

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.36-39

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ, ВЫЗЫВАЕМОЙ МАГНИТНЫМИ ОБЛАКАМИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Н.А. Бархатов<sup>1</sup>, В.Г. Воробьев<sup>2</sup>, С.Е. Ревунов<sup>1</sup>, И.С. Ундалова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина,  
г. Нижний Новгород

<sup>2</sup>ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия

**Аннотация.** С помощью искусственной нейросети (ИНС) типа слоя Кохонена выполнена классификация образов причинно-следственной связи суббуревой активности с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля отвечающими солнечным потокам типа межпланетное магнитное облако (ММО) в интервалы их воздействия на земную магнитосферу. Исследование выполнено с использованием минутных данных, отвечающих интервалам наблюдений 33 ММО, зарегистрированных в 1998-2012 гг. Для каждого интервала ММО анализировались параметры солнечного ветра, компоненты вектора межпланетного магнитного поля (ММП), а также значения SYM/H и AL индексов магнитной активности. На основе имеющихся данных была создана информационная база, включающая в себя 34 параметра. Анализ классификационных результатов позволяет отождествлять выделенные классы суббурь с конкретной комбинацией возмущений параметров солнечного ветра и ММП в магнитных облаках солнечного ветра.

### 1. Введение

Согласно физическим представлениям, активные процессы на Солнце, связанные с коронарными выбросами массы, скоростными потоками, ударными волнами или иными неоднородностями в солнечном ветре вызывают динамические возмущения в магнитосфере Земли, приводящие к изменениям токовых систем в магнитосфере и ионосфере Земли. Наиболее яркими проявлениями солнечной активности на земной поверхности являются магнитные бури и магнитосферные суббури. Традиционно, наиболее эффективной для генерации суббурь считается Vz компонента ММП. Скорость ( $V$ , км/с) и плотность плазмы ( $N$ , см<sup>-3</sup>) солнечного ветра слабо меняются на временных масштабах суббури, поэтому они обычно не рассматриваются как самостоятельные источники энергии суббуревых возмущений. Однако исследования, проведенные в работах [Бархатов и др., 2017; Воробьев и др., 2018; Бархатов и др., 2019] показывают важность накопления кинетической энергии солнечного ветра в процессах формирования суббурь. Целью выполняемой работы является формирование классов суббуревых событий, каждый из которых включает в себя не только параметры динамики суббуревой активности, но и параметры среды и магнитного поля в межпланетном магнитном облаке (ММО).

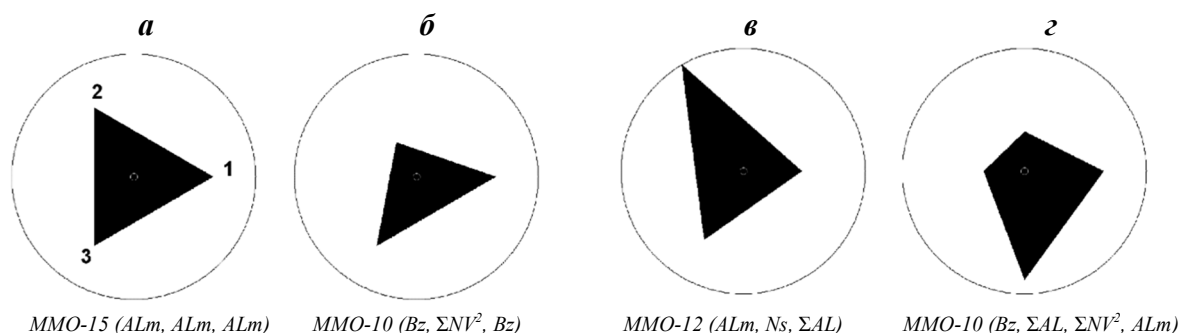
Предпринятое нами исследование опирается на применение искусственной нейронной сети (ИНС) типа слоя Кохонена. Эта ИНС классифицирует магнитную активность в авроральной зоне, регистрируемой в периоды взаимодействия магнитосферы Земли с магнитными облаками солнечного ветра. Нейросетевые эксперименты показывают, что классификация суббурь по их интенсивности (величина AL индекса в максимуме) на три класса является оптимальной для исследования причинно-следственной взаимосвязи уровня геомагнитной активности с параметрами ММО. В результате выполненного исследования показано, что уровень интенсивности магнитосферных суббурь определяется конкретным набором параметров плазмы и магнитного поля ММО.

### 2. Анализируемые данные и применяемый нейросетевой алгоритм

Выполненное исследование опирается на анализ 33 интервалов наблюдений межпланетных магнитных облаков за период с 1998 г. по 2012 г. (см. таблицу в [Бархатов и др., 2017]). Эти интервалы соответствуют магнитным облакам с ударными волнами и турбулентными областями. В пределах каждого интервала ММО с разрешением в 1 мин рассматривались параметры солнечного ветра, компоненты вектора  $V$  ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) межпланетного магнитного поля, значения Dst и AL индексов магнитной активности (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). В результате была создана база обучающих данных включавшая в себя 34 параметра для рассматриваемых интервалов магнитных облаков. Даты начала рассмотренных интервалов: ММО-1=06.01.1998; ММО-2=04.03.1998; ММО-3=01.05.1998; ММО-4=13.06.1998; ММО-5=24.09.1998; ММО-6=19.10.1998; ММО-7=18.02.1999; ММО-8=16.04.1999; ММО-9=20.02.2000; ММО-10=15.07.2000; ММО-11=10.08.2000; ММО-12=03.10.2000; ММО-13=28.10.2000; ММО-14=06.11.2000; ММО-15=19.03.2001;

ММО-16=21.04.2001; ММО-17=30.09.2001; ММО-18=18.03.2002; ММО-19=17.04.2002; ММО-20=20.03.2003; ММО-21=14.06.2005; ММО-22=13.04.2006; ММО-23=14.12.2006; ММО-24=19.11.2007; ММО-25=05.04.2010; ММО-26=28.05.2010; ММО-27=03.08.2010; ММО-28=14.02.2011; ММО-29=30.03.2011; ММО-30=05.06.2011; ММО-31=25.10.2011; ММО-32=30.09.2012; ММО-33=01.11.2012, где ММО-1, ММО-2 и т.д. номер магнитного облака с указанием даты регистрации.

Обучающая база кроме параметров плазмы и ММП включает в себя такие параметры, как угол между фронтом ударной волной магнитного облака и ММП, интегральный параметр  $NV^2$  и другие. Рассмотрены также и параметры, для которых определялся интегральный вклад в минуту, которые были получены как отношение интегральной величины параметра к продолжительности оболочки или тела облака соответственно. Для целей настоящего исследования использованы данные отвечающие только телу магнитных облаков и вызываемых ими суббуревой активности. Рассматриваются следующие параметры: продолжительность тела облака, экстремум  $B_z$ , интегральный  $B_z$ , интегральный  $NV^2$ , экстремум  $AL$ , число суббурь, интегральный  $AL$ . Классификация суббуревой активности выполнялась с помощью созданной самообучающейся нейронной сети, типа слоя Кохонена. Обучение слоя Кохонена проводится согласно принципам самоорганизации нервных клеток. Самообучение этой ИНС ведет к усилению связей между возбужденными нейронами. В результате самообучения сеть становится способной находить общее в схожих образах и записывать их в конкретный класс. Таким образом, происходит сохранение информации при уменьшении объема данных. Проведенными численными экспериментами было установлено количество классов, про которых наиболее эффективно сохраняется информация, содержащаяся в данных. Известно, что алгоритмы машинного зрения требуют индивидуальной формы представления данных для использования их в обучении ИНС. Поэтому все параметры каждого набора данных были нормированы, что дает возможность представить весь массив данных на одной шкале не потеряв информацию об интенсивности событий. Важным в представлении данных является предлагаемая нами алгоритмическая визуализация наборов классификационных параметров в виде многоугольников. Такой способ подачи материала позволяет субъективно оценивать результаты классификации и, соответственно, качество работы ИНС. На рис. 1 показаны примеры визуализации данных.



**Рисунок 1.** Представление нормированных параметров для нумерованных ММО в случаях: *а*) одного параметра, *б*) двух параметров, *в*) трех параметров, *г*) четырех параметров. Здесь  $AL_m$  – интенсивность возмущения,  $N_s$  – число суббурь

Расстояния от центра каждой, из показанных на рис. 1 единичной окружности, до вершин многоугольника являются соответствующими параметрами в пределах шкалы от 0 до 1. Номер облака показан внизу рисунка вместе с использованными параметрами. Направление обхода алгоритма визуализации параметров показано цифрами на рис. 1*а*. Теоретически возможна классификация по любому набору доступных параметров, в том числе и по всем возможным параметрам с получением 34-угольника. Поскольку физически обоснованная классификация должна содержать ограниченный набор параметров, то в качестве первого набора параметров принят визуальный образ причины каждого события (параметры ММО). Под вторым набором параметров принят визуальный образ последствий (геомагнитная реакция магнитосферы).

### 3. Установление оптимального числа классов

События проще всего классифицировать события по интенсивности магнитной активности в авроральной зоне, поэтому и был методом быстрого обучения выполнен поиск оптимального числа классов по одному параметру  $AL_m$  в интервалы всех событий. При быстром обучении каждое событие предьявляется ИНС только 1 раз, в то время, как при нормальном обучении каждое событие должно предьявляется ИНС несколько раз. Таким образом, можно заранее предположить, что будет получено 3 класса интенсивности: слабая, умеренная и сильная суббуревая возмущенность. Поэтому первый классификационный эксперимент заключался в разделении на 3 класса. Итоги такой классификации говорят о том, что в класс 2 попали события с суббурами

средней и слабой интенсивности. Это означает, что классификация выполнена неполноценно. Заданное число классов либо недостаточно для обрабатываемой выборки, либо быстрое обучение было unsuccessful. Во втором эксперименте выполняется быстрое обучение на 4 класса. В этом случае классы 1 и 4 могут быть объединены в один. Это доказывается путем нормального обучения ИНС с большим количеством обучающих циклов 800-1000. В этом случае все события устойчиво разделяются на 3 класса: слабые возмущения (условный класс 1), умеренные возмущения (условный класс 2), и сильные (условный класс 3). Поэтому все дальнейшие эксперименты выполнялись с разделением на 3 класса при количестве обучающих циклов равным 1000.

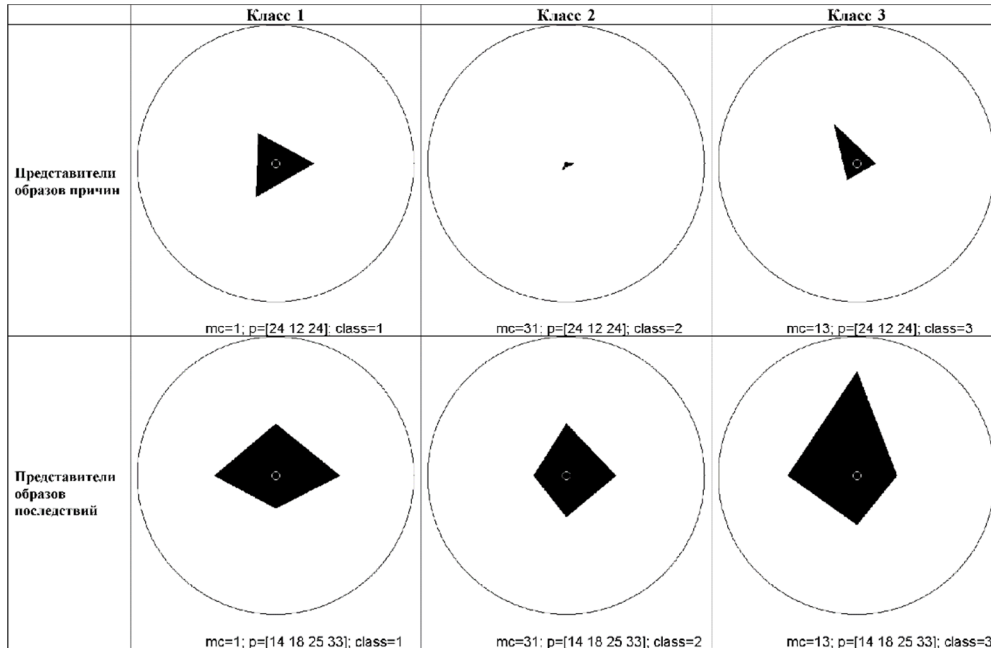


Рисунок 2. Представители каждого класса

#### 4. Классификация причинно-следственной взаимосвязи событий

Классификационные эксперименты проводились с использованием различных комбинаций параметров. Первая комбинация параметров отвечает причинам событий (характеристики межпланетной среды). С этой комбинацией работала ИНС №1, которая классифицирует параметры, относящиеся к ММО. В результате получаем классы причин. Вторая комбинация параметров имеет отношение к последствиям событий (наземная геомагнитная активность). Эта комбинация обрабатывается ИНС №2, в результате чего мы получаем классы последствий. Полученные классы причин и классы последствий сопоставлялись между собой по предлагаемой специальной методике, реализующей алгоритм, по которому вычисляется отношение числа многократно повторяемых результатов разделения  $P$  на классы к общему числу рассматриваемых событий  $S=33$ . Проведение ~2000 численных нейросетевых экспериментов дало среднее отношение  $P/S \sim 66\%$ . Это означает, что при независимой классификации причин и последствий 22 из 33 событий надежно попадают в один класс.

Оставшиеся события двигаются между классами и для них невозможно выявить однозначную причинно-следственную закономерность. Анализ этих событий показал, что они плохо классифицируются по причине своей уникальности, которая часто связана с их экстремальностью. Например, экстремальное событие Bastille Day Event (15 июля 2000 г.) Такие события составляют примерно четверть от всей выборки, в связи с чем, в дальнейшем классификация выполнялась не только на 3, но и на 4 класса. В этом случае ИНС будет использовать предоставленный ей дополнительный условный четвертый класс как коллектор нестандартных случаев. Первые три «корзины» будут содержать слабые (класс 1), умеренные (класс 2) и сильные (класс 3) события причин и следствий. При делении событий на 4 класса, этот дополнительный класс с его  $N$  нестандартными событиями, не учитывается при подсчете совпадений в трех оставшихся классах. Это означает, что классификацию следует выполнять на три класса. Каждый класс из обнаруженных классов отвечает разным событиям космической погоды с конкретной суббуревой активностью.

Исключение из рассмотрения дополнительного 4-го класса на несколько процентов улучшает соответствие результатов экспериментов на ИНС №1 и №2. Показано также, что использование во входе ИНС интегральных параметров ММП и плазмы солнечного ветра улучшает результаты классификации. Совпадение результатов классификационных численных экспериментов детектирования динамики AL по

используемым данным на двух независимых ИНС указывает на наличие тесной нелинейной связи AL индекса с выбранными параметрами облака.

#### 4. Заключение и выводы

Искусственная нейронная сеть типа слоя Кохонена использована нами для классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности, наблюдаемой в периоды взаимодействия магнитосферы Земли с межпланетными магнитными облаками, с характеристиками крупномасштабных возмущений солнечного ветра. В результате установлена реакция высокоширотного геомагнитного поля, определяемого AL индексом на ММО имеющих различные характеристики. Полученные классы визуализированы образами в виде треугольников, отражающих наборы причинно-следственных параметров. Каждый набор содержит возмущения параметров солнечного ветра и магнитного поля в межпланетных магнитных облаках и вызывающую ими суббуревую активность. В результате выполненной классификации установлены три класса причинно-следственных комбинаций. Для лучшего представления форм полученных образов событий на рис. 2 показаны представители каждого класса.

**Первый класс** содержит динамику индекса AL отвечающую уединенным слабым суббурям с экстремумами до -800 нТл при медленно изменяющейся Vz компонентой магнитного поля в теле ММО. При этом интегральная величина Vz меняется со скоростью порядка 2 нТл в мин.

**Второй класс** отвечает умеренным проявлениям суббуревой активности в динамике индекса AL в виде уединенных суббурь или серий суббурь с экстремумами до -1600 нТл. Он содержит в качестве причины резкие изменения Vz компонент в теле ММО со скоростью изменения интегральной величины Vz в интервале 7 - 11 нТл в мин.

**Третий класс** соответствует экстремальным проявлениям суббуревой активности в виде серий суббурь с экстремальными значениями  $|AL| > 2300$  нТл. Он содержит резкие изменения Vz компоненты в теле ММО, как и у второго класса, но со значительным ростом величины  $\Sigma V^2$  с темпом  $3 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-2}$  в мин.

В результате исследований сделан вывод, что использование в качестве входных параметров ИНС комбинаций параметров позволяет определять уровни ожидаемой интенсивности индекса AL с точностью до ~70%. Возможность нейросетевого выявления причинно-следственных классов указывает на тесную нелинейную связь динамики AL индекса с параметрами ММО. Разработанные нейросетевые алгоритмы могут быть применены для успешного восстановления AL индекса в периоды как изолированных магнитосферных суббурь, так и серий суббурь, регистрируемых при воздействии магнитных облаков различных типов на земную магнитосферу. Исследование продемонстрировало возможность классификации суббуревой активности (интенсивности и динамики) на основе учета интегральных параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Параметры плазмы и магнитного поля межпланетных магнитных облаков и динамики суббуревой активности, формирующие различные классы, могут быть использованы для уточнения физических моделей воздействия на магнитосферу Земли потоков солнечной плазмы от различных солнечных источников. Созданная модель восстановления AL индекса может быть применена в качестве детектора магнитных облаков.

**Благодарности.** Работа Воробьева В.Г. выполнена при поддержке Программы Президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития». Работа Ундаловой И.С. поддержана грантом РФФИ №18-35-00430. Работа Бархатова Н.А., Ревунова С.Е. выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки РФ №5.5898.2017/8.9.

Авторы благодарят администрацию вэб-узлов <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/> и <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> за предоставление свободного доступа к размещенным на них материалам и базам данных.

#### Список литературы

1. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57. № 3. С. 273–279.
2. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. Влияние параметров плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэрномия. 2018. Т. 58. № 3. С. 311–323. Doi:10.7868/S001679401803001X.
3. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Бархатова О.М., Ягодкина О.И. Суббуревая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Геомагнетизм и аэрномия. 2019. Т. 59, № 4. С. 427–436. Doi:10.1134/S0016794019040047.