

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТОКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ

© 2017 г. И. Н. Мягкова¹*, С. А. Доленко¹, А. О. Ефиторов¹,
В. Р. Широкий¹, Н. С. Сентемова²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет, г. Москва, Россия

*e-mail: irina@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 31.03.2016 г.

В работе исследуются возможности прогнозирования временного ряда потока релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, измеренным в точке либрации, и значениям геомагнитных индексов. Используются различные адаптивные методы, а именно, искусственные нейронные сети, метод группового учета аргументов и метод проекций на латентные структуры. Сравнение показателей качества прогнозов с горизонтом от одного до 12 ч между собой и с прогнозом тривиальной модели показало, что лучший результат продемонстрировало среднее значение ответов трех нейронных сетей, тренировка которых производилась с различными наборами начальных весов. Результат прогноза с использованием метода группового учета аргументов близок к результату нейронных сетей, а прогноз методом проекций на латентные структуры значительно хуже. Было показано, что с увеличением горизонта прогноза от 1 до 12 ч качество его снижается, но не радикально, что позволяет использовать данные методы для среднесрочного прогнозирования.

DOI: 10.7868/S0016794017010102

1. ВВЕДЕНИЕ

Как известно, внешний радиационный пояс Земли (РПЗ) представляет собой сложную динамическую систему, параметры которой – интенсивность, положение границ и максимума – могут очень сильно меняться в зависимости от вариаций компонент межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ), в особенности от скорости СВ, и от геомагнитной возмущенности. Прогнозирование временного ряда потока релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли сталкивается с проблемами, вызванными сложностью и нелинейностью системы “солнечный ветер–магнитосфера Земли”.

Тем не менее, несмотря на многолетние исследования внешнего РПЗ, давшие богатый экспериментальный материал, и на многочисленные эмпирические и численные модели ускорения магнитосферных электронов (см. например, обзоры Friedel et al. [2002], Shprits et al. [2008]), вплоть до настоящего времени механизмы фор-

мирования внешнего РПЗ во многом остаются невыясненными, и мнения исследователей относительно основной причины (или причин) вариаций потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ расходятся. Также до сих пор не существует общепринятых моделей, позволяющих с достаточной точностью описать поведение потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ.

Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что в формировании внешнего РПЗ играют роль процессы как ускорения, так и рассеяния частиц (потерь). Но проблема, возможно, еще и в том, что одни и те же физические процессы при разных условиях могут вызвать как ускорение, так и рассеяние (так, например, волновая активность в магнитосфере в итоге может приводить как к увеличению, так и к уменьшению популяции релятивистских электронов внешнего РПЗ).

Экспериментально полученная картина вариаций внешнего РПЗ во время магнитных бурь такова. Потоки РЕ падают на главной фазе бури, то

есть “добурево́й” пояс релятивистских электронов внешнего РПЗ значительно ослабляется или даже совсем исчезает [Кузнецов и др., 2007]. Далее, на фазе восстановления магнитной бури интенсивность потоков пояса начинает возрастать (см., например, [Reeves et al., 2003; Turner et al., 2012]). Новый пояс релятивистских электронов начинает формироваться через сутки-двое после резкого увеличения скорости СВ более 450 км/с, вызванного приходом к границе магнитосферы Земли рекуррентного высокоскоростного потока СВ или коронального выброса массы, и возникает новый, зачастую более интенсивный и расположенный ближе к Земле пояс РЭ [O’Brien et al., 2001]. Но следует отметить, что только примерно в 50% умеренных геомагнитных бурь происходит возрастание потоков РЭ выше “добурево́го” уровня (см., например, Friedel et al. [2002]; Reeves et al. [2003]).

Корреляция между потоками релятивистских электронов на геостационарной орбите и скоростью СВ была описана еще в 1979 году в работе [Paulikas and Blake, 1979] и является ключевым экспериментальным фактом, который следует учитывать при прогнозировании потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ.

Важность проблемы динамики релятивистских электронов внешнего РПЗ связана еще и с тем, что на данный момент имеется множество экспериментальных подтверждений негативного влияния космической погоды на работоспособность космических аппаратов (КА) [Iucci et al., 2005; Shprits et al., 2011]. В частности, одну из наиболее серьезных проблем представляют собой резкие возрастания потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ, называемых в англоязычной литературе “электроны-убийцы”, приводящие к единичным сбоям в электронных микросхемах, находящихся на борту КА, например, [Романова и др., 2005]. Прогноз возможных сбоев в работе спутниковых систем, обусловленных их влиянием, позволил бы избежать существенных финансовых потерь. В будущем, в связи с постоянным ростом числа КА и миниатюризацией спутниковой электроники, число отказов, связанных с воздействием возрастаний потоков релятивистских электронов, будет возрастать; поэтому прогнозирование реакции радиационных поясов на изменения потока релятивистских электронов внешнего РПЗ будет становиться все актуальнее.

К проблеме прогнозирования возможны различные подходы. Более распространенным является прогнозирование среднесуточных потоков (флуенсов) релятивистских электронов во внешнем РПЗ. Так, в работе Бейкера с соавторами [Baker et al., 1990] было получено, что интегральные суточные значения потока электронов с

энергией >2 МэВ, регистрируемые на геосинхронной орбите, можно прогнозировать на сутки вперед, используя линейный фильтр со скоростью солнечного ветра в качестве входа. Принципиально такой прогноз потоков релятивистских электронов может создаваться в двух режимах: при использовании скорости СВ, измеряемой на КА ACE в реальном времени, можно получать прогнозы на 1–3 дня вперед, а при использовании в качестве входа скорости СВ, спрогнозированной в соответствии с методом, представленным в работе [Wang et al., 2009], можно расширить горизонт прогноза до 8 дней.

Альтернативным подходом к прогнозированию потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ является использование для прогноза искусственных нейронных сетей (ИНС). Данный подход используется для прогноза среднесуточных потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите в моделях, представленных в работах [Koons and Gorney, 1990; Дегтярев и др., 2009; Ling et al., 2010]. В работе [Koons and Gorney, 1990] прогнозируются значения среднесуточных потоков электронов на сутки вперед, в работе [Ling et al., 2010] — от суток до трех. В обоих случаях входными данными для ИНС являются исторические значения потока электронов и планетарного геомагнитного индекса K_p . Однако учитывая тот факт, что возрастания потоков на порядок и более могут происходить за несколько часов, представляет интерес также почасовой прогноз потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ. В работе [Fukata et al., 2002] прогнозируются среднечасовые значения потока электронов с горизонтом прогноза от 1 до 12 ч. Входными данными для ИНС являются исторические значения геомагнитных индексов AL и Dst . В предыдущих работах авторов данной статьи [Широкий и др., 2014; Myagkova et al., 2014; Myagkova et al., 2015] нейросетевое прогнозирование среднечасовых значений потока релятивистских электронов РЭ внешнего РПЗ также осуществляется с горизонтом прогноза от 1 до 12 ч. Использование исторических значений параметров СВ и ММП (помимо геомагнитных индексов и самого потока электронов) позволяет получить существенно более качественный прогноз среднечасовых значений потока релятивистских электронов внешнего РПЗ. Следует подчеркнуть, что использование подобного подхода стало возможным только в последние несколько лет, когда накопились достаточно длинные состоятельные временные ряды спутниковых измерений параметров СВ и ММП. По этой же причине — необходимость наличия длинных и однородных рядов измерений потоков электронов на КА — первым шагом прогнозирования временных рядов (ВР) потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ стало прогнозирование потоков на геоста-

ционарной орбите, где имеются долгосрочные данные КА GOES.

Отметим, что одним из дополнительных способов улучшения качества прогноза может стать сегментация многомерного временного ряда, данные которого используются как входная информация для нейронных сетей, осуществляющих прогнозирование, с последующим построением прогнозирующих моделей отдельно для каждого типа сегментов [Myagkova et al., 2014]. Но хотя нам удалось получить сегменты, с которыми могут быть отождествлены определенные физические процессы [Доленко и др., 2015], прогнозирование отдельно по каждому из типов таких сегментов не позволило на настоящий момент получить более высокое качество прогноза по сравнению с результатами единой нейронной сети для всего массива данных, описываемой в настоящей работе.

Целью данной работы является сравнение показателей качества прогнозов временного ряда потока релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, измеренным в точке либрации, и значениям геомагнитных индексов при помощи искусственных нейронных сетей, метода группового учета аргументов и метода проекций на латентные структуры с горизонтом прогноза от одного до 12 ч между собой и с прогнозом тривиальной модели.

2. ИСТОЧНИКИ И ПОДГОТОВКА ДАННЫХ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В настоящей работе использовались данные о параметрах СВ и ММП с КА ACE (Advanced Composition Explorer), полученные при помощи прибора SWEPAM (Solar Wind Electron Proton Alpha Monitor) (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/Browse-Data>), значения геомагнитных индексов с (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>), а также данные о потоках электронов с энергиями >2 МэВ, измерявшиеся на КА серии GOES.

Следует подчеркнуть, что использовались не преобразованные и очищенные данные 2-го уровня (Level 2 Data), предназначенные для научных исследований, а оперативные данные (Browse Data). Так было сделано из-за того, что разрабатываемая нами система прогнозирования потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ предназначена для работы в режиме онлайн, в котором качество получаемых данных соответствует оперативным данным, и адаптивные методы следует обучать для работы с данными такого качества.

Для построения прогнозов использовались следующие виды данных — временные ряды (ВР) среднечасовых значений следующих величин:

а) Параметры СВ в точке Лагранжа L1 между Землей и Солнцем:

- Скорость СВ v (км/с)
- Плотность протонов в СВ n_p (см $^{-3}$)

б) Параметры вектора ММП в той же точке Лагранжа L1 (нТл) в системе GSM:

- B_x (x-компонента ММП)
- B_y (y-компонента ММП)
- B_z (z-компонента ММП)
- Амплитуда B (модуль ММП)

в) Геомагнитные индексы

• Экваториальный геомагнитный индекс Dst (нТл)

• Глобальный геомагнитный индекс K_p (безразмерный)

г) Потоки релятивистских электронов на геостационарной орбите (измеряются в 1/(см 2 с ср)):

- Поток электронов с энергиями >2 МэВ.

Как входные данные, характеризующие поток электронов внешнего РПЗ, нами использовались данные с КА серии GOES (Сайт проекта GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). URL: <http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/>), полученные с интерактивного ресурса космофизических данных (Space Physics Interactive Data Resource — SPIDR) (Интерактивный ресурс предоставления данных по космической физике (Space Physics Interactive Data Resource — SPIDR: SPIDR Home). URL: <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>).

Помимо этого, для учета суточных и годовых вариаций прогнозируемой величины необходимо было включить в каждый пример значения, характеризующие привязку этого примера к определенным фазам суточного и годового циклов. Для этого использовались значения косинуса и синуса с суточным и годовым периодами. Использование гармонической функции времени позволяет учесть непрерывность и периодичность временных зависимостей рассматриваемых величин, а одновременное использование двух гармонических зависимостей с одним периодом, сдвинутых по фазе (синус, косинус) позволяет сделать привязку к определенной фазе цикла однозначной. Альтернативные варианты кодирования времени либо не удовлетворяют условиям непрерывности и периодичности (подача на вход алгоритма номера часа суток и номера дня года), либо приводят к резкому увеличению числа входных признаков (бинарное кодирование номера часа суток и номера дня года).

Для учета предыстории входных признаков использовалось погружение всех ВР на глубину в 24 ч, т.е. на вход алгоритма обработки данных, помимо

текущих значений всех входных величин, подавались их предыдущие значения за 1, 2, 3, ... 23, 24 часа до текущего. Такая глубина погружения представляется достаточной для работы с часовыми данными. Хотя погружение ВР позволяет учитывать предысторию входных признаков, что при решении данной задачи необходимо, оно вызывает резкое увеличение числа входов, что затрудняет ситуацию практически для всех методов прогнозирования. Чтобы частично скомпенсировать это негативное влияние, для обучения брался сокращенный вариант погружения — 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 16, 20, 24 ч, который использовался для всех трех методов.

Следует отметить, что практически для любых данных, получаемых с КА, характерно присутствие в них некоторого количества пропусков, возникающих по разным причинам, таким как сбой при передаче данных с КА на Землю, временный отказ или отключение аппаратуры на борту КА; сбой аппаратуры на борту КА, приводящий к неверным измерениям или искажению данных и так далее. Исключение всех примеров с пропущенными данными позволяет обучать ИНС на оставшихся примерах, однако при этом она может оказаться неработоспособной в течение достаточно продолжительных промежутков времени, в том числе и во время важных для практических приложений событий, поскольку, как было сказано выше, частота сбоев увеличивается во время экстремальных проявлений космической погоды. Погружение ВР существенно увеличивает отрицательное влияние пропусков на объем используемых данных. Поэтому мы были вынуждены использовать заполнение пропусков длиной 12 ч и менее методом интерполяции (для моментов времени, когда пропуск уже закончился) или методом экстраполяции последнего известного значения.

Особенностью вариаций потока релятивистских электронов как ВР является широкий динамический диапазон его значений, составляющий более 6 порядков величины. Как правило, в таких ситуациях для работы с ИНС используется перевод значений величины в логарифмический масштаб с целью выравнивания относительной погрешности прогноза на разных порядках величины. Интерполяция данных осуществлялась в логарифмическом масштабе.

В качестве обучающей выборки в данной работе использовался массив данных о потоках электронов, параметрах ММП и СВ и геомагнитных индексах с ноября 1997 года (что обусловлено временем начала поступления данных с КА 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 сетей, экзаменационный — для независимой оценки полученных результатов. Для тренировочного и тестового наборов использовались данные с ноября 1997 г. по конец 2009 г. включительно, которые разбивались случайным образом в соотношении 75% (тренировочный) к 25% (тестовый). Данные с 2010 по 2015 годы использовались в качестве экзаменационного набора.

3. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АДАПТИВНЫЕ МЕТОДЫ

В настоящей работе рассматриваются результаты прогнозирования потоков релятивистских электронов (>2 МэВ) по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, измеренным на ИСЗ ACE в точке либрации, и по значениям геомагнитных индексов, с использованием следующих адаптивных методов:

- искусственных нейронных сетей (ИНС);
- метода группового учета аргументов (МГУА);
- метода проекций на латентные структуры (ПЛС), известного также как метод частичных наименьших квадратов.

Представлено сравнение следующих показателей качества прогнозов — коэффициент множественной детерминации R^2 и корень из среднего квадрата ошибки — среднеквадратичная ошибка (СКО). Сравняются показатели прогнозов с горизонтом от одного до 12 ч между собой и с прогнозом тривиальной модели.

3.1. Искусственные нейронные сети

Для всех нейросетевых моделей, представленных в настоящей работе, применялся многослойный персептрон [Хайкин, 2006] — наиболее универсальная и наиболее часто используемая нейросетевая архитектура, с единственным скрытым слоем из 32 нейронов. Выполненные ранее исследования показали, что использование большего количества слоев и/или нейронов к улучшению результатов прогнозирования не приводит. В качестве передаточной функции для всех нейронов использовалась функция гиперболического тангенса.

ИНС обучалась по алгоритму обратного распространения ошибки со скоростью 0.01 и моментом 0.5. Обучение останавливалось после того, как в течение 500 эпох не улучшался результат работы сети на тестовом наборе данных. После этого использовалась сеть, соответствовавшая минимуму ошибки на тестовом наборе.

Для каждой модели было обучено по три сети с различными наборами начальных весов, ответы усреднялись, и для усредненного результата счи-

тались оценки качества работы модели. Это по сути является использованием простейшего комитета однородных прогнозирующих моделей.

Для обеспечения максимальной эффективности использования вычислительных мощностей путем параллельных вычислений использовалось программное обеспечение, описанное в работе [Tange, 2011].

Во всех случаях статистические показатели комитета однородных моделей в среднем оказались несколько лучше, чем у каждой из отдельных сетей, тем самым подтверждая тот факт, что даже простейший комитет на достаточно большом массиве данных имеет преимущество перед отдельными предикторами. Стандартное отклонение усреднения было во всех случаях мало (менее 1% от самого среднего), подтверждая тем самым слабую зависимость результата от начальных условий обучения ИНС.

3.2. Метод группового учета аргументов

Метод Группового учета аргументов (МГУА) представляет собой семейство индуктивных алгоритмов для математического моделирования зависимостей в многопараметрических данных [Ивахненко, 1981]. Метод предназначен для построения аналитической модели искомой зависимости и основан на рекурсивном селективном отборе моделей в заданном классе (чаще всего простых полиномиальных моделей с ограничением по количеству слагаемых и степени полинома), на основе которых посредством рекурсии строятся все более сложные модели. Точность моделирования на каждом следующем шаге рекурсии увеличивается за счет усложнения модели, причем благодаря отбору удается избежать ее переусложнения (которое оценивается по тестовому набору данных). Нами был использован МГУА в рамках программного пакета GMDH Shell (<http://www.gmdhshell.com/>), в двух режимах — комбинаторном и нейронной сети МГУА. Комбинаторный режим МГУА дал лучший результат, он и будет приводиться далее.

3.3. Метод проекций на латентные структуры

Метод проекций на латентные структуры (ПЛС) [Brown, 2009], известный также как метод частичных наименьших квадратов (Partial Least Squares), представляет собой взаимозависимое разложение матриц X (матрица входных данных) и Y (матрица выходных данных) по сингулярным значениям. Метод основан на принципе анализа главных компонент. ПЛС производит разложение матриц таким образом, чтобы максимизировать ковариацию между счетами главных компонент матриц X и Y . Таким образом создается матрица коэффициентов линейной регрессии $Y = XB$, которая

обеспечивает оптимальное в линейном приближении решение задачи. Из линейных методов ПЛС является наиболее эффективным. Количество главных компонент в разложении определяется из условия минимизации ошибки прогнозирования на тестовом наборе данных.

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Пример прогноза временного ряда логарифма потоков электронов на три часа вперед за январь—февраль 2015 года показан на верхней панели рис. 1 (сплошная толстая серая линия — результаты измерений, сплошная черная тонкая линия — прогноз с помощью ИНС). На остальных панелях приведены временные зависимости наиболее существенных для прогноза входных признаков — скорости солнечного ветра, B_z -компоненты геомагнитного поля, K_p -индекса и Dst -вариации. Как видно из рис. 1, поток релятивистских электронов существенно, но неоднозначно зависит от параметров СВ и геомагнитных индексов. Например, нетрудно заметить, что наибольшую роль играет скорость солнечного ветра — так, максимальная за приведенный период скорость СВ в начале февраля вызвала максимальный рост потоков релятивистских электронов внешнего РПЗ. Однако, даже вклад скорости СВ не всегда однозначно определяет величину роста потока РЭ. Ярким примером тут могут служить два последовательных возрастания потоков релятивистских электронов внешнего в конце февраля — более ранний поток высокоскоростного СВ, имевший скорость меньше, чем, следовавший за ним, вызвал, однако более сильное возрастание потока электронов при практически одинаковом уровне геомагнитных возмущений.

На рисунке 2 с целью сравнения качества прогноза на разные горизонты приведены более подробно прогнозы, выполненные тремя разными методами на один (а), три (б) и шесть часов (в) с 25 января по 11 февраля 2015 г. Даже при визуальном анализе можно сказать следующее: прогнозы ИНС и МГУА (во всяком случае, для этого периода) близки по качеству, хотя ИНС немного лучше (по крайней мере, при резких спадах потока электронов прогноз ИНС точнее), и оба прогноза ухудшаются с ростом горизонта, хотя и не очень существенно. Также видно, что прогноз при помощи ПЛС существенно хуже, чем прогнозы ИНС и МГУА. Из рисунка 2 также видно, что прогноз ВР логарифма потока релятивистских электронов внешнего РПЗ имеет ярко выраженную ежедневную циклическую суточную вариацию, которая хорошо воспроизводится всеми тремя моделями, благодаря подаваемым на вход всех алгоритмов значениям синуса и косинуса с суточным периодом. Ошибки моделей в основ-

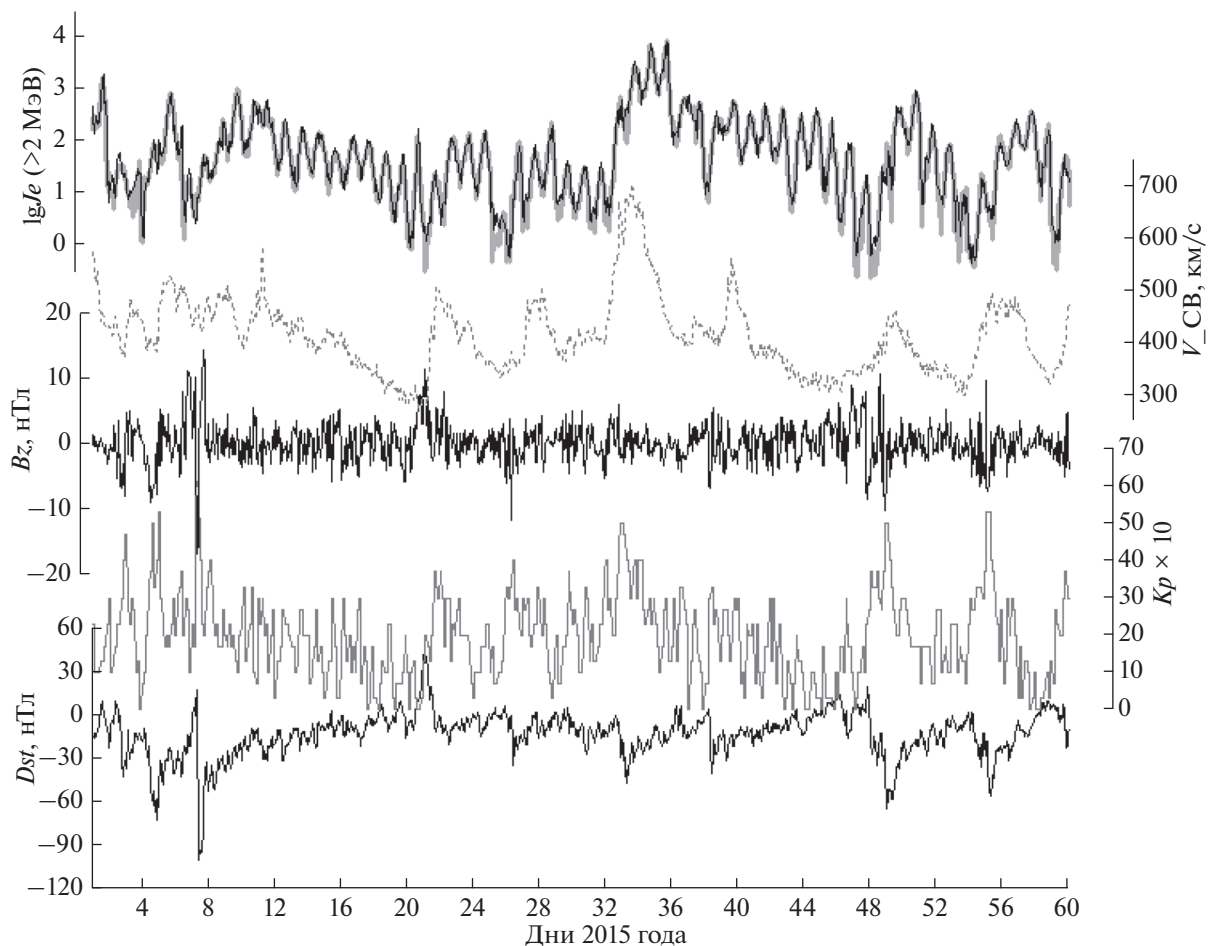


Рис. 1. Пример временного ряда логарифма потоков электронов за январь–февраль 2015 года и его прогноз на три часа вперед, выполненный с помощью ИНС (верхняя панель), а также входные параметры для прогноза – скорость СВ, B_z -компонента ММП, Kp -индекс, Dst -вариация.

ном наблюдаются при самых низких значениях потока электронов, то есть когда измеренные значения менее надежны, а также в непосредственной близости от минимумов и максимумов дневных циклов.

Для получения количественных показателей качества прогноза разными методами были получены зависимости значений коэффициента множественной детерминации R^2 и среднего квадратичного отклонения (СКО) на всем экзаменационном наборе (данные с 1 января 2010 по 31 марта 2015 г.) тремя исследуемыми методами – ИНС (1), МГУА (2), ПЛС (3) от горизонта прогноза. Результаты представлены на рис. 3 (а и б). На этих же рисунках для сравнения показаны результаты прогноза при помощи тривиальной модели “завтра как сегодня” (4), то есть модели, для которой прогнозируемая величина принимается равной последнему измеренному значению. Для ИНС представлены результаты для усредненного про-

гноза трех одинаковых ИНС с различными наборами начальных весов.

Зависимости, приведенные на рис. 3, показывают, что качество прогноза потока релятивистских электронов внешнего РПЗ для всех трех методов монотонно ухудшается (R^2 падает, а СКО растет) с увеличением горизонта прогнозирования, как и следовало ожидать.

Рисунок 3 подтверждает сделанные выше на примере рис. 2 наблюдения о том, что среди исследованных методов прогнозирования, испытанных в одинаковых условиях, наилучшие результаты были получены для искусственных нейронных сетей. Результат прогноза комбинаторного МГУА несколько хуже, чем для ИНС, но незначительно. Метод ПЛС дает гораздо худшие результаты, для горизонтов менее 6 ч даже хуже, чем тривиальная модель. Это можно объяснить тем, что ПЛС является чисто линейным методом, использующим все входные признаки. Комбинаторный МГУА в данном исследовании отобрал модели, которые

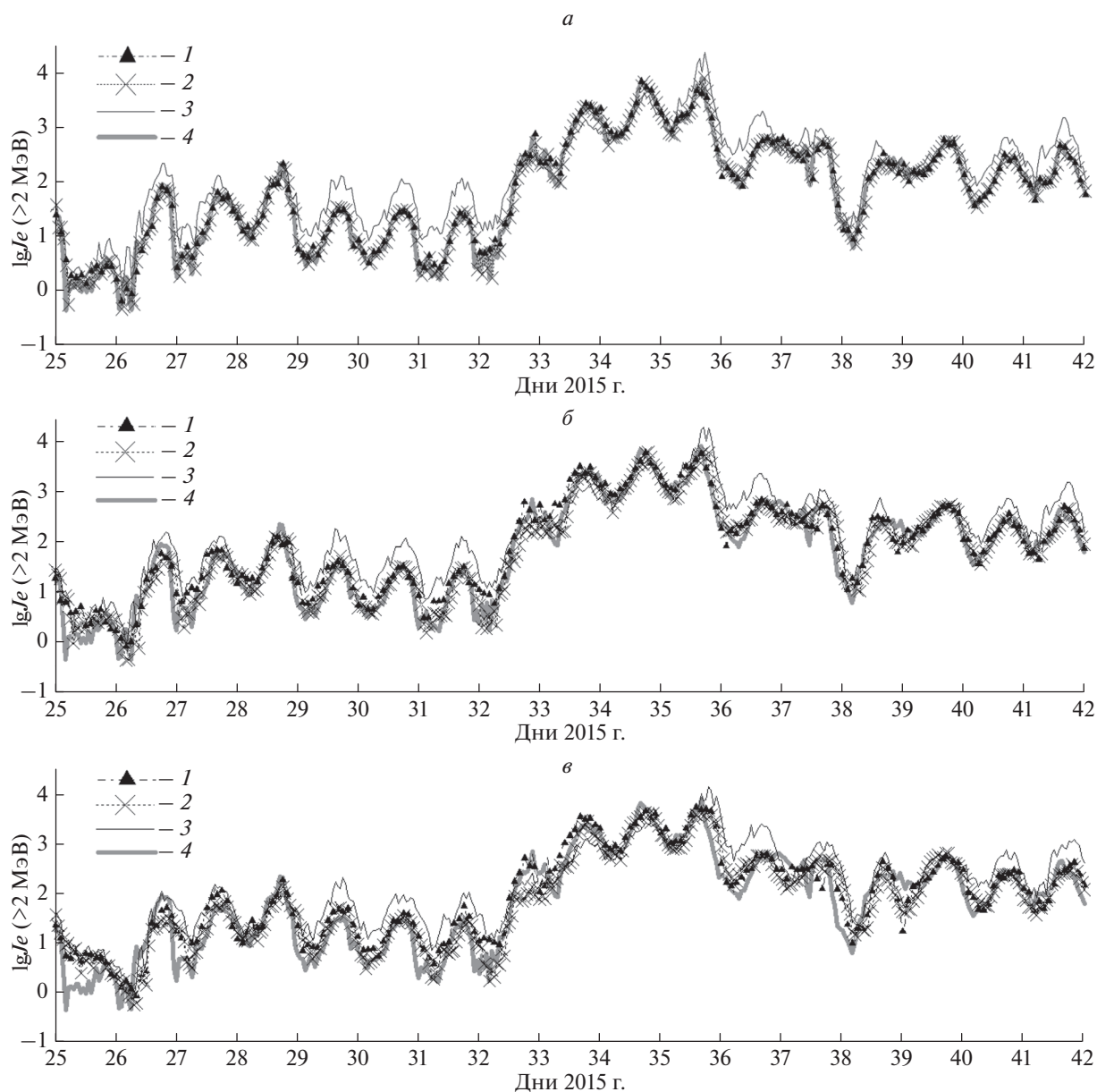


Рис. 2. Прогноз временного ряда логарифма потоков РЭ ВРПЗ на один (а), три (б) и шесть (в) часов вперед с 25 января по 11 февраля 2015 года, выполненный тремя разными способами. 1 – ИНС, 2 – МГУА, 3 – ПЛС; 4 – прогнозируемый временной ряд.

также были линейными, но при этом был выбран только ограниченный набор наиболее подходящих входных признаков. С другой стороны, ИНС типа персептрон является универсальным нелинейным аппроксиматором, что позволяет ей аппроксимировать нелинейное отображение совокупности входных признаков на прогнозируемое значение с погрешностью, минимальной среди всех трех рассматриваемых методов.

Можно было бы ожидать, что создание прогнозирующих комитетов из предикторов различной природы позволит повысить качество про-

гнозирования. Однако простое усреднение полученных прогнозов ИНС, МГУА и ПЛС дает результат худший, чем у ИНС; усреднение прогнозов только ИНС и МГУА также не позволяет получить более высокое качество прогноза, чем у простого комитета из ИНС. По-видимому, это связано с тем обстоятельством, что в данном случае погрешности различных прогнозирующих моделей часто оказываются имеющими один знак. Это может означать, что предикторы не являются статистически независимыми, а погрешности прогнозирования в значительной мере

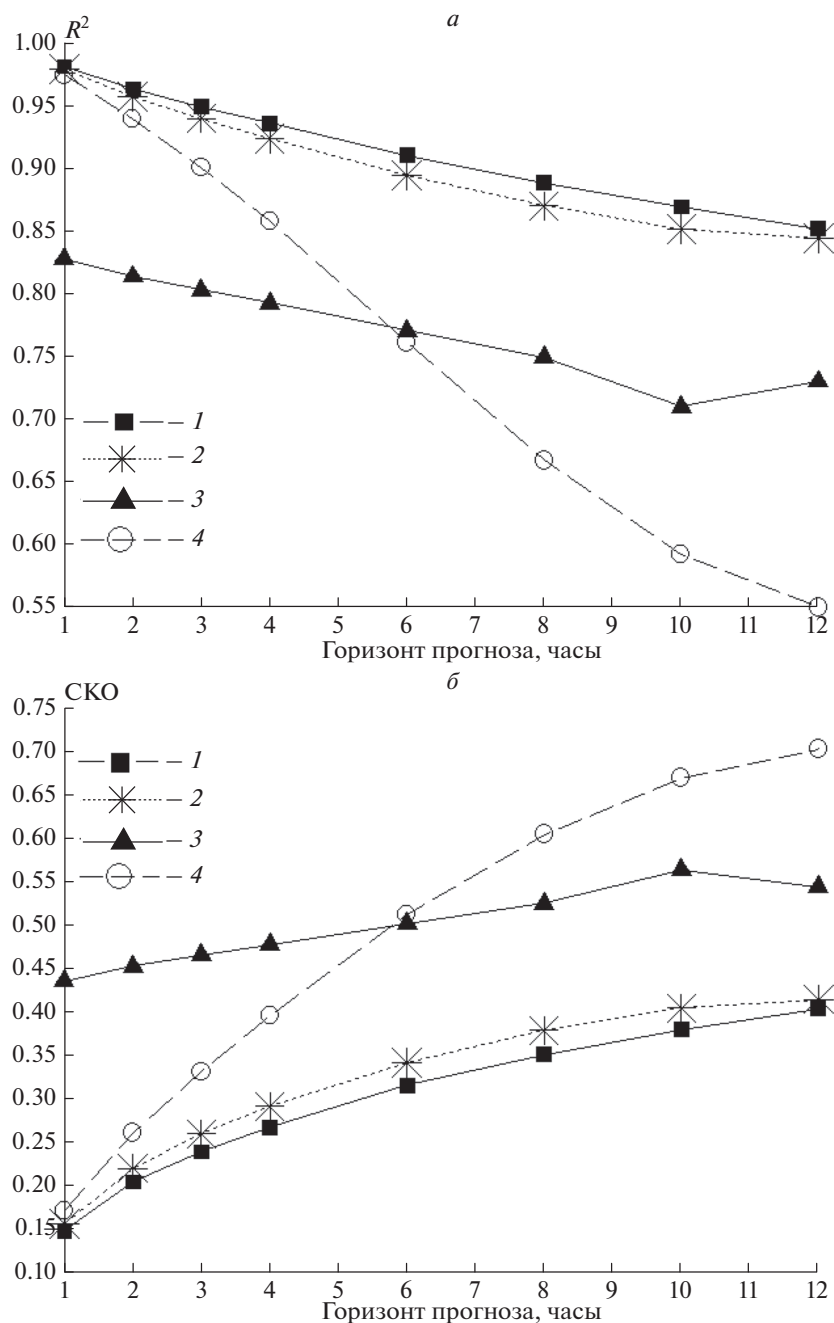


Рис. 3. Значения показателей качества прогнозирования логарифма потока РЭ внешнего РПЗ на экзаменационном наборе данных (январь 2010—март 2015) разными методами и сравнение их с результатами прогноза тривиальных моделей. *а* — коэффициент множественной детерминации R^2 ; *б* —среднеквадратичная ошибка (СКО). 1 — ИНС, 2 — МГУА, 3 — ПЛС, 4 — тривиальная модель.

носят не случайный характер, но определяются различной сложностью решаемой задачи на различных участках рассматриваемого временного ряда. В свою очередь, это может служить основанием для продолжения исследований в направлении построения комбинаций прогнозирующих моделей, работающих на различных сегментах, выделяемых адаптивным образом.

5. ВЫВОДЫ

В настоящей работе исследованы результаты прогнозирования временного ряда среднечасовых значений потока релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, измеренным в точке либрации, и значениям геомагнитных индексов, при помощи различных адап-

тивных методов. Выполнено сравнение прогнозирования с помощью искусственных нейронных сетей, метода группового учета аргументов и метода проекций на латентные структуры (также известного как метод частичных наименьших квадратов).

Лучший результат продемонстрировал простой комитет однородных предикторов из трех ИНС, тренировка которых производилась с различными наборами начальных весов. Результат прогноза с использованием комбинаторного МГУА оказался близок к результату ИНС, а прогноз методом ПЛС — значительно хуже.

Показано, что с увеличением горизонта прогноза от 1 до 12 ч качество его снижается, но не радикально. Это дает возможность рассматривать вопрос о дальнейшем увеличении горизонта прогноза.

Направления дальнейшего улучшения качества прогноза включают отбор существенных входных признаков и использование комитета статистически независимых предикторов, а также продолжение исследований в направлении сегментации рассматриваемого многомерного временного ряда с построением своей прогнозирующей модели для каждого типа сегмента.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-01-00293-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дегтярев В.И., Чудненко С.Э., Харченко И.П., Цзюмед Б., Хие В. Прогноз максимальных среднесуточных значений потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите в восстановительную фазу магнитной бури // Солнечно-земная физика. Вып. 13. С. 34–42. 2009.
- Доленко С.А., Мягкова И.Н., Персианцев И.Г. Нейросетевая сегментация многомерных временных рядов как инструмент для исследования динамики магнитосферы Земли // XVII Всероссийская научно-техническая конференция “Нейроинформатика-2015” с международным участием: Сборник научных трудов. Ч. 2. М., НИЯУ МИФИ., С.128–138. 2015.
- Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. Киев, Наук. думка, 296 с. 1981.
- Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю. и др. Динамика радиационных поясов Земли во время сильных магнитных бурь по данным ИСЗ “КОРОНАС-Ф” // Астрон. вестн. Исследования солнечной системы. Т. 41. № 4. С. 350–359. 2007.
- Романова Н.В., Пилипенко В.А., Ягова Н.В., Белов А.В. Статистическая связь частоты сбоев на геостационарных спутниках с потоками энергичных электронов и протонов // Космич. исслед. Т. 43. № 3. С. 186–193. 2005.
- Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс, 1104 с. 2006.
- Широкий В.Р., Мягкова И.Н., Персианцев И.Г. Нейросетевое прогнозирование потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли // XVI Всероссийская научно-техническая конф. “Нейроинформатика-2014” с международным участием: Сборник научных трудов. М., НИЯУ МИФИ, Ч. 2. С. 253–263. 2014.
- Baker D.N., McPherron R.L., Cayton T.E., Kebedesel R.W. Linear prediction filter analysis of relativistic electron properties at 6.6 RE // J. Geophys. Res. V. 95 (A9). P. 15133–15140. 1990.
- Brown S.D., Tauler R., Walczak B. Comprehensive Chemometrics// Chemical and biochemical data analysis, 4 vol. set, Elsevier, Amsterdam, 2896. 2009.
- Friedel R.H., Reeves W.G.P., Obara T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere — A review // J. Atmos. Solar.-Terr. Phys. V. 64. P. 265–283. 2002.
- Fukata M., Taguchi S., Okuzawa T., Obara T. Neural network prediction of relativistic electrons at geosynchronous orbit during the storm recovery phase: effects of recurring substorms // Ann. Geophysicae. V. 20. Issue 7. P. 947–951. 2002.
- Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V. et al. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // Space Weather. V. 3. № 1. P. S01001. 2005.
- Koons H.C., Gorney D.J. A neural network model of the relativistic electron flux at geosynchronous orbit // J. Geophys. Res. V. 96. P. 5549–5556. 1990.
- Ling A.G., Ginet G.P., Hilmer R.V., Perry K.L. A neural network-based geosynchronous relativistic electron flux forecasting model. Space Weather. V. 8. Issue 9. 2010. CiteID S09003. doi 10.1029/2010SW000576
- Myagkova I.N., Dolenko S.A., Persiantsev I.G. Study of the outer radiation belt of the Earth by segmentation of multi-dimensional time series/ Proc. 10th Intl. Conf. “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Russia, Oct. 6–10 2014. 345–350. 2014.
- 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 Proc. article № 9, P. 109–118. 2015. doi 10.1145/2797143.2797169.
- O’Brien T.P., McPherron R.L., Sornette D., Reeves G.D., Friedel R., Singer H.J. Which magnetic storms produce relativistic electrons at geosynchronous orbit // J. Geophys. Res. V. 106A. P. 15533–15544. 2001.
- Paulikas G.A., Blake J.B. Effects of the solar wind on magnetospheric dynamics: Energetic electrons at the synchronous orbit, in Quantitative Modeling of Magnetospheric Processes // Geophys. Monogr. Ser. V. 21 / edited by W.P. Olson. P. 180–202. AGU. Washington D.C. 1979.
- Reeves G.D., McAdams K.L., Friedel R.H.W., O’Brien T.P. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. V. 30. P. 1529. 2003. doi 10.1029/2002GL016513
- Shprits Y.Y., Elkington S.R., Meredith N.P. et al. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belts I: Radial transport // J. Atmos. Solar.-Terr. Phys. V. 70. P. 1679–1693. 2008.
- Shprits Y.Y., Subbotin D., Ni B. et al. Profound change of the near-Earth radiation environment caused by solar superstorms // Space Weather. V. 9. S08007. 2011. doi 10.1029/2011SW000662
- Tange O. GNU Parallel — The Command-Line Power Tool // login: The USENIX Magazin. P. 42–47. 2011.
- Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M., Angelopoulos V. Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms // Natural Physics. V. 8. P. 208–212. 2012.
- Wang Y.-M., Robbrecht E., Sheeley N.R., Jr. On the weakening of the polar magnetic fields during solar cycle 23 // Astrophys. J. V. 707. P. 1372–1386. 2009.