

Исследование возможностей нейросетевого прогнозирования состояния внешнего радиационного пояса Земли по данным космических экспериментов

Мягкова И. Н., Доленко С. А., Широкий В. Р.
НИИЯФ МГУ, Москва, Россия
e-mail:irina@srd.sinp.msu.ru

Многочисленные космические эксперименты показывают, что внешний радиационный пояс Земли (РПЗ) представляет собой сложную динамическую систему, параметры которой - интенсивность, положение границ и максимума - могут очень сильно изменяться в зависимости от вариаций компонент межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ), а также от геомагнитной активности. Прогнозирование временного ряда потока релятивистских электронов (РЭ) во внешнем радиационном поясе Земли сталкивается с проблемами, вызванными сложностью и нелинейностью системы "солнечный ветер - магнитосфера Земли".

Несмотря на многолетние исследования внешнего РПЗ, которые дали обширный экспериментальный материал, и на многочисленные эмпирические и численные модели ускорения электронов в магнитосфере Земли до релятивистских энергий (см., например, обзор [1]), на сегодняшний день механизмы формирования внешнего РПЗ во многом остаются невыясненными.

Известно, что источниками возмущений магнитосферы Земли являются корональные выбросы массы (КВМ), достигающие орбиты Земли, и высокоскоростные потоки СВ. Также необходимым, а возможно и достаточным, условием возникновения геомагнитных возмущений является присутствие южной (отрицательной) компоненты ММП V_z , при наличии которой возможна передача энергии от солнечного ветра в магнитосферу [2].

Также известно, что геомагнитные бури (возмущения) оказывают существенное влияние на радиационное состояние околоземного космического пространства (ОКП), поскольку после них поток РЭ внешнего РПЗ, как правило, возрастает на порядок и более (например, [3-4] и ссылки там). Экстремально высокие потоки РЭ могут привести к сбоям в электронных микросхемах аппаратуры, находящейся на борту космических аппаратов [5]. Кроме того сильные магнитные бури могут вызывать нарушения в работе телеграфных линий и радиосвязи, трубопроводов, линий электропередач и энергосетей [6].

Таким образом, задача прогнозирования как магнитных бурь, так и потоков РЭ во внешнем РПЗ является актуальной. В настоящей работе исследуются результаты прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) потока РЭ внешнего РПЗ, а также геомагнитных индексов Dst и Kp. Прогнозы выполнены на основе многомерных временных рядов, включающих в себя значения прогнозируемых индексов, потоков РЭ, параметров СВ и ММП, полученные за последние сутки с временным разрешением в один час.

Различные методики прогнозирования Dst-индекса, в частности, рассмотрены в работах [7-8], прогнозирования потока РЭ внешнего РПЗ - в работах [9,10].

В настоящей работе использовались данные СВ и ММП с КА ACE (Advanced Composition Explorer), находящегося в точке Лагранжа L1, полученные с приборов SWEPAM и MAG, соответственно [11]. Так как процессы в цепи "ММП - СВ - магнитосфера Земли" описываются при помощи многомерных временных рядов, включающих в себя параметры ММП - модуль вектора ММП и три его компоненты; параметры СВ - скорость, плотность, температуру плазмы СВ, а также геомагнитные индексы - Dst и Kp, получаемые на странице предоставления данных по геомагнетизму (Geomagnetic Data Service) [12], и

поток РЭ внешнего РПЗ (значения потока электронов измерены в экспериментах на космических аппаратах (КА) серии GOES [13]), для всех трёх величин нами использовались те же самые входные данные, за исключением того, что значения потоков РЭ не использовались при прогнозировании геомагнитных индексов, поскольку вариации внешнего РПЗ на геомагнитные возмущения не влияют.

Для прогнозирования индексов Dst и Kp, а также потоков РЭ внешнего РПЗ нами использовалось погружение многомерного временного ряда следующих параметров: модуль вектора ММП $|B|$ и три его компоненты Vx, Vy, Vz в системе GSM, скорость v и плотность n_p солнечного ветра (СВ), сами геомагнитные индексы Dst и Kp и поток электронов внешнего РПЗ, так, как это было сделано в работах [14, 15]. На вход ИНС подавались также значения синуса и косинуса с суточным и годовым периодами, что позволяло учитывать рекуррентные изменения прогнозируемых величин, связанные с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца.

В качестве обучающей выборки использовался массив данных с ноября 1997 года (начало поступления данных с ACE) по март 2015 г. Обучающая выборка была разбита на тренировочный, тестовый и экзаменационный наборы данных. Тренировочный набор использовался для подстройки весов при обучении ИНС, тестовый набор – для периодической проверки в процессе обучения с целью предотвращения переучивания, экзаменационный – для независимой оценки полученных результатов. Данные с ноября 1997 г. по конец 2009 г. включительно использовались для тренировочного и тестового наборов, на которые они разбивались случайным образом в соотношении 75% к 25%. Данные с 2010 по 2015 годы использовались в качестве экзаменационного набора.

Для всех нейросетевых моделей, представленных в настоящей работе, применялся многослойный перцептрон с единственным скрытым слоем из 16 нейронов. Предыдущие исследования показали, что использование большего количества слоёв и/или нейронов не приводит к улучшению результатов прогнозирования. В качестве передаточной функции для всех нейронов использовалась логистическая. ИНС обучалась по алгоритму обратного распространения ошибки со скоростью 0.01 и моментом 0.5. Остановка производилась в случае, если в течение 500 эпох не улучшался результат работы сети на тестовом наборе.

Для каждой модели было обучено по 5 сетей с различными наборами начальных весов, ответы усреднялись, и для усредненного результата считались оценки качества работы модели. Это означает использование простейшего комитета однородных прогнозирующих моделей. Для обеспечения максимальной эффективности использования вычислительных мощностей использовалось программное обеспечение [16].

В данной работе для оценки и сравнения качества работы моделей использовались следующие статистические показатели, характеризующие отклонение прогнозов от истинных значений прогнозируемых величин: коэффициент корреляции r , коэффициент множественной детерминации R^2 ; корень из среднего квадрата ошибки – среднеквадратичная ошибка, СКО. Они представлены на рисунке 1 для разных горизонтов прогнозирования. Также выполнено сравнение с результатами тривиальных моделей, для которых прогнозируемое значение равно текущему.

Для индекса Kp прогнозировалось не само значение индекса, а его целочисленное усреднённое значение $Kp \cdot 10$, часто используемое на практике для удобства записи. Так как динамический диапазон значений потока электронов составлял более 6 порядков величины, прогнозировался десятичный логарифм величины потока $\lg J_e$.

Из рисунка 1 видно, что качество прогнозов, как и следовало ожидать, монотонно снижается с увеличением горизонта прогнозирования для всех трёх прогнозируемых величин. Видно, что более резкое снижение качества ИНС прогнозирования при росте горизонта прогнозирования наблюдается для геомагнитных индексов, особенно для Kp, а вот качество прогнозирования потоков электронов при увеличении горизонта прогноза от 1 часа

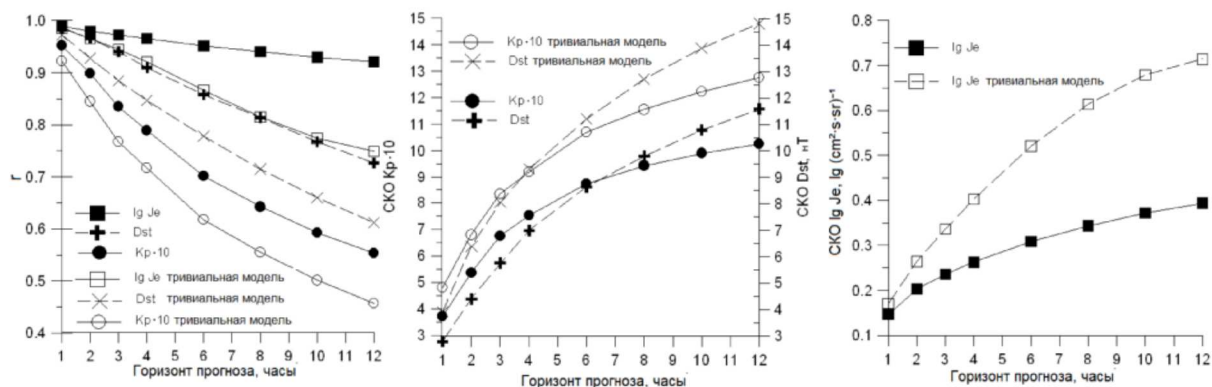


Рис. 1. Зависимость показателей качества прогнозирования Dst, Кр-индекса и логарифма потока релятивистских электронов внешнего РПЗ от горизонта прогноза

до 12 часов ухудшается незначительно. Это подтверждает предположение о том, что характерное время развития процессов в магнитосфере Земли, которые влияют на вариации потока электронов внешнего РПЗ, значительно больше, чем характерное время процессов развития геомагнитного возмущения.

На рисунке 2 в качестве примера прогнозов логарифма потока РЭ внешнего РПЗ с разными горизонтами приведены прогнозы, выполненные при помощи ИНС на час (1), три (3), шесть (6) и десять часов (10) с 10 по 26 марта 2015 года. Даже при визуальном анализе видно, что тенденции ухудшения прогноза, о которых говорилось выше, наблюдаются тем сильнее, чем больше горизонт прогноза.

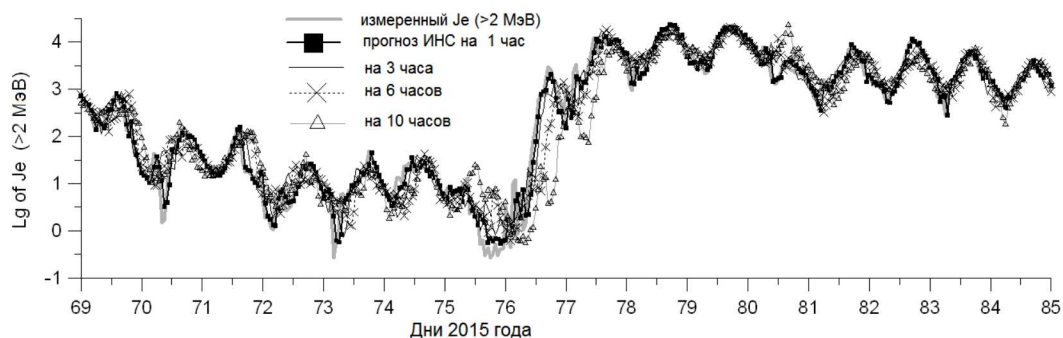


Рис. 2. Пример прогноз временного ряда логарифма потоков РЭ ВРПЗ на сутки, трое, шесть и десять суток вперед с 10 по 26 марта 2015 года

Таким образом, в выполненной работе показано, что с увеличением горизонта прогнозирования всех трёх рассматриваемых величин качество прогноза монотонно снижается, однако при любом горизонте лучше всего прогнозируется значение потока электронов, а хуже всего – значение геомагнитного индекса Кр. Подобные различия объяснены отличием в характерном времени развития процессов в магнитосфере Земли, влияющих на потоки электронов внешнего РПЗ и на геомагнитную обстановку, а также физическими различиями между индексами Dst и Кр. Рассматриваются направления дальнейших исследований с целью увеличения горизонта прогноза и улучшения качества прогнозирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 14-01-00293-а.

Литература

1. Friedel, R.H., Reeves W.G.P., Obara, T. // Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere – A review. *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* – 2002. – V. 64. – P. 265–283.

2. Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F. et.al. Origin of interplanetary southward magnetic fields response for major magnetic storms near solar maximum (1978-1979) // J. Geophys. Res. 1988. – V.A8. – P. 8519 - 8531.
3. Kataoka R. and Miyoshi Y. Average profiles of the solar wind and outer radiation belt during the extreme flux enhancement of relativistic electrons at geosynchronous orbit // Ann. Geophys. – 2008. – V. 26. – P. 1335-1339.
4. Myagkova I.N., Shugay Yu S., Veselovsky I.S., and Yakovchouk O.S. Comparative analysis of recurrent high-speed solar wind streams influence on the radiation environment of near-earth space in April–July 2010. // Solar System Research. – 2013. – V. 47. – No. 2. – P.141–155. 2013.
5. Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V. et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // Space Weather. – 2005. – V. 3. – No.1. – P. S01001.
6. Лазутин Л.Л. Мировые и полярные магнитные бури. – Москва: МГУ, 2012.
7. Barkhatov N.A. et al. Comparison of efficiency of artificial neural networks for forecasting the geomagnetic activity index Dst. // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2006. – V. 43. – No. 5. – P. 347-355.
8. Pallochia G. et al. Geomagnetic Dst index forecast based on IMF data only. // Ann. Geophys. – 2006. – V. 24. – P. 989–999.
9. Koons, H.C. and Gorney, D.J. A neural network model of the relativistic electron flux at geosynchronous orbit.// J. Geophys. Res. – 1990. – V. 96. – P. 5549–5556.
10. Ling A. G., Ginet G. P., Hilmer R. V., and Perry K. A neural network-based geosynchronous relativistic electron flux forecasting model. // Space Weather. – 2010. – V. 8 (9). – P. S09003.
11. Страница предоставления данных по геомагнетизму Всемирного Центра Данных в Киото (Geomagnetic Data Service). – URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> (дата обращения 07.06.2015)
12. Caltech, Advanced Composition Explorer Science Center.
URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/> (дата обращения 01.06.2015)
13. Сайт проекта GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite).
URL: <http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/> (дата обращения 04.06.2015)
14. Широкий В.Р. Сравнение нейросетевых моделей прогнозирования геомагнитного Dst-индекса на различных наборах данных и сравнение методов оценки качества работы моделей. // XVII Всероссийская научно-техническая конференция "Нейроинформатика-2015" с международным участием. Сборник научных трудов. Ч.2. – С.51-60. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2015.
15. Myagkova I., Dolenko S., Shiroky V., Sentemova N., Persiantsev I. Horizon of Neural Network Prediction of Relativistic Electrons Flux in the Outer Radiation Belt of the Earth. 16th EANN Workshops, September 25-28, 2015, Rhodes Island, Greece. ACM Proceedings, 2015, article No.9.
16. Tange O. GNU Parallel - The Command-Line Power Tool // ;login: The USENIX Magazin. – 2011. – P. 42-47.