

DOI: 10.51981/2588-0039.2024.47.007

## УЧЕТ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПОЛЯРНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОЛИРОВАННЫХ СУББУРЬ

Н.А. Бархатов<sup>1</sup>, С.Е. Ревунов<sup>1</sup>, О.М. Бархатова<sup>2</sup>, В.Г. Воробьев<sup>3</sup>, Е.А. Ревунова<sup>2</sup>, О.И. Ягодкина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

<sup>2</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

<sup>3</sup>Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

### Аннотация

Выполнена классификация 106 событий изолированных магнитосферных суббурь по временным характеристикам фаз суббури совместно с данными о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Результаты классификации демонстрируют причинно-следственные связи суббуревой активности с характеристиками потока солнечного ветра, натекающего на земную магнитосферу. При этом используются комбинации параметров солнечного ветра, учитывающие процесс загрузки кинетической энергии солнечного ветра в полярную магнитосферу. Нейросетевые эксперименты показали, что динамические параметры суббуревой активности содержат в себе информацию о характеристиках плазменных потоков. Это выразилось в обнаружении классов изучаемых образов, отвечающих физическим представлениям о генерации высокоширотной геомагнитной активности.

### Введение

Классификация геомагнитных суббурь, а также развитие фундаментальных теорий их возникновения, представляет научный интерес, так как это способствует лучшему пониманию взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли. В работе [1] по результатам визуального анализа вариаций геомагнитного поля в высоких широтах предложено разделение суббурь на 5 типов в зависимости от значений  $B_z$ -компоненты ММП до и в период начала фазы развития суббури. Авторы уделяют основное внимание суббурям, фаза развития которых проходила при южной ориентации ММП (тип 1) и суббурям, начало которых ассоциировалось с поворотом на север  $B_z$ -компоненты ММП (тип 3). В исследовании [2] выполнена автоматическая нейросетевая классификация аналогичного набора изолированных суббурь также на 5 классов, с учетом признаков, характеризующих особенности генерации различных суббуревых фаз. Анализ полученных классов позволил сформулировать их особенности и сделать физические выводы. Однако, при использовании в качестве классификационных признаков только продолжительностей фаз, их причинно-следственные связи с параметрами солнечного ветра и ММП, учитывались косвенно.

В настоящем исследовании нейросетевая классификация выполнена с прямым учетом параметров солнечного ветра и поэтому такой подход должен отражать существующую в суббуревом процессе их причинно-следственную физическую связь. При этом рассмотрение динамики суббури и всех её фаз крайне затруднительно, если учитывать только мгновенные значения основных параметров межпланетного магнитного поля и плазмы солнечного ветра ( $B_z$ ,  $N$ ,  $V$ ), так как процесс постепенного накопления в магнитосфере магнитной энергии солнечного ветра протекает в условиях непрерывного поступления в магнитосферу кинетической энергии частиц ( $NV^2$ ) солнечного ветра ( $N$  – плотность, а  $V$  – скорость солнечного ветра). Ранее в работе [3] для описания процесса формирования суббури и прогнозирования ее динамики было предложено использование интегрального параметра в виде кумулятивной суммы  $\sum NV^2$  наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра. Однако, данный параметр может быть использован не только для прогнозирования, но и для классификации магнитосферных суббурь. Таким образом в данной работе классификация изолированных суббурь выполняется при учете продолжительности фазы зарождения, фазы развития и фазы восстановления суббури, длительности всей суббури, а также значений  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля, кумулятивного параметра  $\sum NV^2$ , амплитудных значений индекса  $AL$  и электрического поля  $E$  в потоке солнечного ветра. Цель исследования заключается в демонстрации того, что суббуревая динамика по  $AL$ -индексу содержит в себе информацию о характеристиках натекающего

плазменного потока. Выполненное классификационное нейросетевое исследование образов, представляющих собой временные характеристики суббуревых фаз и параметров солнечного ветра и ММП, демонстрирует это.

### **Используемые данные и технология классификации**

В исследовании рассмотрено 106 изолированных суббуревых событий различной интенсивности в период с 1995 по 2012 гг. по данным каталога NASA (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov>). Отбор суббурь по вариациям 1-мин значений AL индекса выполнен в работе [1]. Классификационные нейросетевые эксперименты проводились с использованием нейросети ранее уже обученной на четырех классификационных признаках суббури [2]: продолжительность фазы зарождения (P1), фазы развития (P2), фазы восстановления (P3) суббури и длительность всей суббури в целом (P4). При сохранении числа учитываемых признаков мы теперь привлекаем и ряд других параметров, а именно, Vz-компоненту ММП, кумулятивный параметр  $\sum NV^2$  (вычислен за 2 часа до начала развития суббури), амплитуду индекса  $AL_{max}$  и электрического поля  $E_{max}$  солнечного ветра. Применяемая нейросеть содержит зафиксированные для нее ранее оптимальные весовые коэффициенты на входах и в её слоях. Задача по обнаружению классов суббурь в случае применения других признаков должна, как и ранее отвечать следующим критериям/ограничениям:

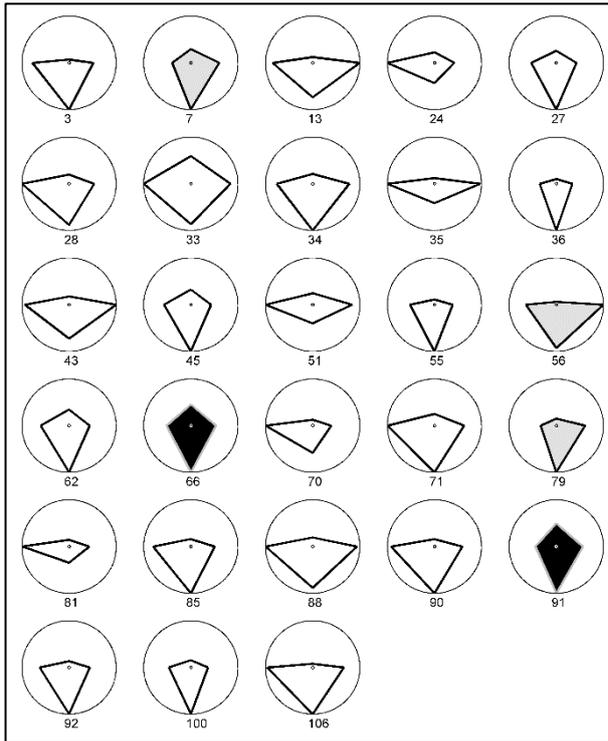
1. Количество входов нейросети (классификационных параметров) должно быть всегда равно 4;
2. Количество классов, на которые нейросеть пытается разделить выборку из имеющихся событий всегда равно 5;
3. Применение исходных классификационных параметров (P1, P2, P3, P4) позволяет получить эталонную/референсную картину классификации, с которой следует сравнивать классификационные исходы при других наборах параметров;
4. Замену исходных классификационных параметров (P1, P2, P3, P4) классификационными признаками (Vz,  $\sum NV^2$ , AL, E) организуем последовательно, с целью выяснения вклада каждого нового параметра;
5. Результаты каждого классификационного эксперимента с определенным набором параметров сравниваем с референсной картиной классификации и делаем соответствующие выводы.

### **Нейросетевые результаты численных классификационных экспериментов**

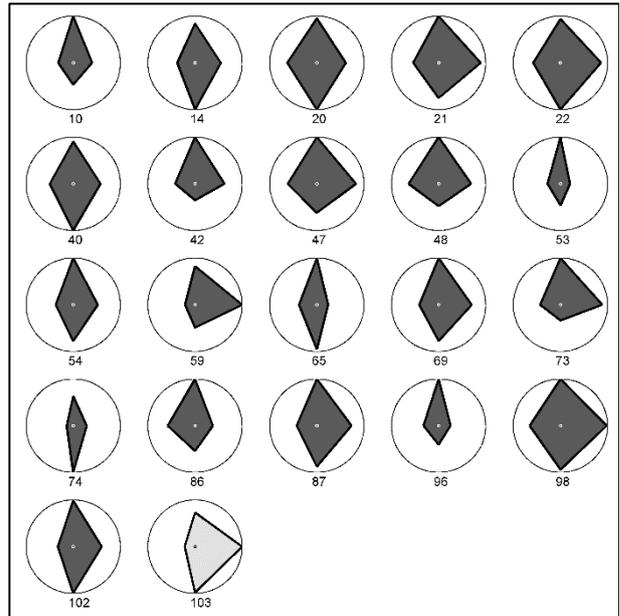
Демонстрация полученных результатов выполнена с помощью разработанного в [4] алгоритма визуализации данных. Он позволяет представлять графическими образами существующие причинно-следственные связи. На рисунках 1–5 демонстрируются данные лучшего эксперимента, для которого наблюдается максимальное совпадение результатов классификации при использовании набора параметров (P1, P2, P3, Vzmax) с референсной картиной классификации (84 из 106 событий или 79%). Визуальную оценку можно выполнить по цветовой кодировке классов: класс 1 – белый в черной рамке (суббури с продолжительным развитием и восстановлением и с укороченной фазой зарождения), класс 2 – темно-серый в черной рамке (суббури с продолжительной фазой зарождения), класс 3 – белый в серой рамке (суббури с равновеликими фазами), класс 4 – черный в серой рамке (суббури с продолжительной фазой развития), класс 5 – светло-серый в черной рамке (суббури с короткой фазой восстановления). Под каждым графическим образом указан номер суббуревых события. Погрешности в определении классов по новому набору данных обнаруживаются при перемешивании событий из разных классов.

### **Обсуждение результатов**

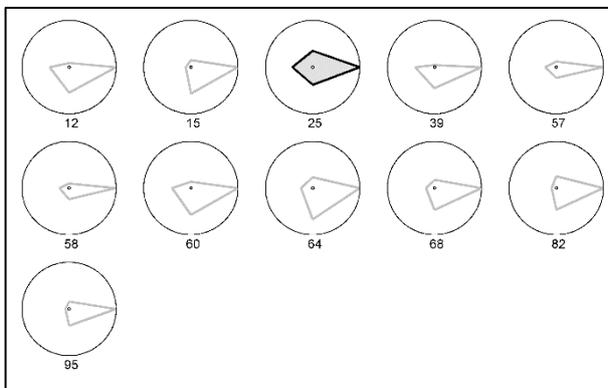
Как показали эксперименты, учет кинетической энергии солнечного ветра через кумулятивный параметр  $NV^2$  является ключевым элементом для выявления особенностей воздействия космических плазменных потоков на высокоширотную магнитосферу. Использование интегрального параметра в виде кумулятивной суммы  $\sum NV^2$  наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра позволяет точнее моделировать эти воздействия и разрабатывать методы защиты от их негативных последствий. Это важно для обеспечения безопасности космических полетов, защиты сотовых сетей и других систем связи, а также сохранения работоспособности космических аппаратов в условиях повышенной солнечной активности. При использовании разных наборов параметров, продемонстрировано, что исследуемые конфигурации динамики AL-индекса содержат в себе информацию о характеристиках плазменных потоков. Показано, что в комбинациях классификационных параметров всегда фигурируют продолжительности фазы зарождения и фазы развития суббури.



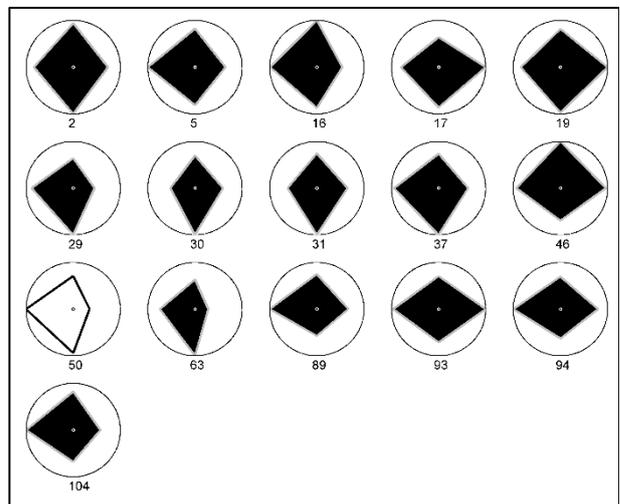
**Рисунок 1.** Новый класс 1 включает суббури с продолжительным развитием и восстановлением и с укороченной фазой зарождения.



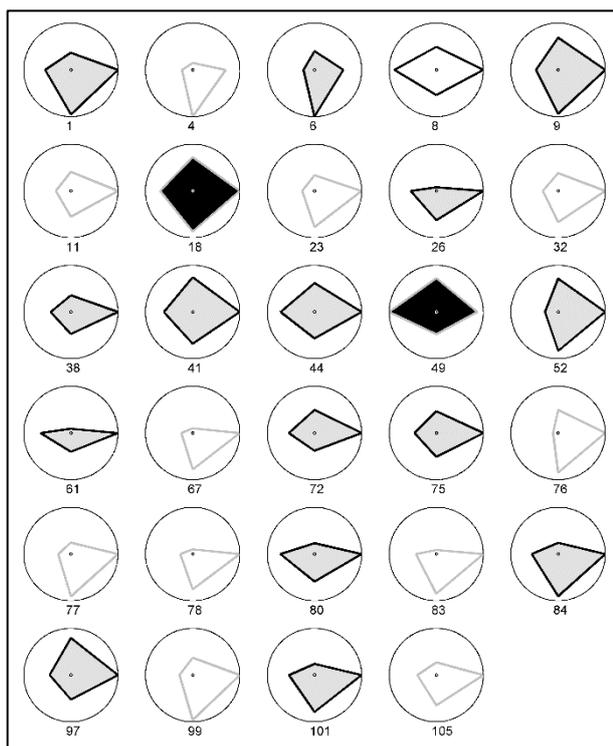
**Рисунок 2.** Новый класс 2 включает суббури с продолжительной фазой зарождения.



**Рисунок 3.** Новый класс 3 включает суббури с равновеликими фазами.



**Рисунок 4.** Новый класс 4 включает суббури с продолжительной фазой развития.



**Рисунок 5.** Новый класс 5 включает суббури с короткой фазой восстановления.

### Список литературы

1. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 721–732. 2016.
2. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Бархатова О.М., Ревунова Е.А., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Классификация изолированных суббурь при учете условий генерации и характеристик фаз // Космич. исслед. 2024. (принято в печать)
3. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 3. С. 273–279. 2017.
4. Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E., Barkhatova O.M., Revunova E.A., Yagodkina O.I. Neural network classification of substorm geomagnetic activity caused by solar wind magnetic clouds // Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics. 205. 105301. 2020.