

УДК 550.385.4

НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЙ СВЯЗИ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ СО СТРУКТУРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МАГНИТНЫХ ОБЛАКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2022 г. Н. А. Бархатов¹ *, В. Г. Воробьев², С. Е. Ревунов¹, О. М. Бархатова³,
Е. А. Ревунова³, О. И. Ягодкина²

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Нижегородский государственный педагогический университет имени К. Минина”, Нижний Новгород, Россия

²Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет”, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: nbarkhatov@inbox.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Сформированы образы причинно-следственной связи суббуревой активности с характеристиками крупномасштабных солнечных потоков типа магнитное облако, взаимодействующих с магнитосферой Земли. Для классификации этих образов применена искусственная нейронная сеть типа слоя Кохонена. Полученные классификационные результаты демонстрируют отождествление выделенных классов суббурь с возмущениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля характерными для структурных элементов магнитных облаков.

DOI: 10.31857/S036767652203005X

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные облака (МО) солнечного ветра согласно современным представлениям вызывают наиболее интенсивные геомагнитные бури. Этим объясняется интерес к изучению магнитных облаков различными научными группами [1–4]. 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 [5–7]. Упомянутые исследования касаются изучения конкретных событий воздействия магнитных облаков на геомагнитные явления. Действительно, магнитосферные суббури несут в себе информацию о динамике параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. При этом наиболее эффективной для генерации суббурь считается B_z компонента межпланетного магнитного поля (ММП). Установлено, что источником энер-

гии суббурь являются скорость (V , км/с) и плотность плазмы (N , см⁻³) солнечного ветра.

Наш подход к изучаемой проблеме заключается в поиске отмеченных ранее физических закономерностей нейросетевыми методами. В частности, принимая во внимание скорость и плотность плазмы солнечного ветра нам удалось выполнить успешный нейросетевой прогноз динамики AL -индекса магнитной активности в периоды изолированных суббурь [8]. Этот математический процесс имеет физическое обоснование, которое означает, что при формировании суббури происходит переход накопленной кинетической энергии солнечного ветра в ее энергию с участием возмущения B_z 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 B_z компоненты ММП [8].

Новые возможности поиска причинно-следственных связей динамики параметров магнитосферы и межпланетной среды использованы в работе [9], 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 только телам магнитных облаков.

Заметим, что с точки зрения математической терминологии, упомянутое исследование посвящено кластеризации многомерных данных, т.е. многомерной статистической процедуре поиска общих групп закономерностей в выборке. Однако выполняемый при этом кластерный анализ всегда решает частную задачу классификации. В то время, как наши исследования не просто демонстрируют статистику в выборке, а предлагают конкретные физические выводы и модели развития процессов. В связи с этим, во всех работах, где нами применяются сети Кохонена, мы придерживаемся термина “классификация”. Кроме того, с точки зрения понимания моделируемых процессов, мы предложили обозначить изучаемую связь термином “причина-следствие”, поскольку считаем, что обнаруженные “следствия” физически связаны с комбинацией обнаруженных “причин” и вызываются ею. Возможный в этом случае термин “предвестник-событие” скорее подразумевает некую статистическую связь события с конкретным предвестником.

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 [9] 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 суббуревых следствий, 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 метод [9] 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 для МО с вызываемой ими суббуревой активностью. При этом ставилось целью установить степень согласованности получаемых классов с классами, установленными в [9]. Другой стороной выполненного исследования является поиск комбинаций параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, отвечающих турбулентным оболочкам солнечных потоков типа МО, сопровождаемых ударными волнами, и параметров суббуревых геомагнитных откликов на них.

Полученные по предлагаемой методике результаты должны показать причинно-следственную связь суббуревых процессов с возмущениями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля характерными для структурных элементов магнитных облаков.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ИНСТРУМЕНТ КЛАССИФИКАЦИИ

Исследование выполнено с использованием данных, отвечающих интервалам наблюдений 33 межпланетных магнитных облаков, зарегистрированных в 1998–2012 гг. (см. табл. 1). 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 также 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, где в свою очередь, учитывается динамика параметров межпланетной среды. Экстремумы и интегральные значения физических переменных вычислялись за весь анализируемый интервал, индивидуальный для каждого МО.

Все данные взяты с минутным разрешением с узла <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>. Анализируемые интервалы отвечают МО, опережаемых ударными волнами и турбулентными областями. В некоторых случаях ударные волны, сформированные на первых этапах образования магнитных облаков, отрываются от тел облаков и начинают существовать независимо, сохраняя протяженные турбулизированные области — оболочки. Информация о рассматриваемых нами магнитных облаках содержится в каталогах, опубликованных в работах [10, 11]. Данные этих каталогов проверены с помощью созданной нами программы поиска маг-

Таблица 1. Даты начала интервалов, включающих в себя магнитные облака

Номер события МО	Дата начала события	Номер события МО	Дата начала события	Номер события МО	Дата начала события
1	06.01.1998	12	03.10.2000	23	14.12.2006
2	04.03.1998	13	28.10.2000	24	19.11.2007
3	01.05.1998	14	06.11.2000	25	05.04.2010
4	13.06.1998	15	19.03.2001	26	28.05.2010
5	24.09.1998	16	21.04.2001	27	03.08.2010
6	19.10.1998	17	30.09.2001	28	14.02.2011
7	18.02.1999	18	18.03.2002	29	30.03.2011
8	16.04.1999	19	17.04.2002	30	05.06.2011
9	20.02.2000	20	20.03.2003	31	25.10.2011
10	15.07.2000	21	14.06.2005	32	30.09.2012
11	10.08.2000	22	13.04.2006	33	01.11.2012

нитных облаков в солнечном ветре, основанной на специально разработанном методе [10]. Кроме того, часть данных взята из нашего каталога [12, 13], содержащего дополнительно обнаруженные магнитные облака.

В исследовании применен метод классификационного нейросетевого подхода к анализу комплекса явлений высокоширотной геомагнитной активности, фиксируемого по динамике индекса *AL*, вызываемых магнитными облаками солнечного ветра [14–17]. В качестве входных параметров для нейросетевых экспериментов используются интегральные компоненты ММП, показавшие ранее свою эффективность для восстановления индекса *AL* [18]. В данной работе применяется ИНС типа слоя Кохонена, которая реализует алгоритмы машинного зрения при самообучении на прецедентах. Число классов, которое желательно получить с помощью нейросети, задавалось пользователем таким образом, чтобы лучше всего соответствовать информации, содержащейся в используемых входных данных. При этом выполняемая здесь раздельная классификация подразумевает независимую типизацию используемых данных в пространстве входных признаков задачи (параметры причин) и в пространстве выходных признаков задачи (параметры следствий). В свою очередь, совместная классификация подразумевает типизацию данных в объединённом пространстве признаков (параметры причин и следствий).

СОВМЕСТНАЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СВЯЗИ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ МО

Проверка справедливости полученной в [9] 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 [9] для интервалов воздействия на земную магнитосферу 23 магнитных облаков.

Совместная классификация предполагает подтверждение полученных ранее в [9] 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

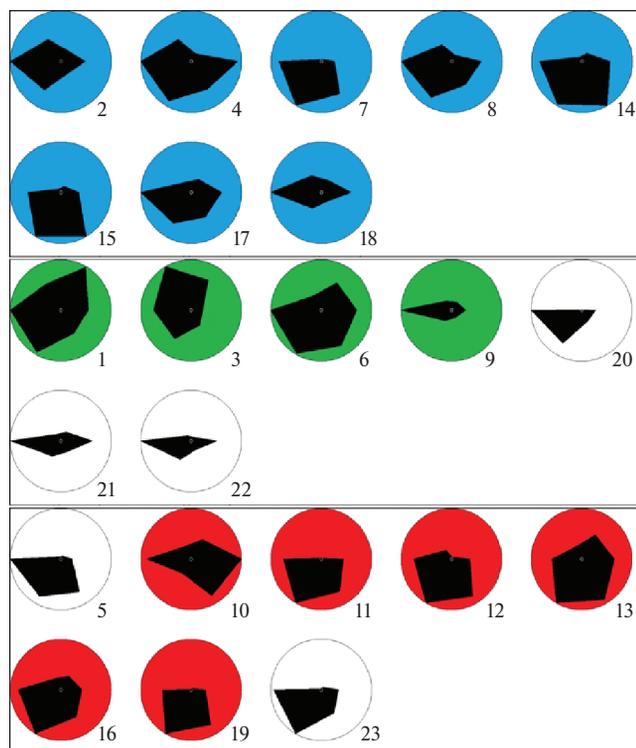


Рис. 1. Результаты совместной классификации событий, ассоциированных с телами МО. Одинаковым цветом в каждой группе (синий – класс 1, зеленый – класс 2, красный – класс 3) показаны согласованные с предыдущим результатом в [9] случаи. Числами указаны номера событий МО из таблицы 1. Порядок построения данных: экстремум B_z , экстремум NV^2 , интегральный NV^2 , интегральный SYM/H , экстремум AL , интегральный AL .

события из старого класса) итого 0.62 (62%); для третьего класса $(1/6) \cdot 6$ (все события из старого класса) минус $(1/13) \cdot 2$ (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 NV^2 , интегральный NV^2 , интегральный SYM/H , экстремум AL , интегральный AL . Учет этих параметров позволил достичь наибольшей согласованности с предыдущими результатами [9] по определению трех ранее установленных сопоставляющихся 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 значе-

ниями индекса AL , отождествляемые со значительным ростом интегральной величины NV^2 в теле МО с точностью 85%. Каждый выделенный класс представляет собой причинно-следственную связь типов суббурь с конкретным типом возмущенных параметров солнечного ветра и ММП в теле магнитного облака. Результаты нейросетевой классификации вполне согласуются с физическими представлениями о процессах развития суббурь. Результаты классификации 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.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЙ СВЯЗИ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ С ПАРАМЕТРАМИ ОБОЛОЧЕК МО

Турбулентные оболочки магнитных облаков, сопровождаемых ударными волнами, являются важной причиной возникающего суббуревоего процесса [17, 18]. В связи с этим, мы обратили отдельное внимание на поиск причинно-следственных образов для этой структурной части магнитного облака. Здесь исследование выполнялось при раздельном применении комбинаций параметров, отвечающих только причинам событий и только последствиям событий. ИНС № 1 классифицирует параметры, относящиеся к оболочкам МО, получает классы причин, ИНС № 2 классифицирует параметры, относящиеся к геомагнитному отклику магнитосферы, получает классы последствий [9]. 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.

Полученные классы сопоставлялись алгоритмом, изложенным в [9]. В случае совпадения класса комбинаций причинных параметров с классом суббуревоего 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 соответ-

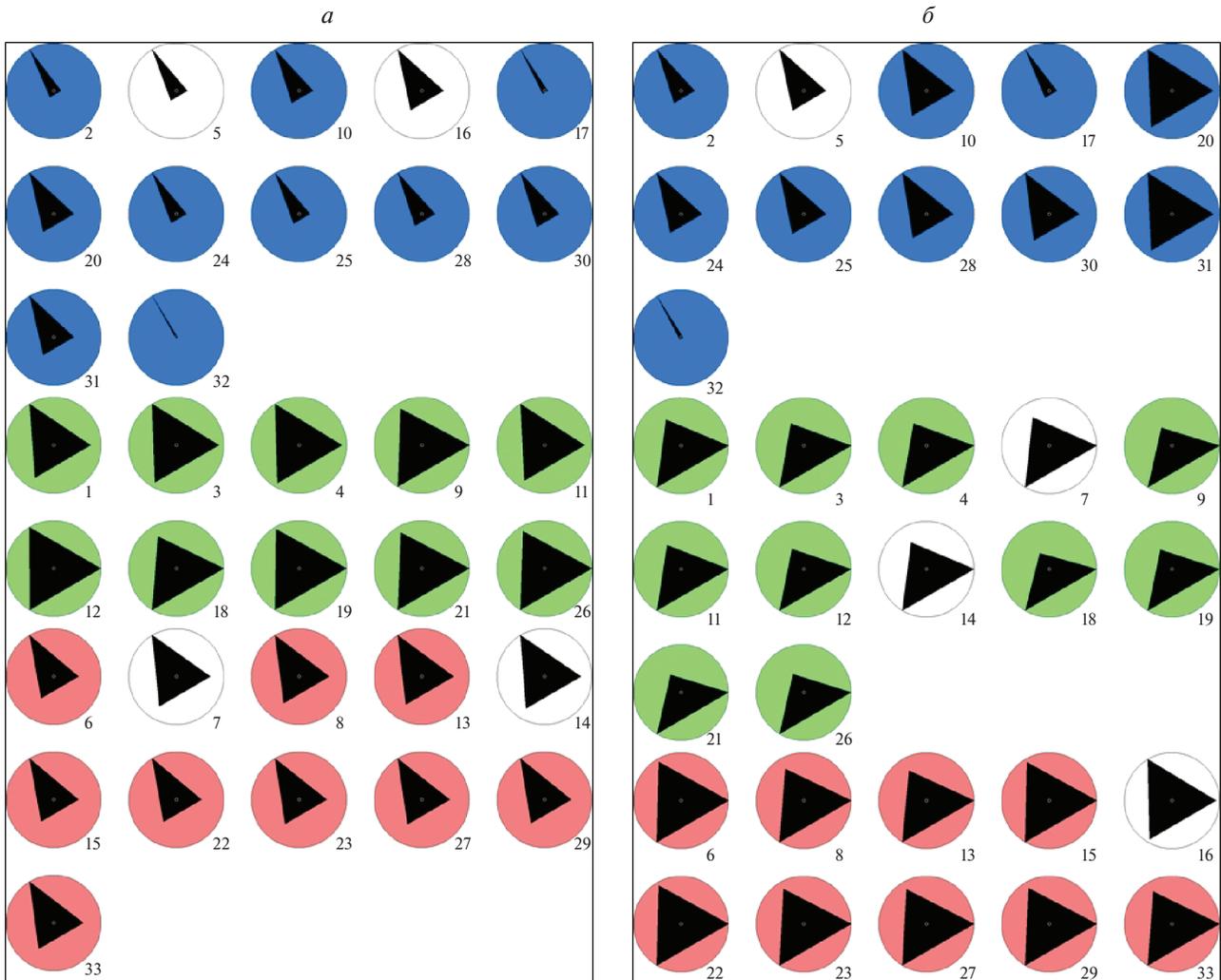


Рис. 2. Результаты согласованной до 80% классификации событий, ассоциированных с оболочками МО на двух независимых ИНС. ИНС № 1, результат классификации параметров причин, относящихся к оболочке МО, порядок построения данных: интегральный NV^2 , интегральный NV^2 в минуту (а). ИНС № 2, результат классификации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

ствует конкретной суббуревой активности. При этом согласованность классов достигает 80%. Результаты классификации представлены на рис. 2. 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

Применение ИНС для классификации образов причинно-следственной связи суббуревой активности с воздействием крупномасштабных солнечных потоков типа магнитное облако на земную магнитосферу дает возможность выявлять соответ-

ствующую 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 суббулевой активностью. В результате нейросетевых экспериментов продемонстрирована успешность определения конкретных причинно-следственных классов, содержащих совместные параметры причин суббулевой активности и ее развития, которая указывает на нелинейную связь динамики *AL* индекса со структурными элементами МО.

Выполненное исследование продемонстрировало возможность классификации суббулевой активности (интенсивности и динамики) на основе учета интегральных параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Параметры межпланетной среды магнитных облаков и динамики суббулевой 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. Кроме того, модель восстановления *AL* индекса может быть использована как детектор магнитных облаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikolaeva N.S., Yermolaev Yu.I., Lodkina I.G. // *Geomagn. Aeron.* 2014. V. 54. No. 2. P. 152.
2. Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Art. No. L07.
3. Pulkkinen T.I., Partamies N., Huttunen K.E.J. et al. // *Geophys. Rev. Lett.* 2007. V. 34. Art. No. L02105.
4. Turner N.E., Cramer W.D., Earles S.K., Emery B.A. // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2009. V. 71. P. 1023.
5. Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. et al. // *Cosmic Res.* 2020. V. 58. P. 492.
6. Lawrance M.B., Moon Y.J., Shanmugaraju A. // *Sol. Phys.* 2020. V. 62. P. 295.
7. Luhmann J.G., Gopalswamy N., Jian L.K. et al. // *Sol. Phys.* 2020. V. 61. P. 295.
8. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. // *Геомагн. и аэронаом.* 2017. Т. 57. № 3. С. 273.
9. Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E. et al. // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2020. V. 205. Art. No. 105301.
10. Бархатов Н.А., Калинина Е.А. // *Геомагн. и аэронаом.* 2010. Т. 50. № 4. С. 477.
11. Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А. // *Косм. иссл.* 2014. Т. 52. № 4. С. 286.
12. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ревунова Е.А. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 3. С. 326; Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E., Revunova E.A. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 3. P. 234.
13. Бархатова О.М., Воробьев И.Г., Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 3. С. 331; Barkhatova O.M., Vorobjev V.G., Barkhatov N.A. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 3. P. 238.
14. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Smirnova Z.V. et al. // *IJATCSE.* 2020. V. 9. No. 3. P. 3143.
15. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Cherney O.T. et al. // *E3S Web Conf.* 2020. V. 220. Art. No. 01090.
16. Barkhatov N.A., Revunov S.E., Cherney O.T. et al. // *E3S Web Conf.* 2020. V. 220. Art. No. 01091.
17. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е. и др. // *Геомагн. и аэронаом.* 2019. Т. 59. № 4. С. 427.
18. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. // *Геомагн. и аэронаом.* 2018. Т. 58. № 3. С. 311.

Neural network classification of cause and effective relationship of substorm activity with structural elements of solar wind magnetic clouds

N. A. Barkhatov^{a, *}, V. G. Vorobjev^b, S. E. Revunov^a, O. M. Barkhatova^c,
E. A. Revunova^c, O. I. Yagodkina^b

^a Kozma Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University, Nizhny Novgorod, 603002 Russia

^b Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

^c Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, 603000 Russia

*e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

Images of the causal relationship between substorm activity and the characteristics of large-scale solar fluxes such as a magnetic cloud, interacting with the Earth's magnetosphere, have been formed. An artificial neural network of the Kohonen layer type was used to classify these images. The obtained classification results demonstrate the identification of the identified classes of substorms with perturbations of the parameters of the solar wind and interplanetary magnetic field characteristic of the structural elements of magnetic clouds.