

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.011

## НЕЙРОСЕТЕВОЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫХ ОБОЛОЧКАМИ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

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

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

<sup>2</sup>ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

<sup>3</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

### Аннотация

В исследовании рассмотрены особенности генерации высокоширотных геомагнитных возмущений, вызываемых оболочками магнитных облаков (МО) солнечного ветра представляющих собой горячую и плотную турбулентную плазму с сильными флуктуациями компонент межпланетного магнитного поля. Для этих целей выполнены нейросетевые классификационные эксперименты по сопоставлению динамики параметров оболочек магнитных облаков с динамикой аврорального AL-индекса еще до развития глобального геомагнитного возмущения. Результаты, полученные искусственным интеллектом, согласуются с физическими представлениями о процессах развития высокоширотной геомагнитной активности под действием турбулентной среды оболочек магнитных облаков на земную магнитосферу.

### Введение

Использование нейросетей в решении фундаментальных задач гелиогеофизики открывает новые возможности поиска причинно-следственных связей динамики параметров магнитосферы и межпланетной среды. Известно [1, 2], что исследуемые конфигурации динамики AL индекса содержат в себе информацию о характеристиках крупномасштабного плазменного потока типа МО, в которое погружается земная магнитосфера. 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 [3, 4]. Источником энергии магнитосферных суббурь является плазма солнечного ветра и межпланетное магнитное поле, содержащееся в телах МО. В настоящем исследовании применен классификационный нейросетевой подход, который использовался нами ранее [1] при анализе комплекса явлений высокоширотной геомагнитной активности (динамика индекса AL), вызываемых телом магнитного облака солнечного ветра. В качестве входных параметров для нейросетевых экспериментов были использованы интегральные компоненты ММП, показавшие свою эффективность ранее. Однако в настоящей работе мы обращаем внимание на возможность участия в динамике суббурь турбулентных оболочек МО. Турбулентные оболочки магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, являются важной причиной возникающего суббурного процесса [2]. Здесь для поиска причинно-следственных характеристик образов этой структурной части магнитного облака и динамики высокоширотной геомагнитной активности применяется ИНС типа слоя Кохонена.

### Используемые данные и методы обработки

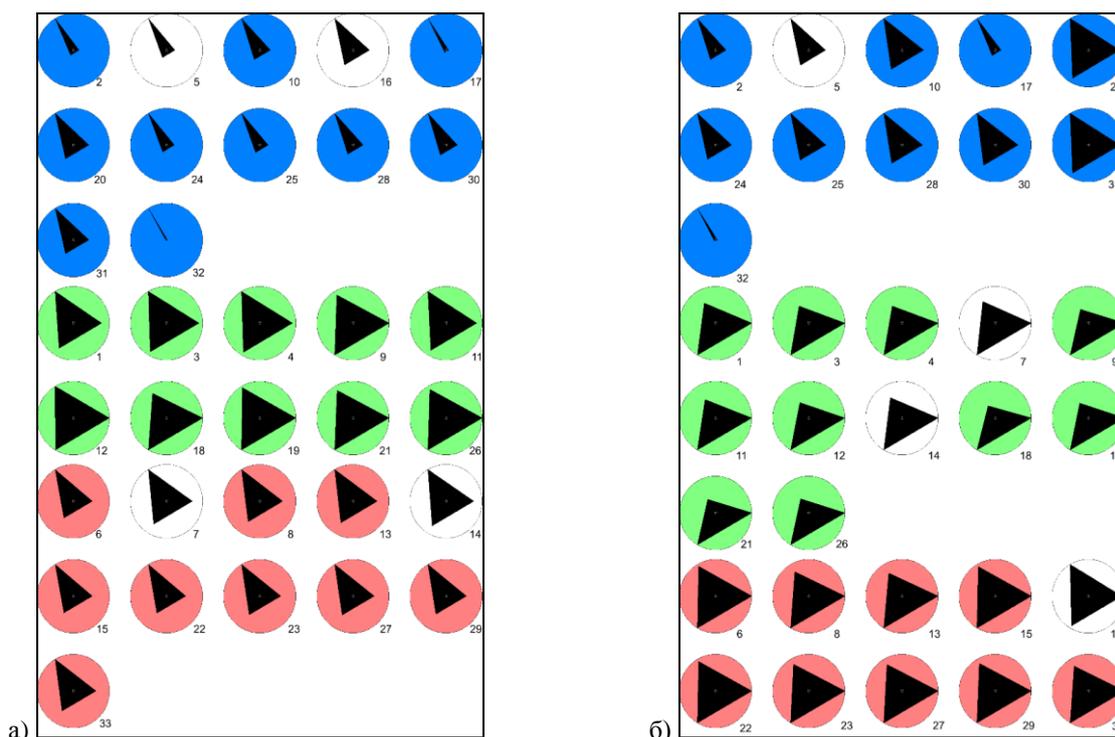
В работе использованы данные, отвечающие интервалам наблюдений 33 межпланетных магнитных облаков с оболочками, зарегистрированных в 1998-2012 гг. Информация о рассматриваемых нами магнитных облаках содержится в каталогах, опубликованных в работах [3, 4]. Данные этих каталогов проверены с помощью созданной нами программы поиска магнитных облаков в солнечном ветре, основанной на специально разработанном методе [3]. Кроме того, часть данных взята из нашего каталога [4], содержащего дополнительно обнаруженные магнитные облака. 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 оболочек магнитных облаков. Экстремумы и интегральные значения физических переменных вычислялись

за анализируемый интервал, содержащий оболочку каждого рассматриваемого МО. Все данные взяты с минутным разрешением с узла <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>.

В исследовании применен метод классификационного нейросетевого подхода к анализу комплекса явлений высокоширотной геомагнитной активности, фиксируемого по динамике индекса AL, вызываемых магнитными облаками солнечного ветра. В качестве входных параметров для нейросетевых экспериментов используются интегральные компоненты ММП, показавшие ранее свою эффективность для восстановления индекса AL [1]. Классификационные эксперименты проводились с отдельным применением комбинаций параметров, отвечающих только причинам возникновения суббурь и только динамике развития суббурь, согласно методике [1]. Для этого были созданы две разные классификационные искусственные нейросети (ИНС). Первая нейросеть классифицировала параметры, относящиеся к оболочке МО и выделяла классы причин, вторая - классифицировала параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы и выделяет классы последствий. Число классов, которое желательно получить с помощью нейросети, задавалось пользователем таким образом, чтобы лучше всего соответствовать информации, содержащейся в используемых входных данных.

### Результаты классификации

Выполняемая здесь отдельная классификация подразумевает независимую типизацию используемых данных в пространстве входных признаков задачи (параметры причин) и в пространстве выходных признаков задачи (параметры следствий). ИНС №1 классифицирует параметры, относящиеся к оболочкам МО, получает классы причин, ИНС №2 классифицирует параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы, получает классы последствий. Поиск выполнялся среди параметров причин, относящихся к оболочке МО, для ИНС №1: экстремум  $B_z$ , интегральный  $B_z$ , экстремум  $NV^2$ , интегральный  $NV^2$ , интегральный  $B_z$  в минуту, интегральный  $NV^2$  в минуту и параметров геомагнитного отклика магнитосферы для ИНС №2: интегральный AL, экстремум AL, число суббурь, наличие SSC, интегральный AL в минуту.



**Рисунок 1.** Результаты согласованной до 80% классификации событий, ассоциированных с оболочками МО на двух независимых ИНС. а) ИНС №1, результат классификации параметров причин, относящихся к оболочке МО, порядок построения данных: интегральный  $NV^2$ , интегральный  $NV^2$  в минуту; б) ИНС №2, результат классификации параметров геомагнитного отклика магнитосферы, порядок построения данных: интегральный AL, интегральный AL в минуту. Одинаковым цветом в каждой группе (синий – класс 1, зеленый – класс 2, красный – класс 3) показаны согласованные случаи. Числами указаны условные номера анализируемых событий МО.

Полученные классы сопоставлялись алгоритмом, изложенным в [1]. В случае совпадения класса комбинаций причинных параметров с классом суббурьего следствия, класс объявлялся установленным.

Алгоритм устанавливал число и соответствие классов, при которых содержащаяся в них информация наилучшим образом соответствует причинно-следственным связям. Классификационные результаты двух независимых ИНС наиболее близки при использовании параметров: интегральный  $NV^2$ , интегральный  $NV^2$  в минуту (ИНС №1) и интегральный AL, интегральный AL в минуту (ИНС №2). Показано, что классификацию имеет смысл выполнять на три класса. Обнаруженные при этом классы комплексов возмущенных параметров отвечают разным событиям космической погоды, каждый из которых соответствует конкретной суббуревой активности. При этом согласованность классов достигает 80%. Результаты классификации представлены на рис. 1. в виде диаграммы типа «радар». Первый параметр дублируется для построения плоскости диаграммы, т.к. параметров меньше трех.

Всего было обнаружено 3 сопоставляющихся класса суббуревой активности. Класс 1 отвечает взрывному росту интегрального  $NV^2$  (большие значения интегрального  $NV^2$  в минуту, значительно превышающие интегральные значения  $NV^2$ ), взрывному росту интегрального AL (большие значения интегрального AL в минуту, значительно превышающие интегральные значения AL). Класс 2 – высокие значения интегрального  $NV^2$ , высокие значения интегрального AL при низкой скорости роста интегрального AL (низкие значения интегрального AL в минуту). Класс 3 – быстрый рост интегрального  $NV^2$ , высокие значения интегрального AL. Каждый выделенный класс представляет собой причинно-следственную связь типов суббурь с конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и ММП в турбулентной оболочке магнитного облака.

### Заключение и выводы

Применение ИНС для классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности с воздействием крупномасштабных солнечных потоков типа магнитное облако на земную магнитосферу дает возможность выявлять соответствующую реакцию высокоширотного геомагнитного поля в виде индекса AL. Визуально на диаграмме типа «радар» каждое событие может быть однозначно отнесено к определенному классу, а совокупность однотипных диаграмм формирует формальный образ класса. За этими образами стоят комплексы причинно-следственных параметров, которые интерпретируются конкретным типом возмущений параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в магнитных облаках солнечного ветра и соответствующей суббуревой активностью. В результате нейросетевых экспериментов продемонстрирована успешность определения конкретных причинно-следственных классов, содержащих совместные параметры причин суббуревой активности и ее развития, которая указывает на нелинейную связь динамики AL индекса со структурными элементами МО.

Выполненное исследование продемонстрировало возможность классификации суббуревой активности (интенсивности и динамики) на основе учета интегральных параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Параметры межпланетной среды магнитных облаков и динамики суббуревой активности, формирующие обнаруживаемые классы, могут быть использованы для уточнения физических моделей воздействия на магнитосферу Земли потоков солнечной плазмы от конкретных солнечных источников. Создаваемые нейросетевые модели могут успешно применяться, как для установления непосредственной связи динамики AL индекса с элементами МО, так и для восстановления самого AL индекса в периоды изолированных магнитосферных суббурь или серий суббурь, вызываемых воздействием магнитных облаков различных типов на земную магнитосферу.

### Список литературы

1. 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, V. 205, 105301, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105301>
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 аэронавигация, 2018, Т. 58, №3, С. 311–323. DOI:10.7868/S001679401803001X
3. Бархатов Н.А., Калинина Е.А., Определение параметров магнитных облаков и прогноз интенсивности магнитных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация, 2010, Т. 50, № 4, С. 477–485
4. Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А., Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Космические исследования, 2014, Т. 52, № 4, С. 286–295
5. Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E. et al., Investigating the statistical relationship between Coronal Mass Ejections and Solar Flares // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys., 2021, V. 85, P. 234–237, <https://doi.org/10.3103/S1062873821030059>