

Конференция
«Гелиогеофизические
исследования в Арктике-2»,
24-26 сентября 2018, г. Мурманск



ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ СВЯЗИ ДИНАМИКИ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Бархатов Н.А.¹, Воробьев В.Г.², Ревунов С.Е.¹, Ягодкина О.И.²

¹Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

²Полярный геофизический институт

АННОТАЦИЯ

Нейросетевыми методами исследуются причинно-следственные связи динамики высокоширотной геомагнитной активности (по индексу AL) с параметрами плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. При этом особое внимание обращено на характеристики действующего на магнитосферу плазменного потока типа магнитного облака. Для описания процесса формирования суббури наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра успешно использован сформированный из них интегральный параметр. Продемонстрированная эффективность восстановления динамики AL по используемым данным указывает на наличие тесной нелинейной связи AL индекса с параметрами коронального плазменного потока.

Основные моменты проблемы

Важной задачей современной гелиогеофизики является прогнозирование геомагнитных возмущений, опирающееся на данные патрульных космических аппаратов, находящихся за пределами магнитосферной ударной волны.

Основу такого прогнозирования составляет тесная связь состояния магнитосферы с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

Наиболее драматические явления в магнитосфере и высокоширотной ионосфере происходят в периоды магнитосферных суббурь, чувствительным индикатором которой является временной ход и величина AL индекса, характеризующего западный электроджет.

Классические представления запуска суббурового процесса заключаются в загрузке магнитосферы кинетической энергией солнечного ветра.

Основная идея

- ❑ Процесс накопления энергии поступающей из солнечного ветра на подготовительном интервале суббури нельзя учесть **на основе мгновенных значений** (B_z , N , V).
- ❑ Его можно оценить вычислением **интегральной величины**.
- ❑ Предложено использовать интегральный  параметр, характеризующей изменение количества энергии поступающей за один час в магнитосферу из солнечного ветра в форме кинетической энергии.

Пути решения

- ❑ Выполняется поиск нелинейной корреляционной связи параметров солнечного ветра и особенностей динамического процесса загрузки авроральной магнитосферы кинетической энергией ветра с процессом развития суббури.
- ❑ Для этого создан алгоритм типа искусственной нейронной сети (ИНС), который восстанавливает динамику AL индекса отвечающую развитию суббури.

Пытаемся получить

Нейросетевой алгоритм с высокой эффективностью должен обеспечить восстановление AL индекса:

- в периоды изолированных магнитосферных суббурь,
- в периоды взаимодействия магнитосферы Земли с магнитными облаками различных типов.

Модель восстановления AL индекса для использования детектора магнитных облаков.

1. Исследование возможности восстановления динамики AL индекса для изолированной суббури

Экспериментальные данные для исследования изолированных суббурь

- Для проверки работы алгоритма отобрано 70 изолированных суббуревых событий различной интенсивности в период с 1994 по 2014 гг. по данным каталога NASA (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov>).
- Для каждого события использованы минутные данные параметров солнечного ветра, зарегистрированные на патрульном КА :

плотность N

скорость V

динамическое давление P

компоненты межпланетного магнитного поля B_x, B_y, B_z

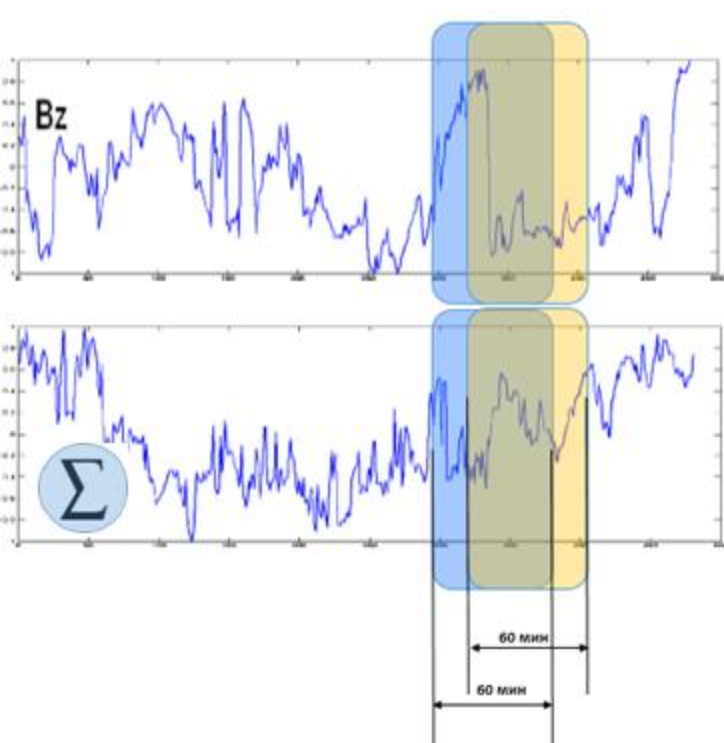
- Оценка суббуревой активности выполнена с использованием минутных данных индексов:

AL

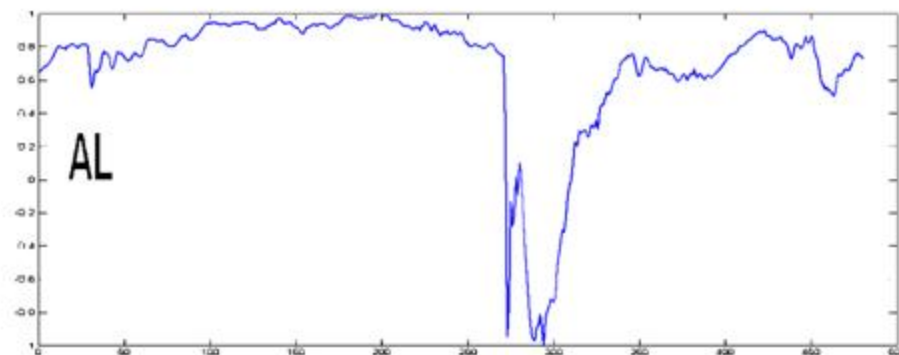
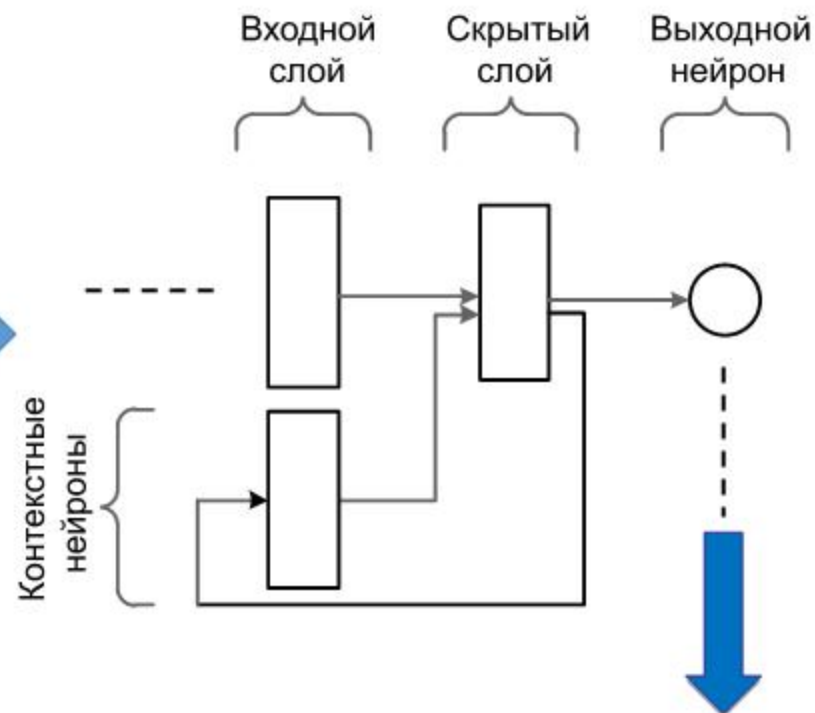
SYM/H

DO

Архитектура ИНС



ИНС №0



Архитектура ИНС

- Архитектура построена по принципу Элмана и содержит дополнительный слой нейронов, обеспечивающий «внутреннюю память» о предыстории восстанавливаемого динамического процесса.
- В качестве входных последовательностей нейросетевой модели, использованы два параметра – компонента ММП **Bz** и интегральный параметр Σ , учитывающий предысторию процесса накачки кинетической энергии солнечного ветра в магнитосферу в рамках 60 минутных окон.
- Единственный солнечного выходной нейрон генерирует последовательность значений **AL**-индекса.
- Обучающие последовательности нормировались и подавались на входы ИНС в случайном порядке с целью минимизации эффекта «запоминания последнего обучающего образца».

Эффективность восстановления РЕ

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

T^{μ} – целевое (реально зарегистрированное) значение для сопоставления с выходом для μ -го примера во входной последовательности,

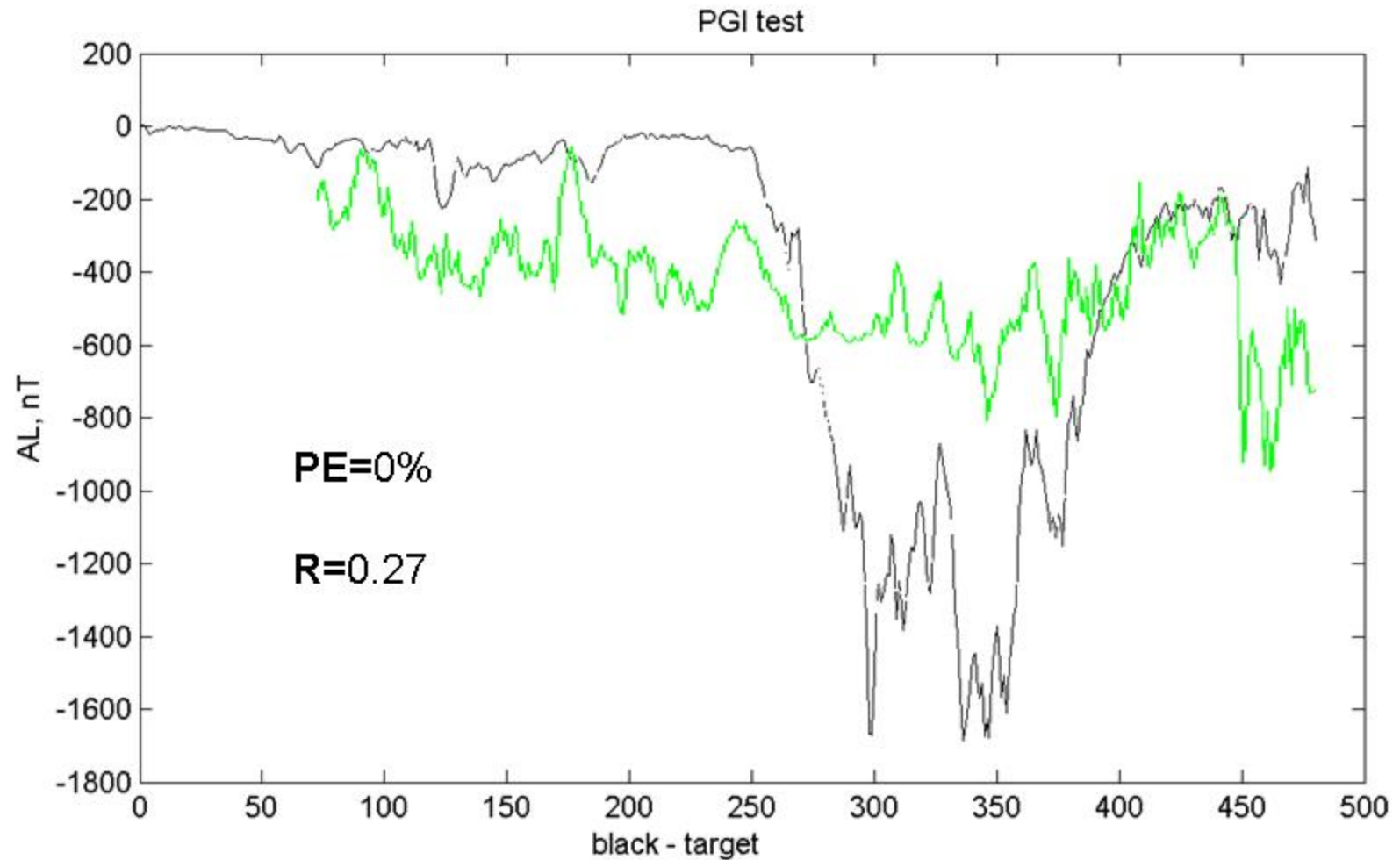
O^{μ} – значение μ -го выхода ИНС для μ -го примера входной последовательности

$\langle T \rangle$ – среднее по всем целевым значениям выхода ИНС

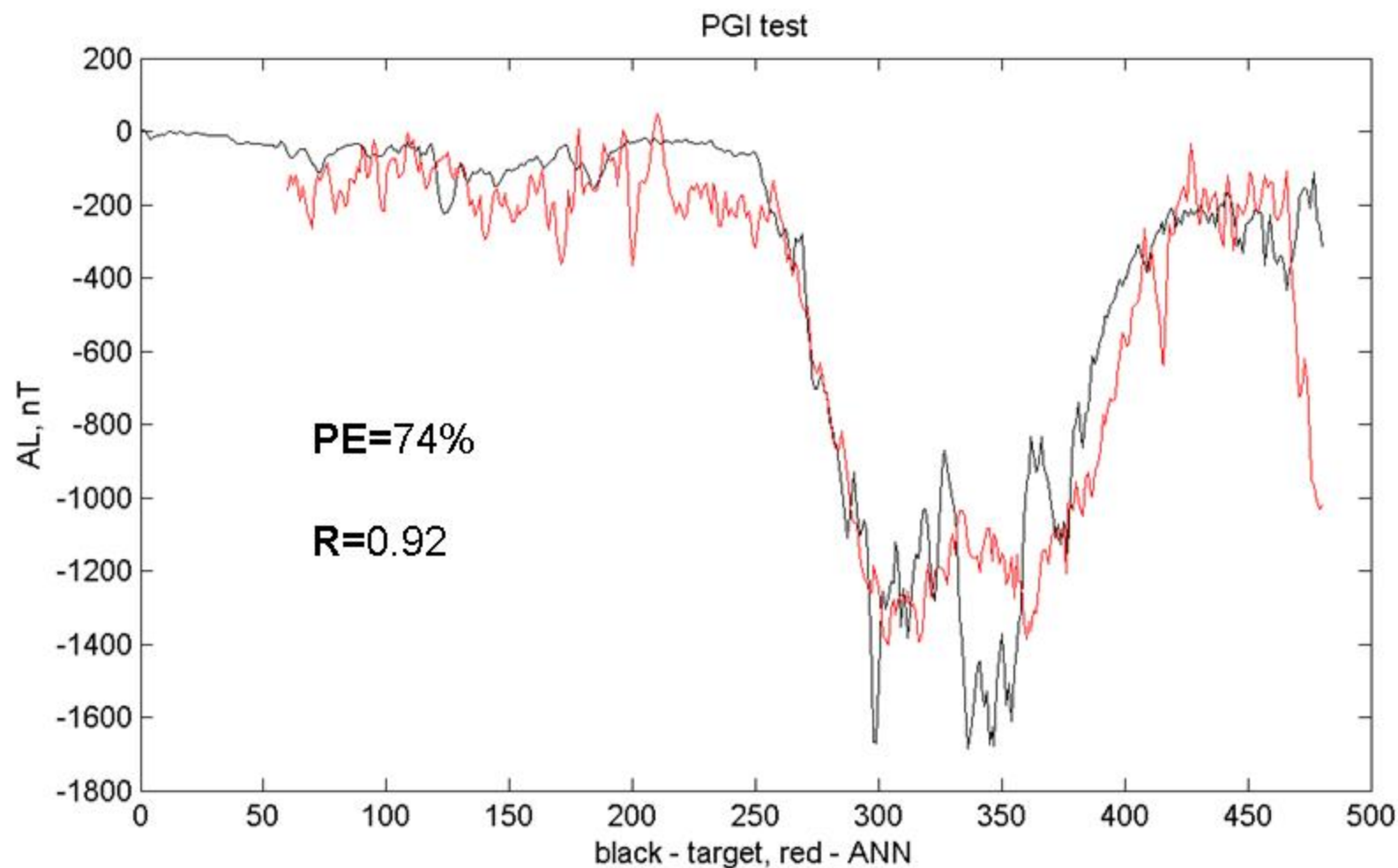
N – число точек целевого процесса.

Эффективность восстановления – единица, уменьшенная на величину средней относительной вариации – отношение среднеквадратичной ошибки к дисперсии целевого процесса.

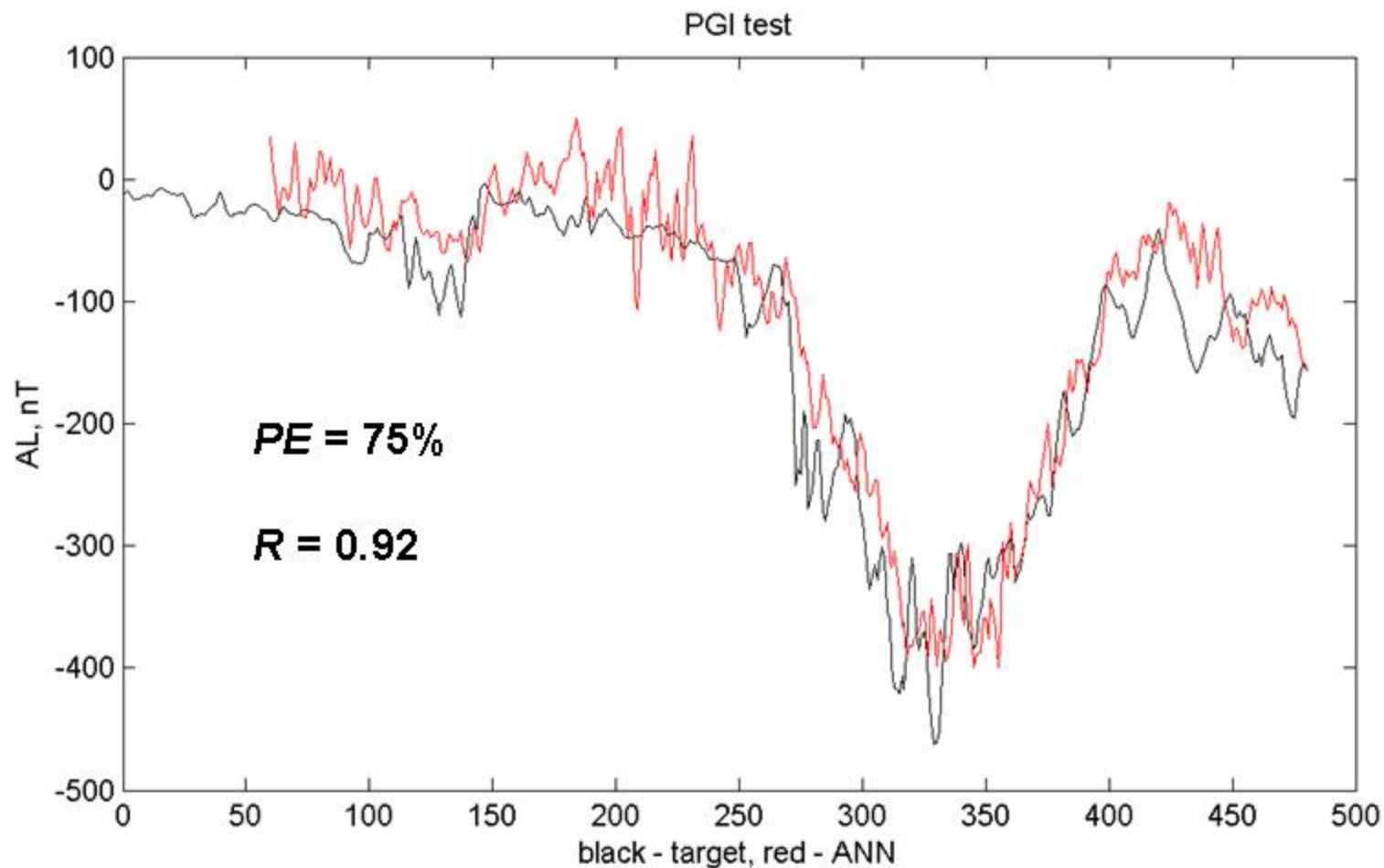
Результаты восстановления по эволюции Vz компоненте ММП *без интегрального параметра* Σ



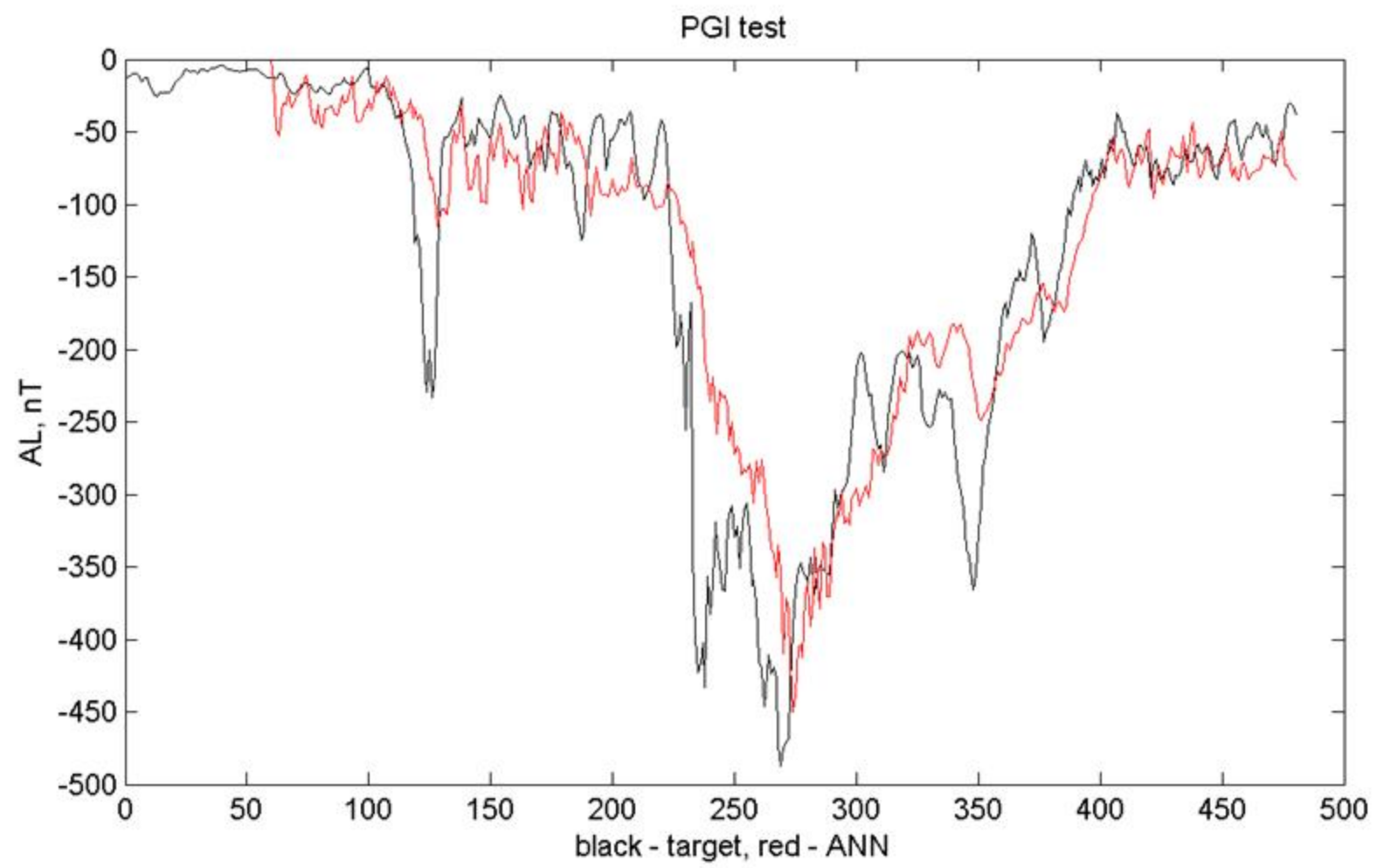
07.01.2005 10:00 - 07.01.2005 18:00



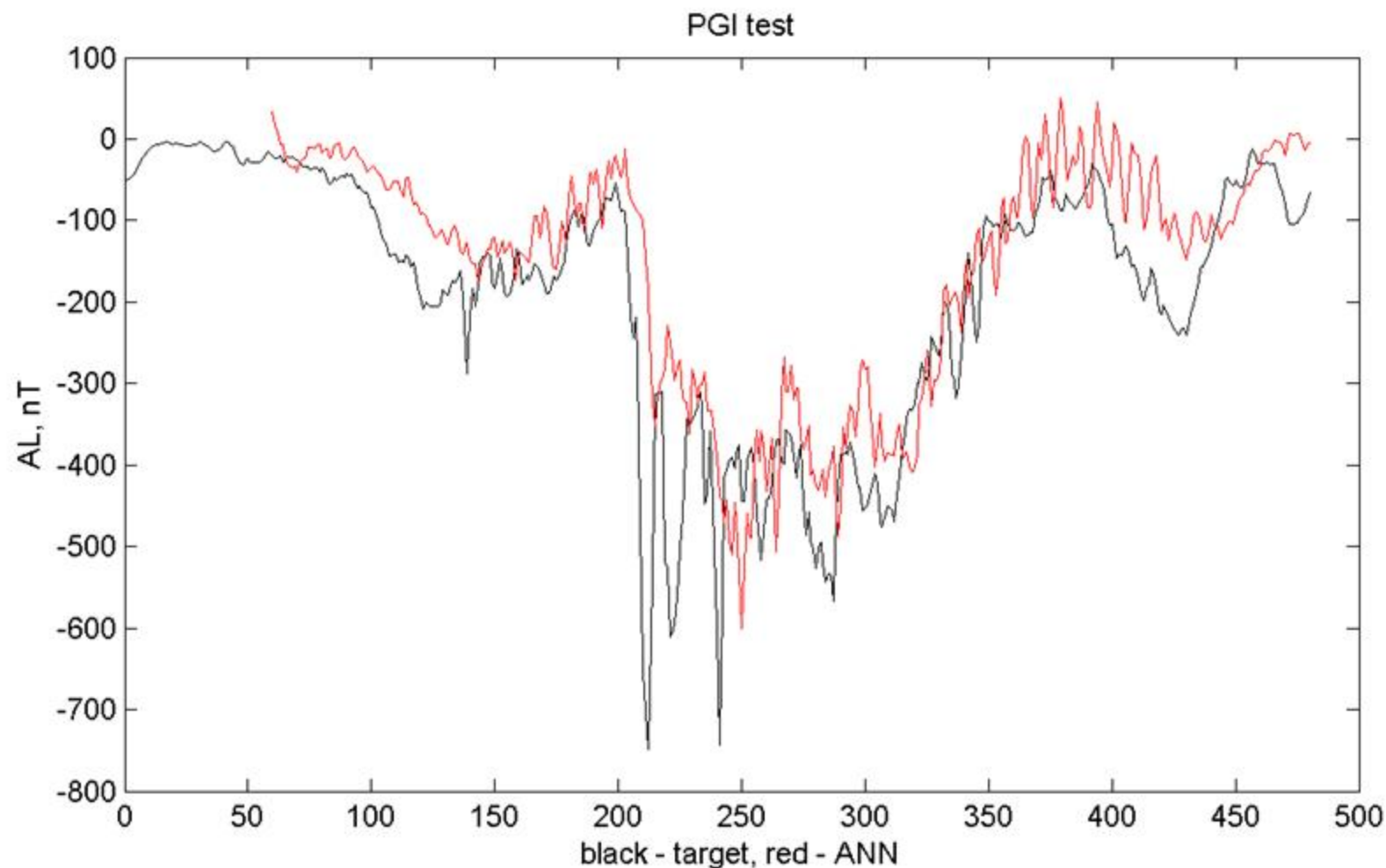
07.01.2005 10:00 - 07.01.2005 18:00



29.11.2007 09:00 - 29.11.2007 17:00

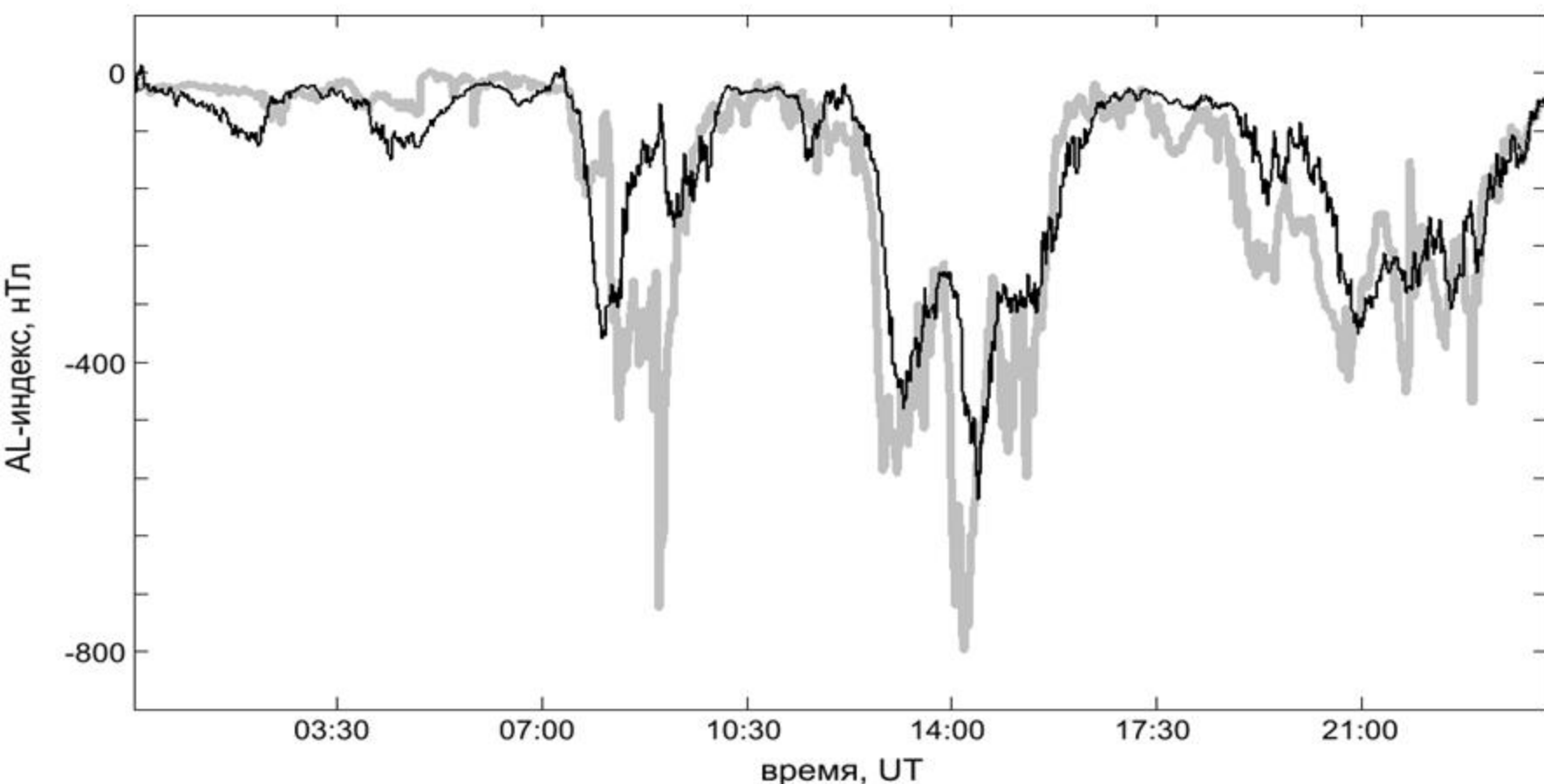


17.12.2008 11:00 - 17.12.2008 19:00



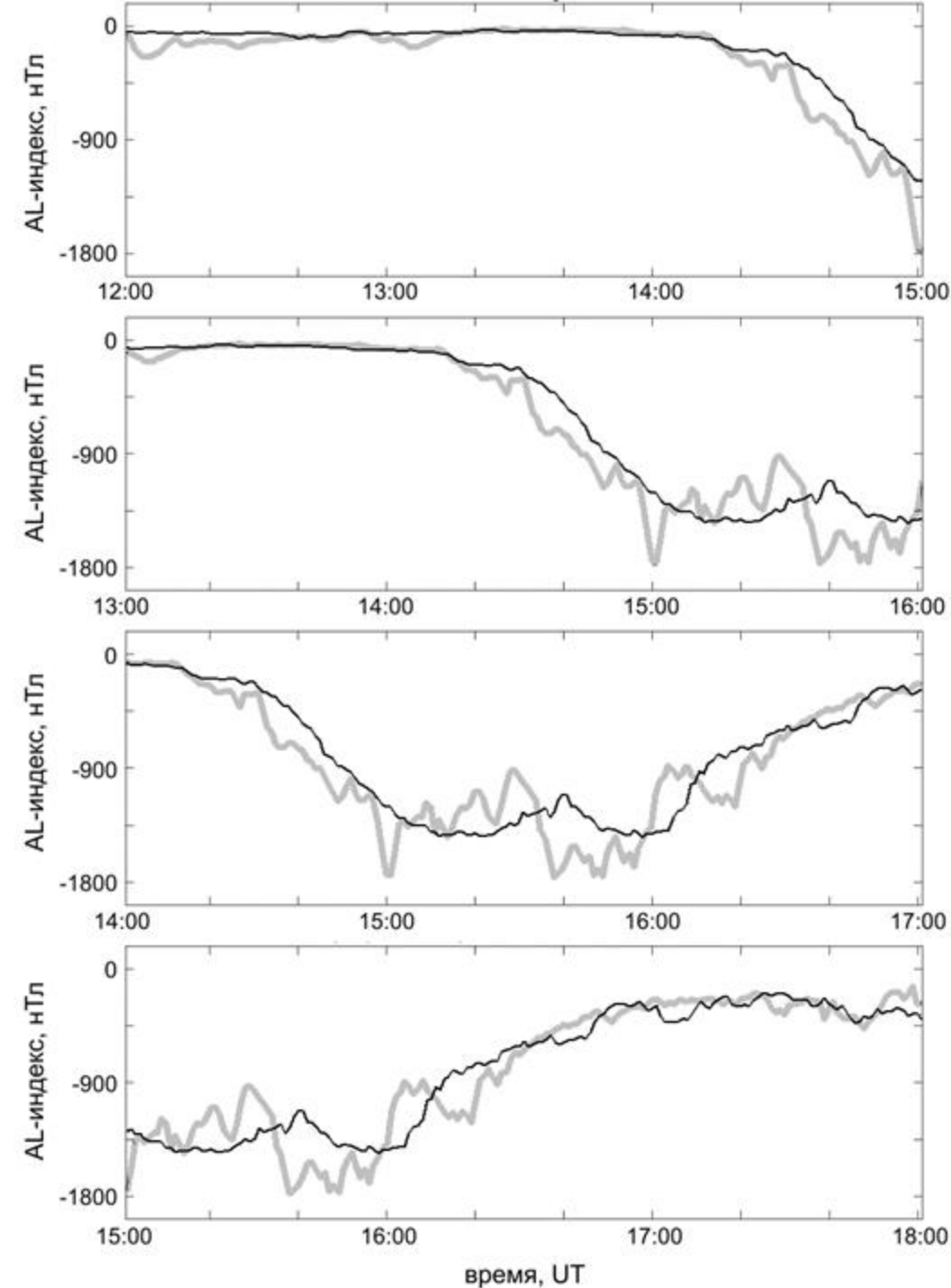
04.12.2008 07:00 - 04.12.2008 15:00

Демонстрация восстановления индекса AL на суточном интервале данных, содержащем последовательность суббурь 5 января 2008 г. Серая линия – реальные данные, черная линия – ответ ИНС ($R=0.91$, $PE=76\%$).



Интеллектуальные способности ИНС подтверждены.

Восстанавливаемый интервал многократно превышает временные рамки обучающих последовательностей. Случайное положение экстремумов при таком подходе использования входных данных исключает возможность их механического запоминания нейросетью.



Результаты работы ИНС с последовательным сдвигом на 60 минут тестируемых данных в пределах 2-3 часов до активной фазы суббури.

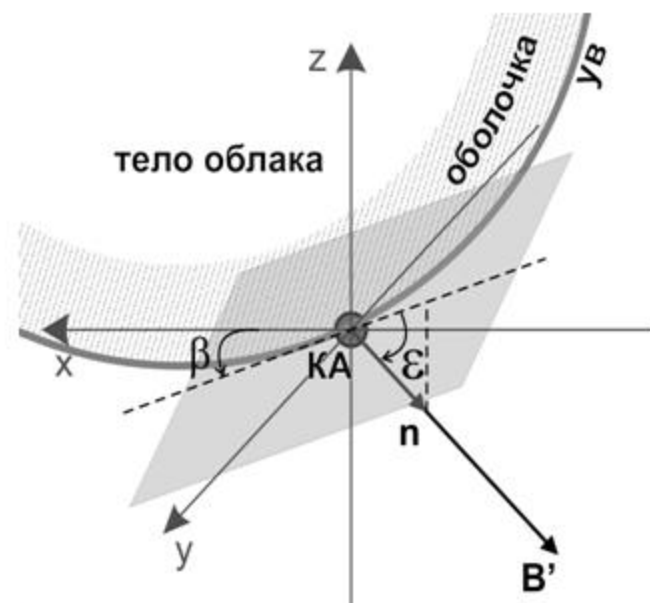
Проверяется способность алгоритма восстанавливать значения индекса AL при разных начальных комбинациях параметров солнечного ветра.

Динамика исходных данных для восстановления AL-индекса не сказывается на конечном результате, что свидетельствует об устойчивой работе алгоритма.

2. Исследование суббурового процесса вызываемого магнитными облаками солнечного ветра

Магнитное облако – наиболее геомагнитоеффективный корональный плазменный поток

Обнаружение [Иванов, 1974]. Введение термина [Burlaga et al., 1981].



Особенности магнитного облака:

Несколько тысяч Re в эклиптическом сечении

- Повышенная величина магнитного поля;
- Спиральное вращение вектора магнитного поля в облаке;
- Пониженная температура плазмы

Экспериментальные данные для исследования суббурь вызванных облаками

□ Анализируемые интервалы по двум выборкам:

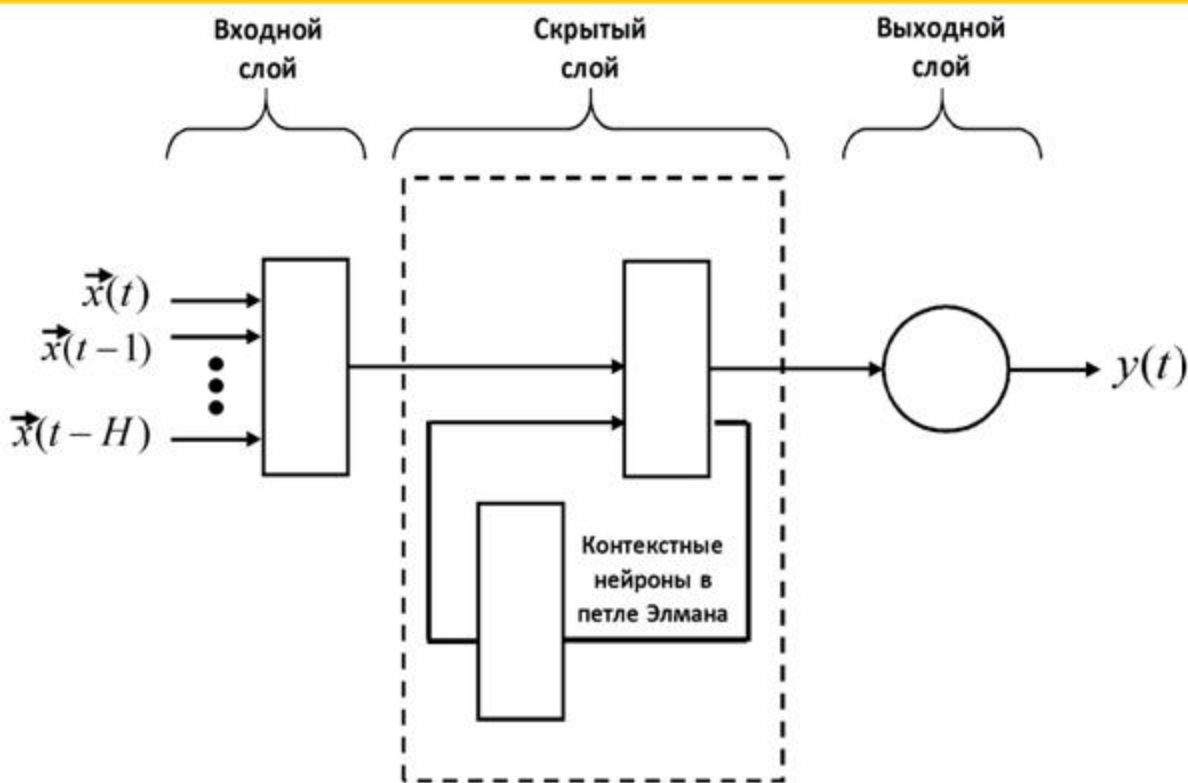
- группа 1 – (33 случая) быстрые облака с ударными волнами и турбулентной оболочкой
- группа 2 – (19 случаев) медленные облака без ударных волн и турбулентной оболочкой

□ Дополнительно анализированные интервалы данных:

- группа 3 – (70 случаев), отвечающие изолированным суббурям по показаниям индекса AL
(без уточнения типа плазменного потока, но заведомо не принадлежащие магнитным облакам)

ПЕРВАЯ ГРУППА ЭКСПЕРИМЕНТОВ: **Архитектура ИНС №1**

Поиск вектора входных последовательностей и оптимальной глубины его предыстории



ИНС Элмана (сеть №1) с моделированием временной задержки в H минут на входе

Входная последовательность нейросетевой модели – вектор, с **возможностью моделирования предыстории**, содержащий:

данные ПСВ,
компоненты ММП,
их комбинации.

Единственный выходной нейрон генерирует динамику **AL**-индекса.

Поиск входных последовательностей и оптимальной глубины их предыстории

- Глубина предыстории процесса – дополнительное количество параметров на входе нейросети – моделирование его временной задержки.
- Глубина предыстории в N минут подразумевает единовременное использование значений соответствующего параметра в моменты времени $t, t-1, t-2, \dots, t-N$ мин во входном слое ИНС.

Установлено: Предыстория динамики V_y и V_z компонент ММП в магнитном облаке наиболее эффективна для нейросетевого моделирования последовательностей значений AL индекса.

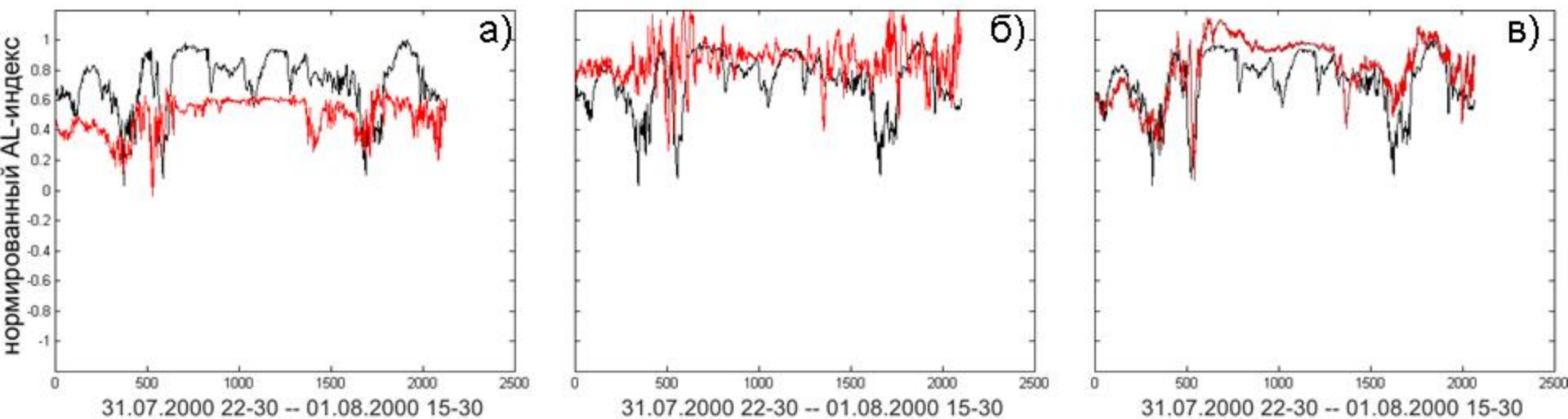
- Поиск оптимальной глубины предыстории для входных последовательностей компонент ММП от 30 до 90 минут с шагом 10 минут.

Поиск глубины показал:

90 минутная предыстория комбинации компонент ММП V_y и V_z наиболее эффективна для восстановления AL индекса.

При такой глубине начинают формироваться признаки магнитного облака.

Результаты поиска оптимальной глубины предыстории входных последовательностей для данных из группы 1 и 2



Демонстрация восстановления AL-индекса для случая медленного магнитного облака без ударной волны и оболочки (31.07.2000-01.08.2000) при разной глубине предыстории процесса.

Сопоставление реальных значений AL-индекса (черная) и смоделированных ИНС (красная) для разной глубины предыстории процесса;

а) - предыстория 30 мин ($R=0.61$, $PE=49\%$);

б) - предыстория 60 мин ($R=0.69$, $PE=44\%$);

в) - предыстория 90 мин ($R=0.82$, $PE=77\%$)

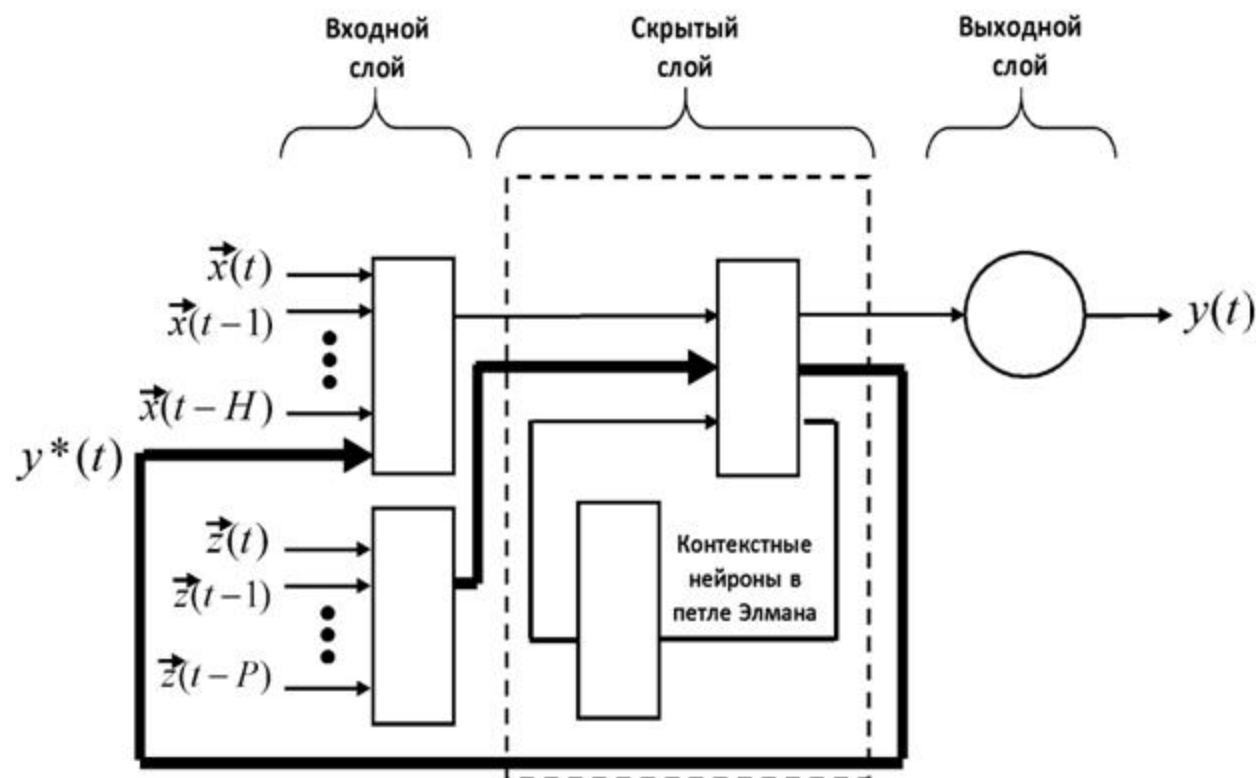
ВТОРАЯ ГРУППА ЭКСПЕРИМЕНТОВ: **Архитектура ИНС №2**

Усиление обучения с помощью синтезируемыми внутри ИНС последовательностями AL-индекса

- ИНС с внешней петлей обратной связи, позволяет подкреплять обучение синтезируемыми внутри ИНС последовательностями AL-индекса.
- Реализация ответной реакции при учете разной глубины предыстории причинно-следственных процессов:

вход ИНС №1 - глубина предыстории $H=90$ минут

вход ИНС №2 – глубина предыстории $P=60$ минут



ИНС Элмана с внешней петлей обратной связи (сеть №2).

Внешняя петля обратной связи передает выходные последовательности $y^*(t)$ на основной вход.

Входы X и Z позволяют моделировать разное время задержки H и P .

Результаты нейросетевых экспериментов

- Результаты независимого последовательного тестирования всех событий из первых двух групп с учетом 90 минутной предыстории входных параметров нейросетевой модели (компоненты ММП V_y и V_z)

Таблица 1

Обучающий массив	Количество экспериментов по восстановлению AL	Средние значения R и PE для восстановления AL (ИНС №2) (в скобках улучшение в сравнении с ИНС №1)	Демонстрация
группа 1 МО с УВ быстрые	33	группа 1, R=0.80 (0.03), PE=77% (5%) группа 2, R=0.84 (0.09), PE=79% (9%)	Рис. 1
группа 2 МО без УВ медленные	19	группа 1, R=0.45 (0.02), PE=28% (0%) группа 2, R=0.92 (0.10), PE=81% (2%)	Рис. 2
группа 1 и 2	33+19	группа 1, R=0.74 (0.03), PE=70% (1%) группа 2, R=0.79 (0.06), PE=73% (4%)	Рис. 3

Обучение по **быстрым** облакам с УВ дает успешное восстановление AL по быстрым и медленным. Использование ИНС 2 заметно улучшает восстановление.

Обучение по **медленным** – только по медленным.

Рис. 1. Демонстрация восстановления AL
(медленное МО 23.09.2001 без ударной волны и
оболочки)

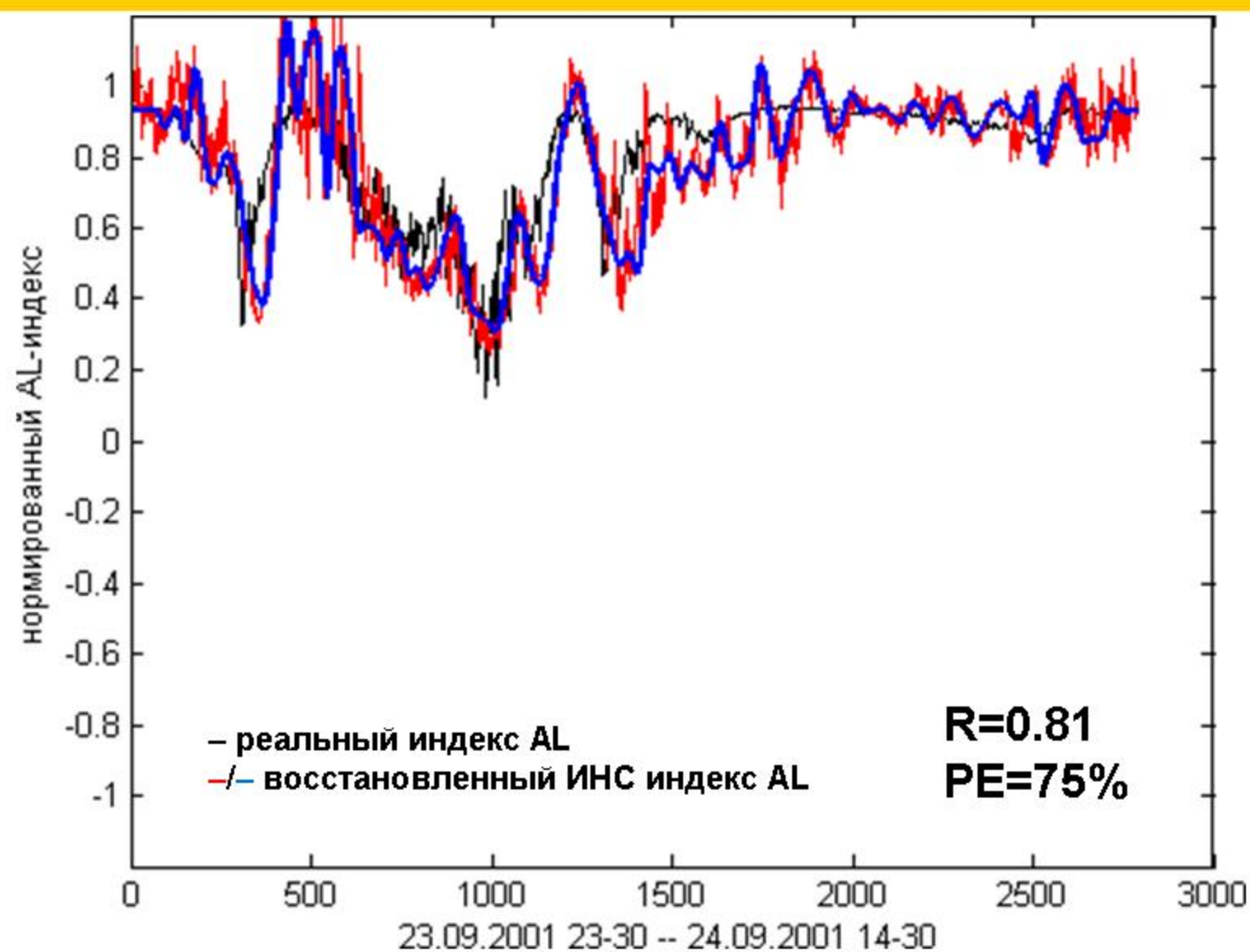


Рис. 2. Демонстрация восстановления AL
(быстрое облако 15.06.2005 с ударной волной и оболочкой)

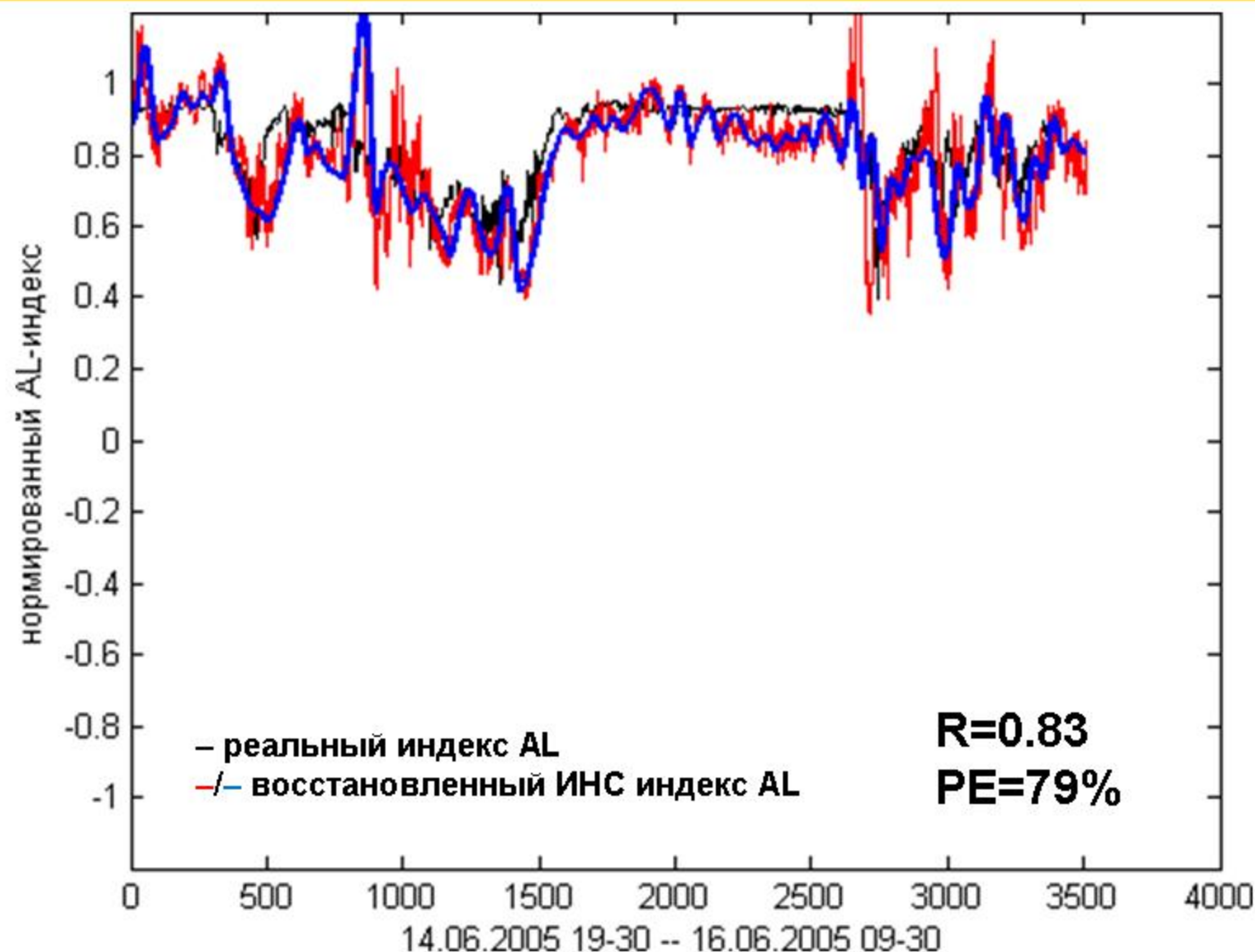
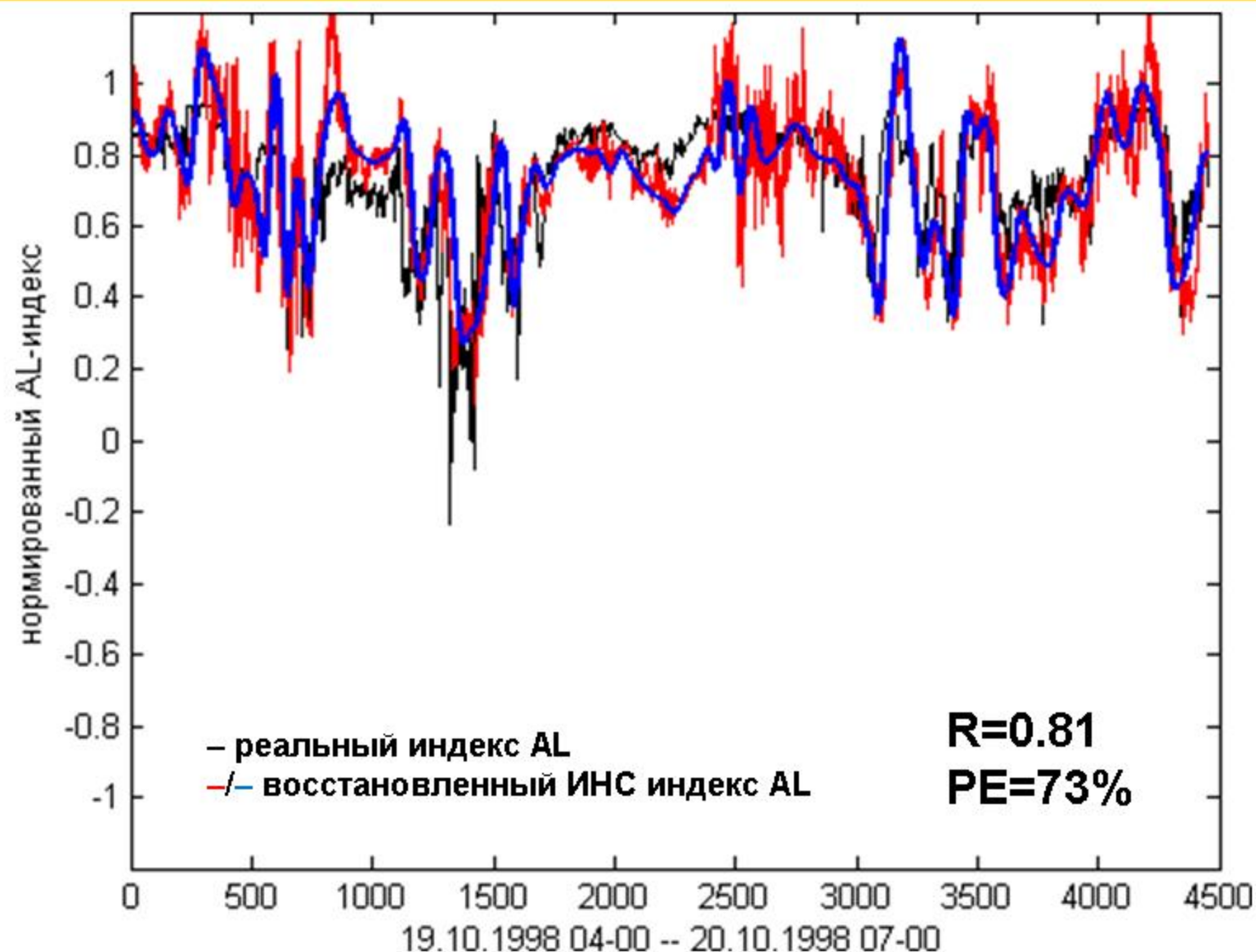


Рис. 3. Демонстрация восстановления AL
(быстрое облако 20.10.1998 с ударной волной и оболочкой)



Нейронная сеть как детектор магнитных облаков солнечного ветра

- Созданные ИНС 1-2, использующие динамику V_y и V_z компонент ММП в интервалах отвечающих магнитным облакам, способны успешно восстанавливать динамику AL-индекса
- Возможность использование ИНС в качестве детектора магнитных облаков показана на данных группы 3, отвечающих изолированным суббурям **заведомо не отвечающим магнитным облакам**.

Таблица 2

Обучающий массив	Количество экспериментов по восстановлению AL	Средние значения R и PE для восстановления AL (ИНС №2) (в скобках улучшение в сравнении с ИНС №1)	Демонстрация
группа 3 НЕ МО	70	группа 3, R=0.33 (0.21), PE=12% (12%) Не восстанавливается	Рис. 4
группа 1,2,3	33+19+70	группа 1, R=0.66 (0.13), PE=52% (21%) группа 2, R=0.74 (0.12), PE=65% (14%) группа 3, R=0.29 (0.15), PE=5% (5%) Не восстанавливается	Рис. 5

Обучение по 3 группе не дает успешного восстановления 3 группы.
Обучение по всем событиям не дает успешного восстановления 3 группы
Обучение по всем событиям дает восстановление умеренного качества 1 и 2 групп

Рис. 4. Демонстрация восстановления суббури 11.11.1996 из 3 группы (**не МО**) при обучении по 3 группе (не успешно)

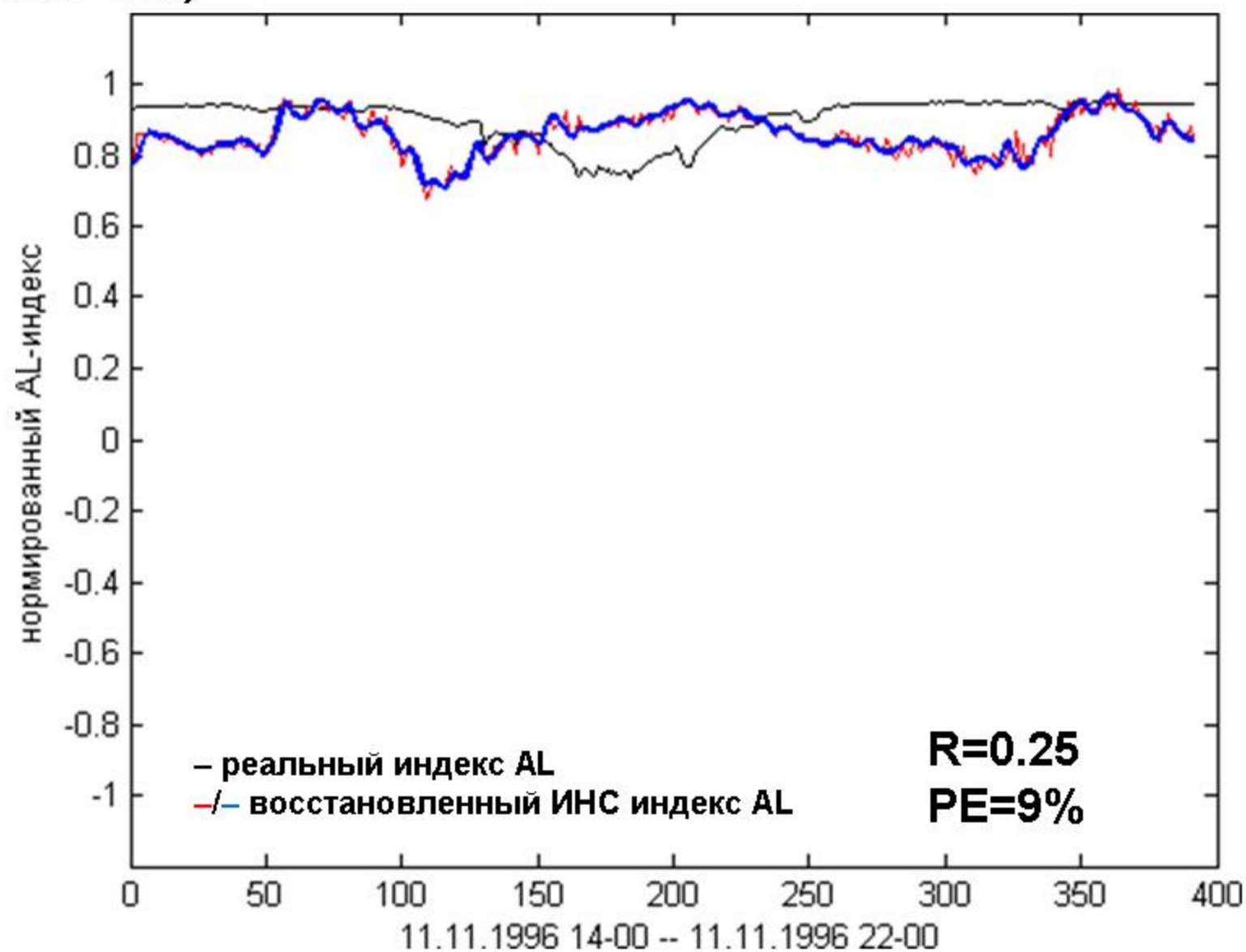
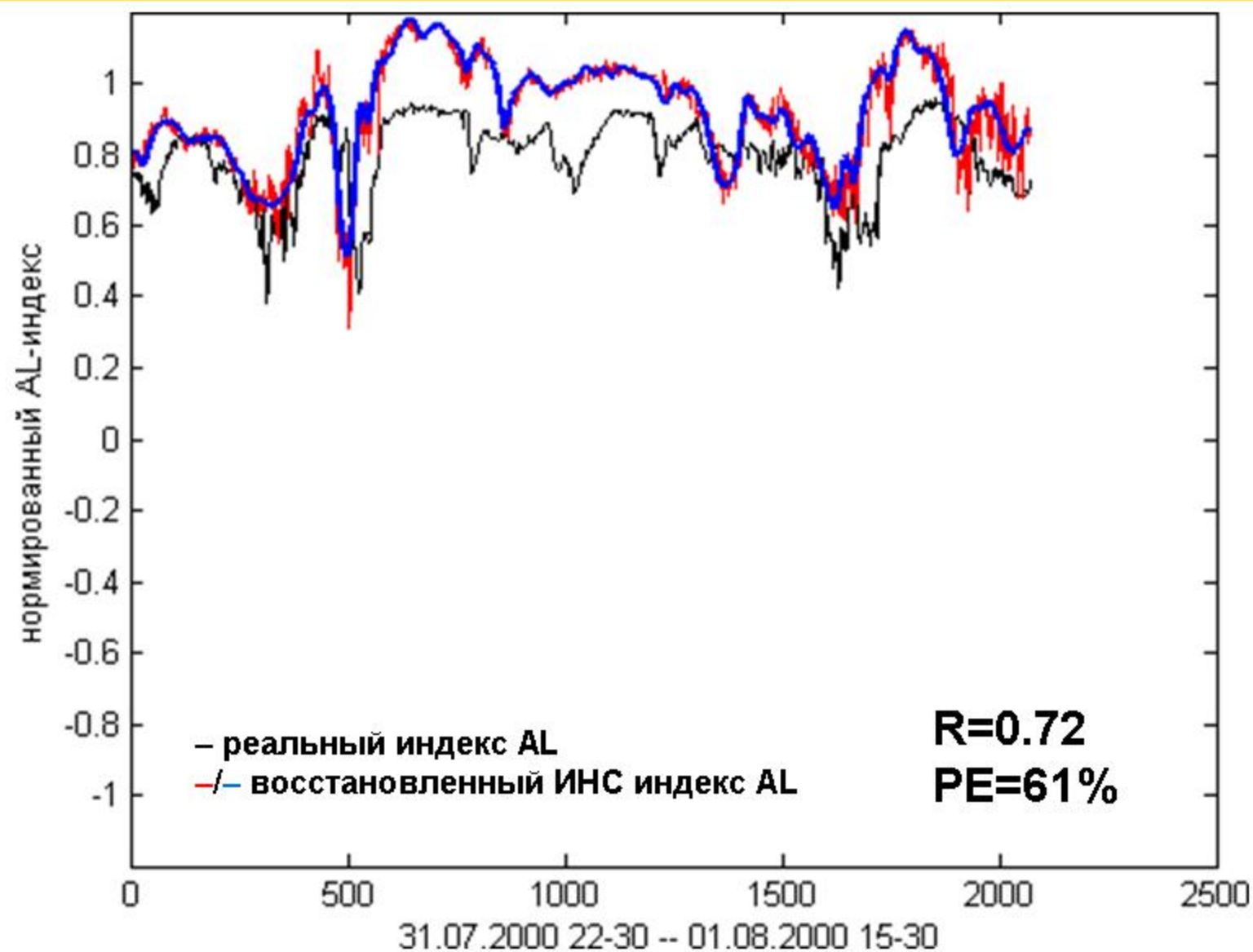


Рис. 5. Демонстрация восстановления суббури
11.11.1996 из 2 группы (**медленное МО**)
при обучении по 1, 2, 3 группам



Учет интегральных параметров в нейросетевой модели

□ Архитектура ИНС №0 с применением интегрального параметра на входе испытана здесь на интервалах магнитных облаков.

□ Входные последовательности для ИНС №0:

Vz компонента ММП и интегральный параметр $\Sigma[N \cdot V^2]$ (учтена предыстория процесса накачки кинетической энергии в магнитосферу).

Результаты численных экспериментов

Обучающий массив	Количество экспериментов по восстановлению	Средние значения R и PE для восстановления ИНС №0 (в скобках изменение по сравнению с ИНС №2)	Демонстрация
группа 1 с УВ	33 (не успешно)	R=0.54(-0.30), PE=47(-32)%	Рис. 6
группа 2 без УВ	19 (успешно)	R=0.92(0.00), PE=75(+2)%	Рис. 7
группа 3	70 (успешно)	R=0.93(+0.60), PE=75(+63)%	Рис. 8

Динамика AL-индекса на интервалах отвечающих **быстрым облакам** с УВ и оболочками (группа 1) восстанавливаются ИНС №0 хуже (PE < 50%), чем ИНС №2.

Оболочка облаков приводит к взрывному росту интегрального параметра, что дестабилизирует ИНС №0.

Динамика AL-индекса на интервалах отвечающих **медленным облакам** без УВ и оболочек (группа 2) эффективно восстанавливаются ИНС №0 (применен интегральный параметр).

НАПОМНИМ: ИНС №2 не восстанавливает динамику AL-индекса на интервалах не отвечающих МО.

**Рис. 6. ИНС №0: Плохое восстановление динамики AL.
Быстрое облако 15.07.2000 с ударной волной и оболочкой**

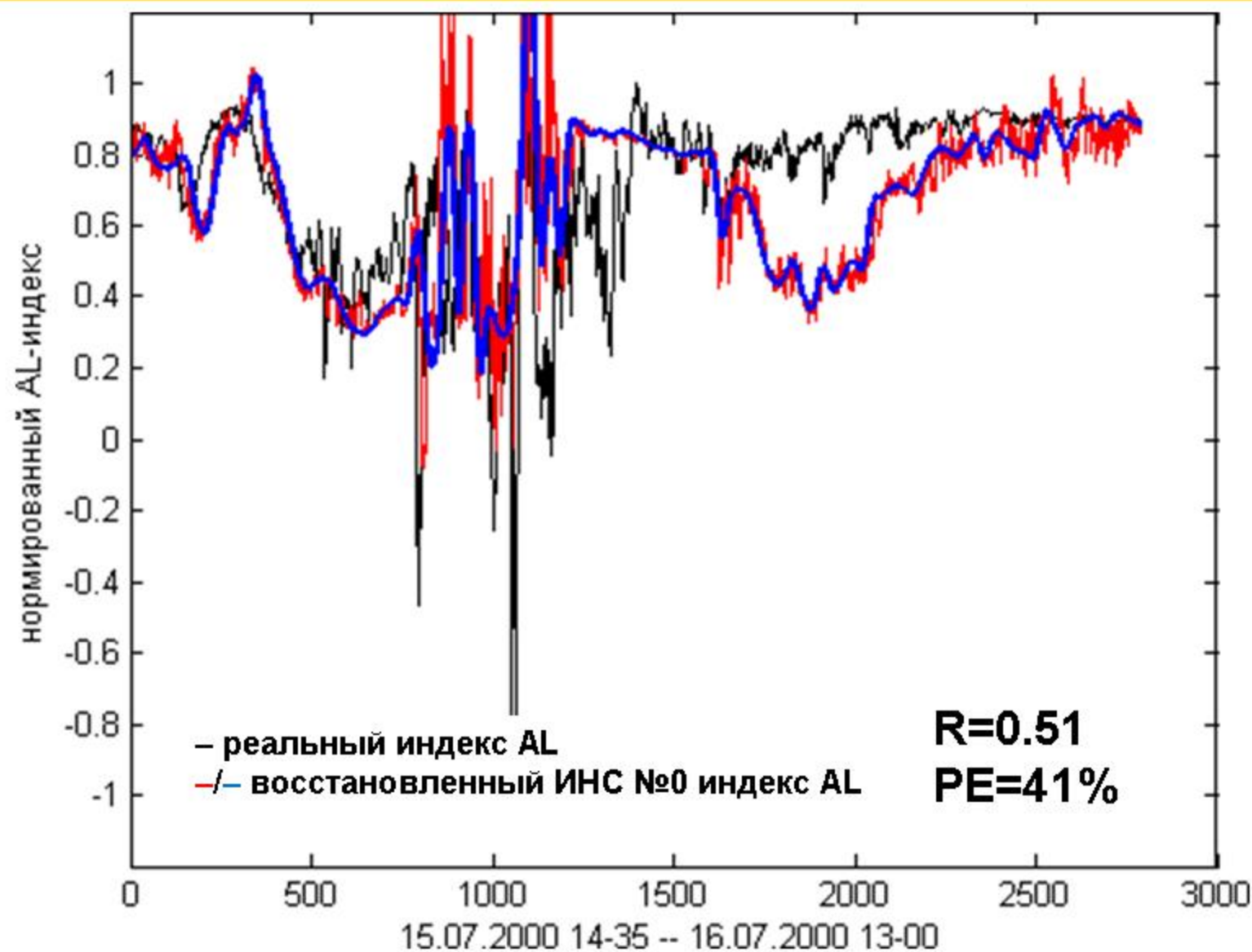


Рис. 7. ИНС №0: Восстановление динамики AL.
Медленное облако 06.02.2006 без ударной волны и оболочки)

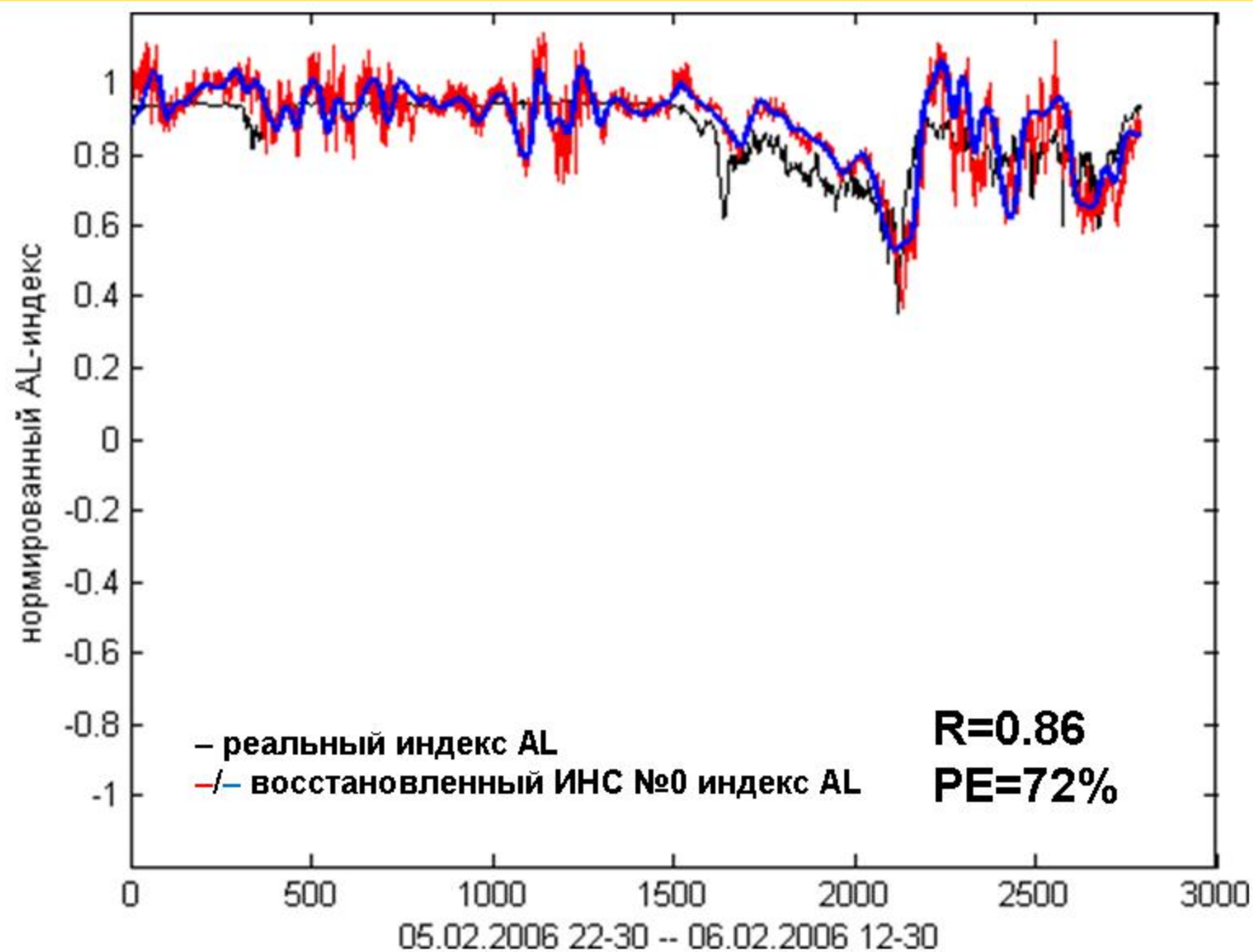
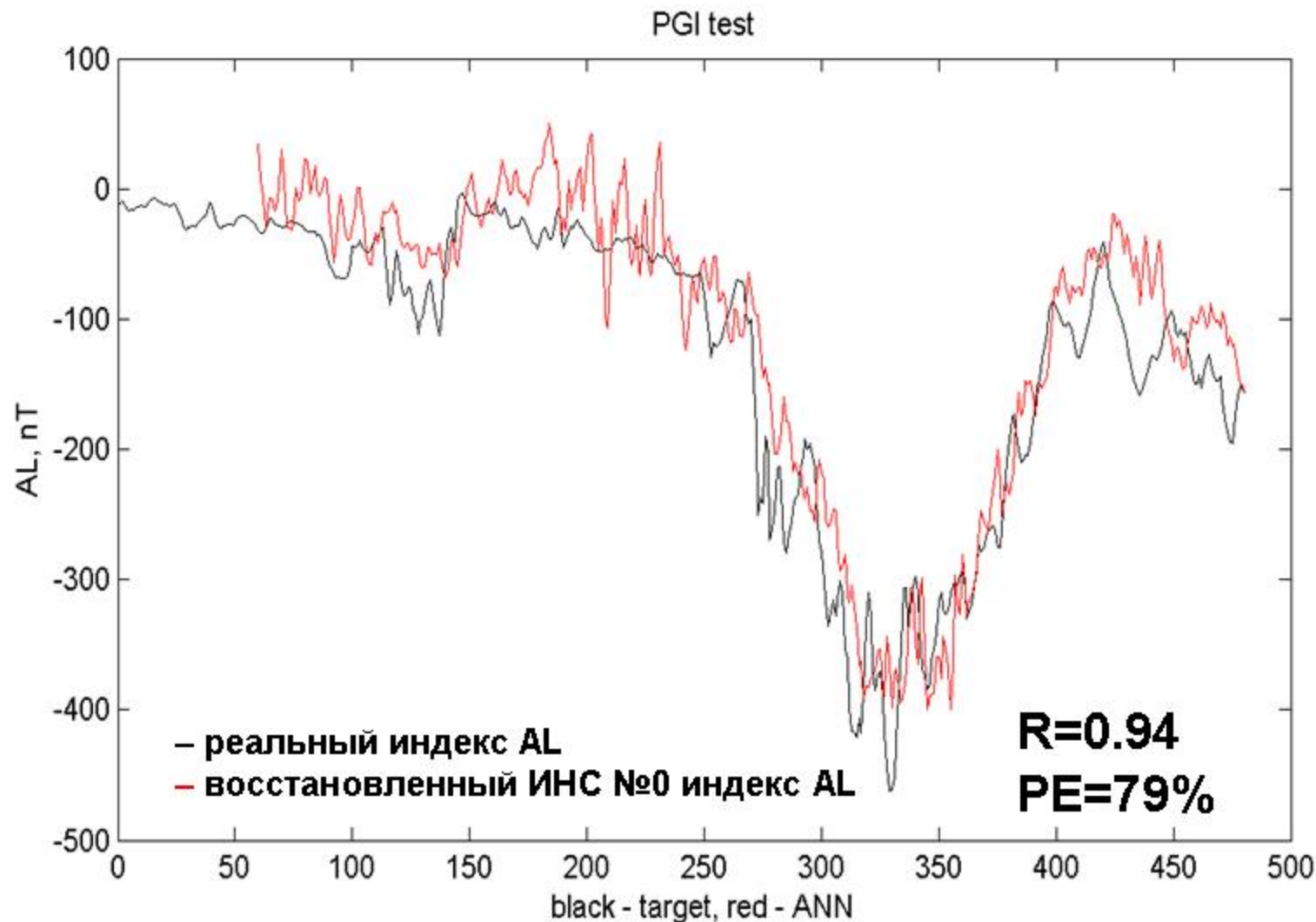


Рис. 8. ИНС №0: Восстановление динамики AL
Изолированная суббуря 29.11.2007



29.11.2007 09:00 - 29.11.2007 17:00

Выводы

1. Создан алгоритм (ИНС №0) восстановления динамики AL-индекса или его краткосрочного прогнозирования по онлайн-данным патрульного КА и учете загрузки авроральной магнитосферы кинетической энергией солнечного ветра для возникновения суббурового процесса.
2. Достигнуто успешное восстановление изменений AL индекса в интервалы суббурь: **показана роль интегрального индекса для процесса развития суббури.**
3. Входные параметры нейросетевой модели в виде компонент ММП V_y и V_z в магнитном облаке с учетом 90 минутной предыстории достаточны для восстановления последовательности AL-индекса: **есть нелинейная связь AL с динамикой V_y и V_z в магнитном облаке.**
4. Успешная генерация AL-индекса на выходе этой нейросетевой модели происходит на интервалах данных, отвечающих только магнитным облакам: ИНС №2 - **детектор магнитных облаков.**
5. Магнитные данные **других потоков снижают качество восстановления динамики AL.**