановление динамики AL индекса, является учет медленной загрузки авроральной магнитосферы кинетической энергией солнечного ветра. Дальнейшее улучшение результатов восстановления возможно при использовании предыстории AL, увеличении числа входных данных, предварительной обработки и усовершенствовании архитектуры ИНС.

Вместе с тем, предлагаемое восстановление AL-индекса с использованием интегрального параметра создает причинно-следственные ограничения на возможности прогнозирования скоротечной суббуревой активности. Дело в том, что прогноз на основе накопления «исторических» данных, которые аккумулирует в себе параметр $\sum[N*V^2]$, не может быть выполнен на временном интервале, превышающем время переноса потока солнечного ветра от патрульного космического аппарата (КА) до магнитосферы. Для объективного учета причинно-следственных связей параметров потока в солнечном ветре и откликом магнитосферы в форме динамики AL индекса мы не можем слишком углубляться в историю измеренных на КА данных, поскольку иначе возникает высокая вероятность ошибочного «прогноза» уже развивающейся суббури.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №16-05-00608 и №16-35-00084).

Литература

1. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Искусственные нейронные сети в задачах солнечно-земной физики // Монография. Изд. «Поволжье». 2010. 407 с.
2. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Uryadov V.P. Forecasting of the critical frequency of the ionosphere F2 layer by the method of artificial neural networks // Int. J. Geomag. Aeron. GI2010, DOI:10.1029/2004GI000065. 2004.
3. Лазутин Л.Л. Авроральная магнитосфера: ст. сб. // Л.Л. Лазутин, под ред. проф. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова // Модель Космоса, 2001. Т. 1. С. 547-578
4. Физика околоземного космического пространства, в 3 томах // Ю.П. Мальцев, А.Г. Яхнин, В.Г. Воробьев, Л.Л. Лазутин, С.В. Леонтьев, Н.Н. Богданов, Е.Д. Терещенко, М.О. Козлова, В.Д. Терещенко, В.А. Терещенко, А.А. Намгаладзе, Р.Ю. Юрик, Ю.Д. Свердлов – Апатиты. Изд. Кольского научного центра РАН. 2000. 706 с.