

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.007

НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЧИННО – СЛЕДСТВЕННОЙ СВЯЗИ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Н.А. Бархатов¹, В.Г. Воробьев², Е.А. Ревунова³, О.И. Ягодкина², И.С. Ундалова¹

¹Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина

²ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

³Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация

В работе представлены результаты развития метода классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности по индексу AL с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля для солнечных потоков типа магнитное облако (МО). Классификация выполнялась искусственными нейросетями типа слоя Кохонена. Успешность выявления конкретных причинно-следственных классов, содержащих совместные параметры причин суббуревой активности и ее развития, указывает на нелинейные характеристики связи динамики AL индекса с параметрами в теле МО. Важным является то обстоятельство, что результаты нейросетевой классификации вполне согласуются с физическими представлениями о процессах развития суббури.

Введение и развитие метода причинно-следственной классификации

Магнитные облака (МО) солнечного ветра согласно современным представлениям вызывают наиболее интенсивные геомагнитные бури. Этим объясняется интерес к изучению магнитных облаков различными научными группами [1]. В зависимости от скорости облака относительно солнечного ветра на переднем фронте его тела может образовываться ударная волна, за которой следует турбулентная область, часто называемая оболочкой облака. Исследования показывают, что для большинства магнитных облаков начало соответствующих им геомагнитных возмущений приходится на ударную волну и оболочку [2-3]. Упомянутые исследования касаются изучения конкретных событий воздействия магнитных облаков на геомагнитные явления. Установлено, что магнитосферные суббури несут в себе информацию о динамике параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. При этом наиболее эффективной для генерации суббури считается Vz компонента межпланетного магнитного поля (ММП). При этом источником энергии суббури являются скорость (V , км/с) и плотность плазмы (N , см⁻³) солнечного ветра.

Наш подход к изучаемой проблеме заключается в подтверждении отмеченных ранее физических закономерностей нейросетевыми методами причинно-следственной классификации связи суббуревой активности с параметрами магнитных облаков. Принимая во внимание скорость и плотность плазмы солнечного ветра нам удалось выполнить успешный нейросетевой прогноз динамики AL-индекса магнитной активности в периоды изолированных суббурь [4]. Предлагаемый математический процесс имеет физическое обоснование, которое означает, что при формировании суббури происходит переход накопленной кинетической энергии солнечного ветра в ее энергию при участии возмущения Vz компоненты ММП. Наиболее эффективный прогноз вариаций AL индекса был реализован, если в качестве входных последовательностей для искусственной нейронной сети (ИНС) использовался интегральный параметр $\Sigma[NV^2]$, учитывающий предысторию процесса накачки кинетической энергии солнечного ветра в магнитосферу, а также вариацию Vz компоненты ММП [4]. Новые возможности поиска причинно-следственных связей динамики параметров магнитосферы и межпланетной среды использованы в работе [5], где нейросетевая технология применена для классификации создаваемых образов причинно-следственной связи суббуревой активности с воздействием крупномасштабных солнечных потоков типа магнитное облако на земную магнитосферу. Полученные при этом классификационные результаты демонстрируют отождествление выделенных классов суббурь с возмущениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, отвечающих телам магнитных облаков.

Классификация причинно-следственной связи суббуревой активности с магнитными облаками солнечного ветра выполнялась искусственными нейросетями типа слоя Кохонена. Изучаемые образы представляли собой соответствующие минутные данные, отвечающие интервалам наблюдений МО во время их воздействия на земную магнитосферу. Эти события в [5] подвергались отдельной классификации по параметрам причин (параметры, относящиеся к МО) и последствий (параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы). Полученные классы сопоставлялись специальным алгоритмом. В

случае совпадения класса комбинаций причинных параметров с классом суббуревое следствия, класс объявлялся установленным. Всего было обнаружено 3 класса суббуревой активности. Таким образом, показано, что исследуемые конфигурации динамики AL-индекса содержат в себе информацию о характеристиках крупномасштабного плазменного потока типа магнитное облако, в которое погружается земная магнитосфера.

В настоящем исследовании развивается упомянутый выше метод [5] классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности по индексу AL с параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля для солнечных потоков типа магнитное облако. Для этого выполняется уже совместная причинно-следственная нейросетевая классификация параметров солнечного ветра и ММП в теле МО с вызываемой им суббуревой активностью. При этом ставилось целью установить степень согласованности получаемых классов с классами, установленными в [5]. Изучаемые образы представляли собой соответствующие минутные данные, отвечающие интервалам наблюдений 23 МО, зарегистрированных в 1998-2012 гг. в интервалы их воздействия на земную магнитосферу. Эти события подвергались отдельной классификации по параметрам причин (параметры, относящиеся к МО) и последствий (параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы). Полученные классы сопоставлялись специальным алгоритмом. В случае совпадения класса комбинаций причинных параметров с классом суббуревое следствия, класс объявлялся установленным.

Алгоритмы нейросетевой классификации

Проверка справедливости полученной в [5] классификации образов включающих в себя параметры солнечного ветра и ММП для тел МО, а также геомагнитного отклика в виде вызываемой ими суббуревой активности, выполняется совместной причинно-следственной нейросетевой классификации. При этом устанавливается степень согласованности получаемых классов с классами, определенными нами ранее в [5] для интервалов воздействия на земную магнитосферу 33 магнитных облаков. Таким образом в работе использованы те же минутные данные взятые с узла <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov> и отвечающие интервалам наблюдений этих межпланетных магнитных облаков, зарегистрированных в 1998-2012 гг. Для каждого интервала МО анализировались параметры солнечного ветра: концентрация N и скорость плазмы V и компоненты вектора $B(B_x, B_y, B_z)$ межпланетного магнитного поля в GSM системе координат, а так же значения SYM/H и AL индексов магнитной активности. Интервалы взяты с разной продолжительностью, определяемой параметрами магнитных облаков. Начало и конец каждого события МО определялись по общедоступным каталогам. Экстремумы и интегральные значения физических переменных вычислялись за весь анализируемый интервал, индивидуальный для каждого МО.

Совместная классификация предполагает подтверждение полученных ранее в [5] результатов, но не путем сопоставления результатов работы двух независимых ИНС, а на единой нейросети типа слоя Кохонена. Для этой цели предложен алгоритм поиска комбинации параметров для наилучшей согласованности установленных ранее классов и классов полученных совместной классификацией. Суть алгоритма заключается в количественном анализе нейросетевых результатов классификации одного и того же набора событий. Алгоритм подсчитывает процентное соотношение «попаданий» одного и того же набора событий в один класс. Если в ранее установленный старый класс попали все события, полученные в результате новой совместной классификации, то такая ситуация соответствует 100% и наилучшей комбинации параметров для согласованности установленных ранее классов и классов, полученных совместной классификацией.

На практике оказалось, что подобрать входные комбинации параметров и получить при этом высокий процент согласованности – сложная задача. Кроме того, в трех ранее полученных классах содержится разное количество событий. Так, в первом классе – 4 события (условный вес каждого события $1/4$), во втором – 13 событий ($1/13$), в третьем – 6 событий ($1/6$). После перебора всех возможных комбинаций параметров и при учете перемешивания событий в новой классификации удалось получить такие максимально возможные проценты согласованности: для первого класса $1/4 * 4$ (все события из старого класса) минус $1/13 * 3$ (добавились три события из старого второго класса) итого $0,77$ (77%); для второго класса $1/13 * 8$ (все события из старого класса) итого $0,62$ (62%); для третьего класса $1/6 * 6$ (все события из старого класса) минус $1/13 * 2$ (добавились два события из старого второго класса) итого $0,85$ (85%).

В результате работы этого алгоритма было показано, что наиболее успешная совместная классификация возможна при включении в расчет следующих параметров: экстремум B_z , экстремум $NV2$, интегральный $NV2$, интегральный SYM/H , экстремум AL , интегральный AL . Учет этих параметров позволил достичь наибольшей согласованности с результатами [5] для трех ранее установленных классов. Класс 1 проявляется в динамике индекса AL в виде уединенных слабых суббурь с медленно изменяющейся B_z -компонентой в теле МО с точностью 77%. Класс 2 – умеренные проявления суббуревой активности в динамике индекса AL в виде уединенных или серий суббурь, вызываемых интенсивными изменениями B_z в теле МО с точностью 62%. Класс 3 – экстремальные проявления суббуревой активности в виде серий суббурь с экстремальными значениями индекса AL , отождествляемые со значительным ростом интегральной величины $NV2$ в теле МО с точностью 85%. Каждый выделенный класс представляет собой причинно-следственную связь типов

суббурь с конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и ММП в теле магнитного облака. Результаты нейросетевой классификации вполне согласуются с физическими представлениями о процессах развития суббурь. Они представлены на рис. 1 в виде диаграммы типа «радар», где каждый угол отсчитывается от центра на расстояние, соответствующее уровню параметров. Отсчет параметров начинается справа и далее по кругу против часовой стрелки.

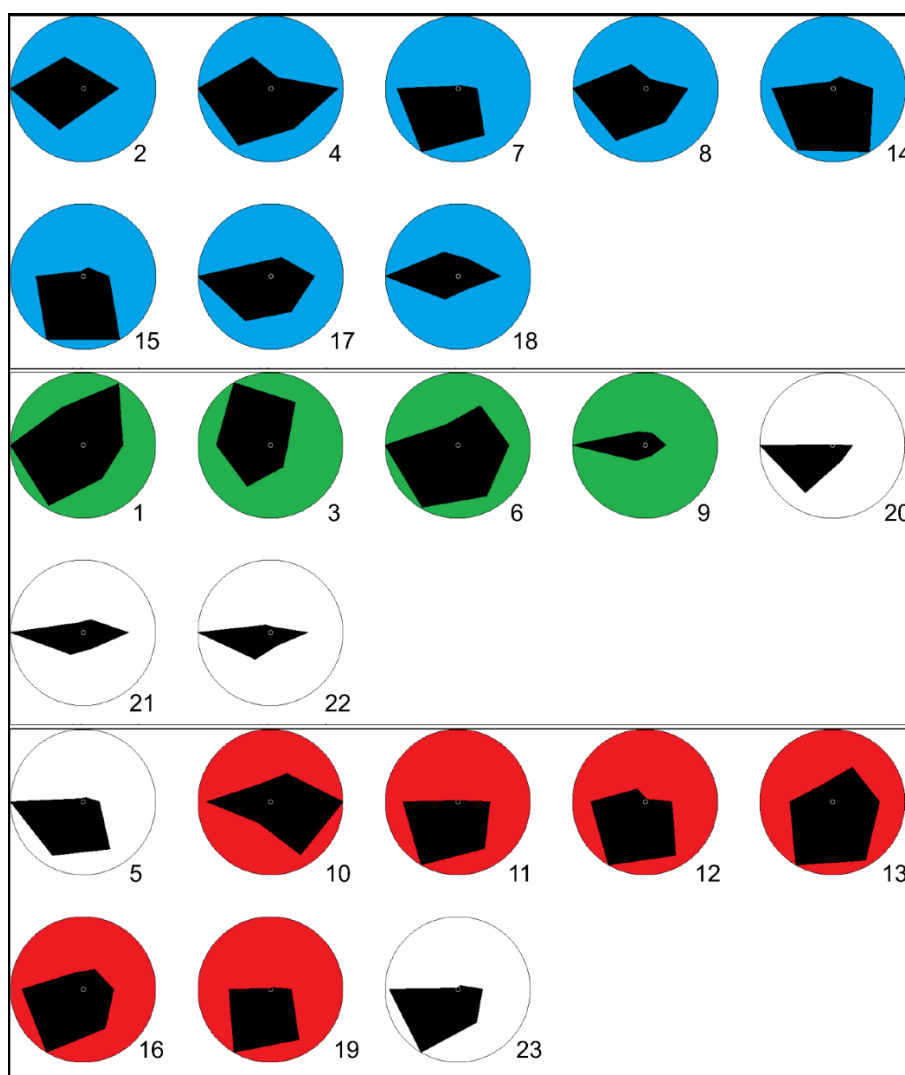


Рисунок 1. Результаты совместной классификации событий, ассоциированных с телами МО. Одинаковым цветом в каждой группе (синий – класс 1, зеленый – класс 2, красный – класс 3) показаны согласованные с предыдущим результатом в [5] случаи. Числами указаны номера событий МО из таблицы 1. Порядок построения данных: экстремум B_z , экстремум NV^2 , интегральный NV^2 , интегральный SYM/H , экстремум AL , интегральный AL .

Заключение и выводы

Численные эксперименты показали, что наиболее успешная совместная классификация возможна при включении в расчет следующих параметров: экстремум B_z , экстремум NV^2 , интегральный NV^2 , экстремум AL , интегральный AL . В число используемых параметров для новой классификации был включен индекс глобальной геомагнитной активности вычисляемой на основе SYM/H . Учет этого параметра позволил достичь наибольшей согласованности с результатами по определению трех ранее установленных классов. Класс 1 проявляется в динамике индекса AL в виде уединенных слабых суббурь с медленно изменяющейся B_z -компонентой в теле МО с точностью 77%; класс 2 – умеренные проявления суббуревой активности в динамике индекса AL в виде уединенных или серий суббурь, вызываемых интенсивными изменениями B_z в теле МО с точностью 62%; класс 3 – экстремальные проявления суббуревой активности в виде серий суббурь с экстремальными значениями индекса AL , отождествляемые со значительным ростом интегральной величины NV^2 в теле МО с точностью 85%. Каждый выделенный нами класс представляет

собой причинно-следственную связь типов суббурь с конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и ММП в теле магнитного облака.

Успешность выявления конкретных причинно-следственных классов содержащих совместные параметры причин суббуревой активности и ее развития указывает на нелинейные характеристики связи динамики AL индекса с параметрами МО. Важным является то обстоятельство, что результаты нейросетевой классификации вполне согласуются с физическими представлениями о процессах развития суббурь.

Список литературы

1. Nikolaeva N.S., Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G., Dependence of Geomagnetic Activity during Magnetic Storms on the Solar Wind Parameters for Different Types of Streams: 4. Simulation for Magnetic Clouds // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 2, pp. 152-161
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, том 58, №3, с. 311-323, DOI:10.7868/S001679401803001X
3. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ундалова И.С., Нейросетевая классификация суббуревой активности, вызываемой магнитными облаками солнечного ветра // "Physics of Auroral Phenomena", Proc. XLII Annual Seminar, Apatity, 2019, pp. 36-39, DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.36-39
4. 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, том 57, №3, с. 273–279
5. 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*, 2020, Vol. 205, 105301, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105301>