

УДК 550.385.4

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ СУББУРЬ ПРИ УЧЕТЕ УСЛОВИЙ ГЕНЕРАЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗ

© 2025 г. Н. А. Бархатов^{1,*}, С. Е. Ревунов¹, О. М. Бархатова²,
Е. А. Ревунова², В. Г. Воробьев³, О. И. Ягодкина³

¹*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
ВО Нижегородский государственный педагогический университет
им. К. Минина, Нижний Новгород, Россия*

²*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
ВО Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия*

³*Полярный геофизический институт, Анадырь, Россия*

*e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

Поступила в редакцию 15.10.2023 г.

После доработки 17.12.2023 г.

Принята к публикации 18.01.2024 г.

Выполнена нейросетевая классификация изолированных суббуль, с учетом признаков, характеризующих особенности генерации различных суббульевых фаз. Для этого были выбраны следующие классификационные признаки: продолжительность фазы зарождения, фазы развития, фазы восстановления и длительность всей суббури в целом, а также особенности поведения компоненты B_z межпланетного магнитного поля (ММП). Под последним признаком подразумевается поворот компоненты B_z ММП к югу, который определяет начало фазы зарождения суббури. Эти признаки приняты в качестве входных рядов для создаваемых самообучающихся нейросетевых моделей. Результатом работы классификационных нейросетей является формирование графических образов набора указанных классификационных признаков, каждый из которых содержит информацию о продолжительности фаз рассматриваемых суббуль. Классификационные нейросетевые эксперименты позволяют разделить суббури на пять классов. Физические особенности выделенных классов заключаются в причинно-следственных связях продолжительности суббульевых фаз с параметрами солнечного ветра и особенностями ММП.

DOI: 10.31857/S0023420625010087, EDN: HEAURK

1. ВВЕДЕНИЕ

Важной проблемой современной гелиогеофизики является моделирование и прогнозирование глобальной и суббульевой активности на основе параметров околоземного космического пространства. Известно, что основной причиной интенсивных геомагнитных суббуль выступает сильная и продолжительная (более 3 ч) отрицательная компонента межпланетного магнитного поля [1]. Она может содержаться в одной из многочисленных структур солнечного ветра или возникать в результате взаимодействия между этими структурами. Однако некоторые структуры вызывают заметные глобальные возмущения независимо от наличия в них отрицательной компоненты межпланетного магнитного поля [1–4].

Особый интерес вызывают исследования характеристик изолированных суббуль. В ряде работ предлагаются варианты классификации изолированных событий суббуль при учете признаков, характеризующих особенности условий генерации различных фаз [3]. Такие исследования учитывают общепринятую модель суббульевого процесса, когда накопление потенциальной энергии в магнитосфере в период подготовительной фазы суббури связывается с усилением крупномасштабного западного электрического поля конвекции поперек хвоста магнитосферы [5, 6]. Эта потенциальная энергия в свою очередь обусловлена кинетической энергией солнечного ветра [7, 8]. Однако процесс ее накопления вследствие поступления из солнечного ветра на подготовительном

интервале суббури, невозможно учесть на основе только мгновенных значений (Bz , N , V), где N – плотность потока солнечного ветра, V – скорость потока солнечного ветра. Его можно более точно оценить вычислением интегральной величины $\Sigma[NV^2]$, характеризующей изменение количества энергии, поступающей за один час в магнитосферу из солнечного ветра в виде кинетической энергии [1, 9]. Дальнейшее начало активной фазы суббури обычно [3] связывают с взрывным переходом накопленной потенциальной энергии магнитного поля магнитосферы в кинетическую энергию частиц радиационных поясов, ионизующих ионосферу. Предлагаемый здесь механизм формирования радиационных поясов рассмотрен в качестве возможного примера, и конечно существуют механизмы их формирования помимо суббури.

В настоящей работе изучается возможность объединения всех параметров, характеризующих как причину, т. е. структуру солнечного ветра, так и следствие, т. е. геомагнитное возмущение, через косвенные признаки. Это делается для создания классификации изолированных суббурь, учитывающей условия генерации и характеристики различных ее фаз. Используемые признаки для классификации описывают продолжительность фазы зарождения, фазы развития, фазы восстановления и длительность всей суббури. Таким образом, объектом настоящего исследования являются изолированные суббуровые события различной интенсивности и продолжительности, которые, как известно, находят свое отражение во временной динамике AL -индекса. Для этого исследуется динамика AL -индекса в интервалы времени, когда магнитосфера взаимодействует с активными потоками солнечной плазмы. Поскольку исследуемые конфигурации AL -индекса содержат в себе информацию об этих потоках и особенностях прохождения Земли через них, то возникает возможность классификации временной структуры AL -индекса при учете условий генерации и характеристик фаз суббурь. Для классификации суббурь применен метод искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяющий на основе нелинейной корреляционной обработки экспериментальных данных проводить интеллектуальное разделение входных образов на классы.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И ПАРАМЕТРЫ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Высокий интерес к нейронным сетям в последнее время вызван широким диапазоном решаемых с их помощью проблем, когда физическое моделирование усложнено учетом слишком большого числа параметров. В настоящее время метод ИНС активно применяется в задачах прогноза для различных геофизических приложений. Высокая скорость работы современных компьютеров позволяет использовать нейронные сети повсеместно, в том числе и в решении нестандартных задач. Выполнение классификации значительных массивов данных, таких, как обработка изображений и распознавание образов, сегодня уже рассматривается как тривиальная нейросетевая задача. Настоящая работа посвящена именно этой области применения ИНС – классификации образов. Особенность нашего подхода к исследованию заключается в последующей физической интерпретации получаемых результатов.

Создаваемая в работе ИНС строится по классическому принципу самообучения. Для решения поставленной задачи классификации была спроектирована и использована самообучающаяся ИНС. Архитектура этой сети построена по принципу слоя Кохонена [10–12] и представлена на рис. 1.

Цель работы нейросети заключается в классификации графических образов набора классификационных признаков. Каждый такой образ содержит информацию о соотношении продолжительностей фаз рассматриваемых суббурь. Используемые для классификации признаки описывают продолжительность фазы зарождения (параметр $P1$), длительность фазы развития (параметр $P2$), фазы восстановления (параметр $P3$)

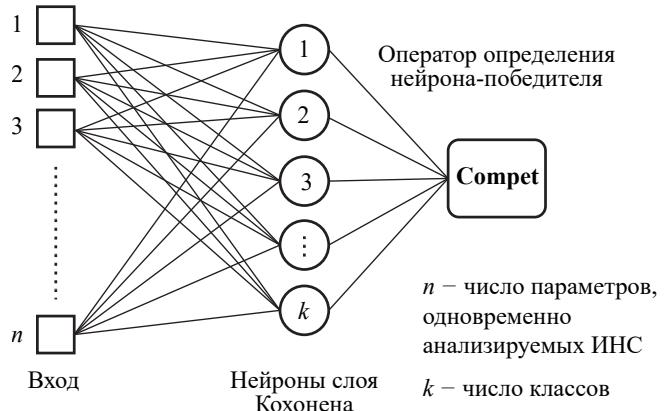


Рис. 1. Архитектура ИНС типа слой Кохонена

и длительность всей суббури в целом (параметр $P4$). Начало фазы зарождения суббури определялось поворотом к югу Bz -компоненты ММП. Перечисленные классификационные признаки характеризуют особенности условий генерации различных фаз изучаемых суббурь. Они приняты в качестве входных рядов для создаваемых самообучающихся нейросетевых моделей.

Результатом нейросетевых экспериментов является определение числа классов, которое лучше всего соответствует информации, содержащейся в используемых данных. Классификационные параметры в пределах каждой анализируемой комбинации нормируются, что позволяет представить для нейросети весь массив данных на одной шкале, сохранив информацию об интенсивности событий. В настоящей работе предлагается демонстрация массивов данных с помощью графики в виде многоугольников. Примеры визуализации комбинаций параметров, участвующих в классификации, приведены на рис. 2. Это образы в виде многоугольников. Цифрами на рис. 2а обозначены различные фазы (зарождения, развития и восстановления) суббури, величина радиуса для каждого пика треугольника соответствует относительной длительности фазы. Возможно использовать и комбинацию различных фаз, как например, четырехугольник на рис. 2г.

Для отбора изолированных суббурь были использованы следующие критерии:

- временной интервал от предыдущего возмущения не менее 3 ч;
- интенсивность магнитной бухты в максимуме $250 \text{ нТл} < \text{Max}|AL| < 1300 \text{ нТл}$;
- длительность суббури $< 3 \text{ ч}$;
- окончание суббури: время UT, после которого величина возмущения $|AL| < 0.2 \text{ Max}|AL|$.

Предварительный отбор суббурь по этим критериям проводился визуальным просмотром суточных вариаций AL -индекса, более точно начально фазы развития суббури и длительность ее фаз

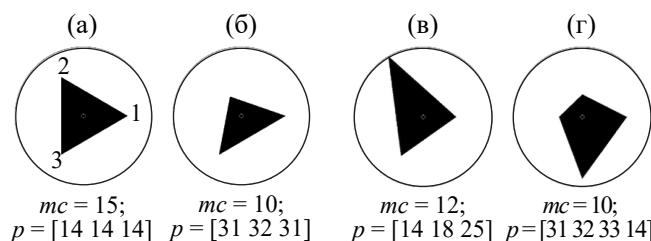


Рис. 2. Примеры визуализации комбинаций параметров

определялись специально разработанной для этой цели программой. Дополнительным признаком появления суббури являлось наличие соответствующих вариаций в индексах магнитной активности SYM/H(D) или ASYM/H(D). Согласно критериям, было отобрано 106 изолированных суббуревых событий различной интенсивности за период с 1994 по 2012 гг. по данным каталога NASA (<http://cdaw.gsfc.nasa.gov>). Предъявляемые жесткие требования к анализируемым событиям значительно сократили их количество и оставили только незамутненные. Оценка суббуревой активности и длительности фаз выполнена по минутным данным индекса AL .

3. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Признаки для классификации описывают продолжительность фазы зарождения, длительность фазы развития, фазы восстановления и всей суббури. Таким образом, результатом работы классификационной нейросети было формирование графических образов (рис. 3) набора классификационных признаков. Каждый такой

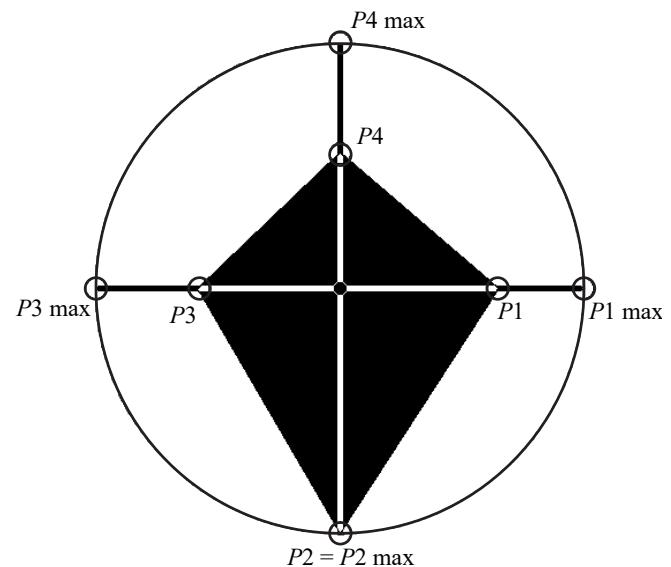


Рис. 3. Визуализация комбинаций классификационных параметров. Демонстрируются относительные величины параметров: длительность фазы зарождения (параметр $P1$), фазы развития (параметр $P2$), фазы восстановления (параметр $P3$) и длительность всей суббури в целом (параметр $P4$). В данном примере текущее значение параметра $P2$ совпадает с максимально возможным $P2 \text{ max}$ в рассматриваемой выборке суббуревых событий

образ содержит информацию о продолжительности фаз рассматриваемых суббурь. На представленном (рис. 3) образе вершина четырехугольника на 12 часах характеризует относительную длительность всей суббури, а далее по часовой стрелке идут относительные периоды длительности фазы зарождения, фазы развития и фазы восстановления. В результате нейросетевых экспериментов рассмотренные суббурь были классифицированы на пять классов.

Визуальный осмотр результатов классификации в виде групп многоугольников (рис. 4–8) согласуется с выводами, предлагаемыми ИНС. Анализ полученных данных позволяет сформулировать следующие особенности полученных классов.

Класс 1 – суббурь с продолжительными фазами развития и восстановления и с укороченной фазой зарождения (рис. 4).

Класс 2 – суббурь с продолжительной фазой зарождения (рис. 5).

Класс 3 – суббурь с равновеликими фазами (рис. 6).

Класс 4 – суббурь с продолжительной фазой развития (рис. 7).

Класс 5 – суббурь с короткой фазой восстановления (рис. 8).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Своеобразие нейросетевого инструмента заключается в отсутствии аналитических подходов и явных моделей. Несмотря на это, нейросетевые выводы вполне соответствуют реальным физическим явлениям и демонстрируют максимально компактный и вместе с тем содержательный результат. Физичность получаемых при этом результатов обеспечивается постановкой задачи, использованными данными и интерпретацией ответов нейросетей.

В настоящей статье демонстрируются возможности созданного авторами инструмента для классификации изолированных суббурь при

учете условий генерации и характеристик фаз. Примененная классификационная нейросеть выявила закономерности взаимосвязи продолжительности суббуровых фаз для рассматриваемых уединенных суббурь. При этом учитываются физические явления, приводящие к высокоширотным геомагнитным проявлениям. Сформированы графические образы наборов классификационных признаков. Каждый образ содержит информацию о продолжительности фаз рассматриваемых суббурь, обусловленных воздействием потоков плазмы солнечного ветра на магнитосферу Земли. В результате нейросетевых экспериментов такие образы суббурь были классифицированы. Факт возможности разделения суббурь на классы отражает конкретизированные состояния высокоширотной магнитосферы.

Анализ полученных результатов позволил сформулировать особенности полученных пяти классов и сделать следующие физические выводы. Класс 1 предполагает продолжительное развитие и восстановление суббури с укороченной фазой зарождения; класс 2 свидетельствует о продолжительной фазе зарождения; класс 3 демонстрирует равновеликие суббуровые фазы; класс 4 связан с продолжительной фазой развития; класс 5 содержит суббури с короткой фазой восстановления. Физические особенности обнаруженной классификации обуславливаются причинно-следственными связями продолжительности суббуровых фаз с параметрами солнечного ветра и ММП. Именно поэтому особенности обнаруженных классов составят основу дальнейших исследований физики причинно-следственных связей продолжительности суббуровых фаз с параметрами околоземного пространства.

Параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> и <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования, выполненные В. Г. Воробьевым, поддержаны фондом РНФ, проект 22-12-20017.

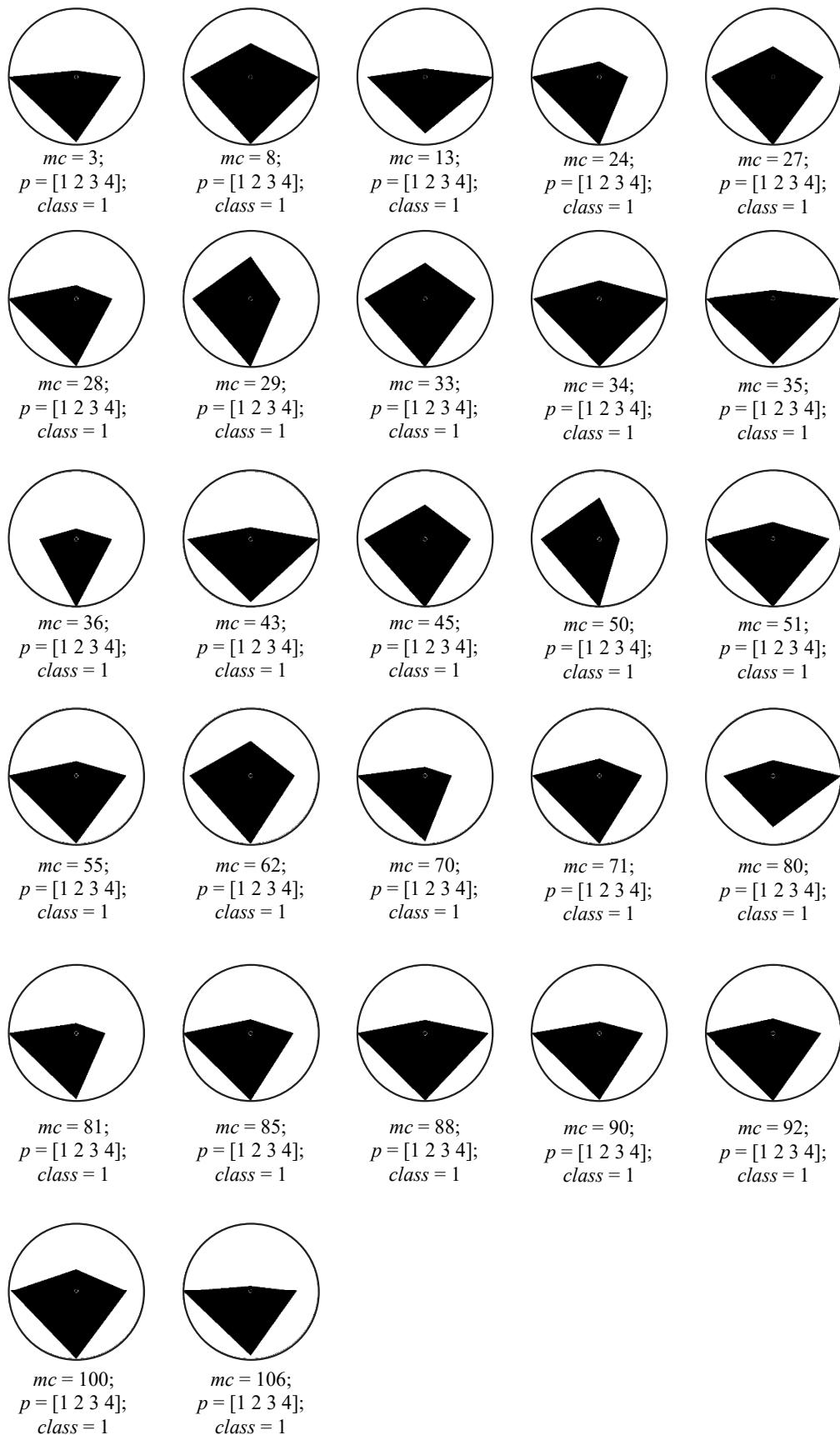


Рис. 4. Класс 1

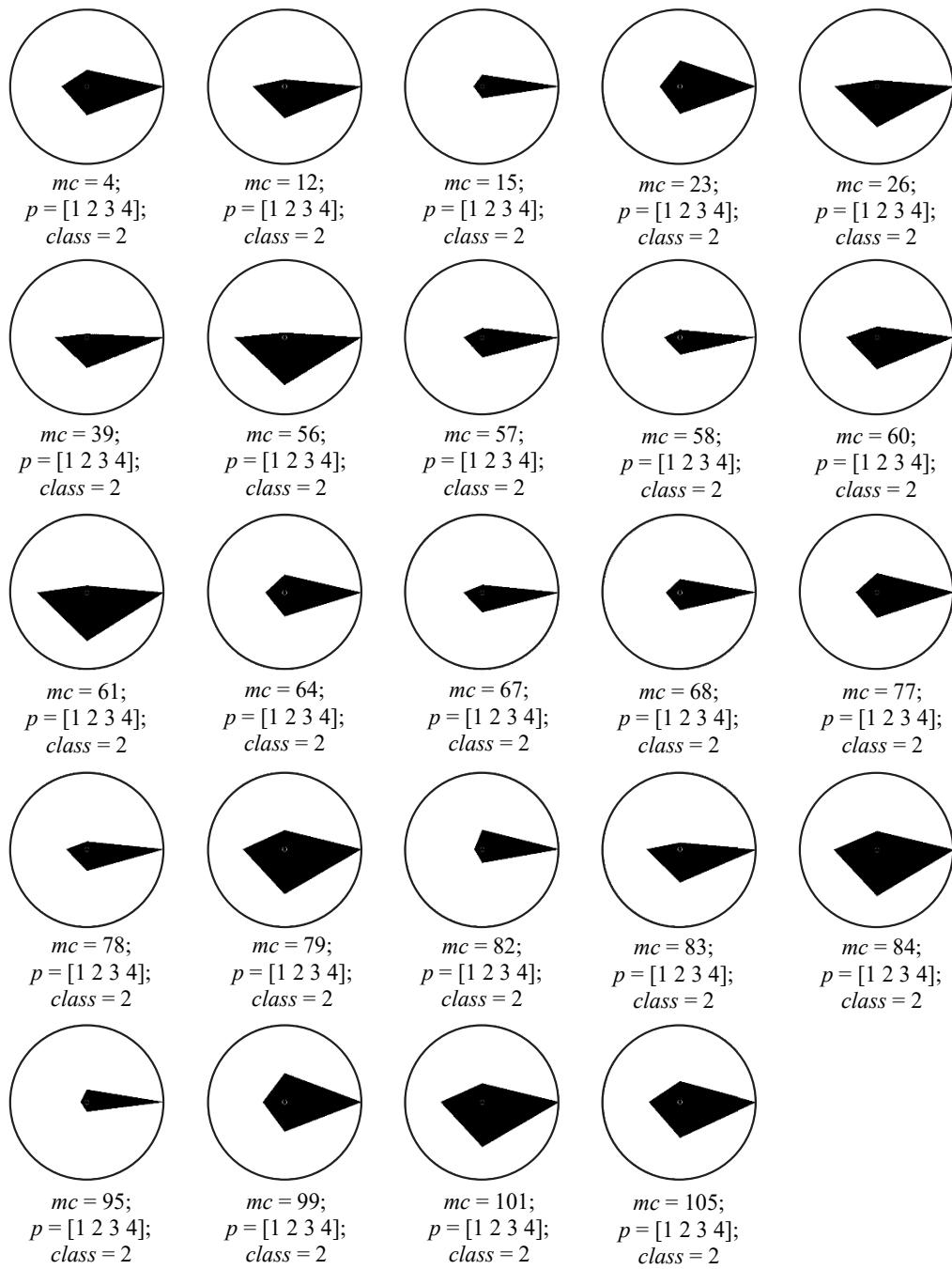


Рис. 5. Класс 2

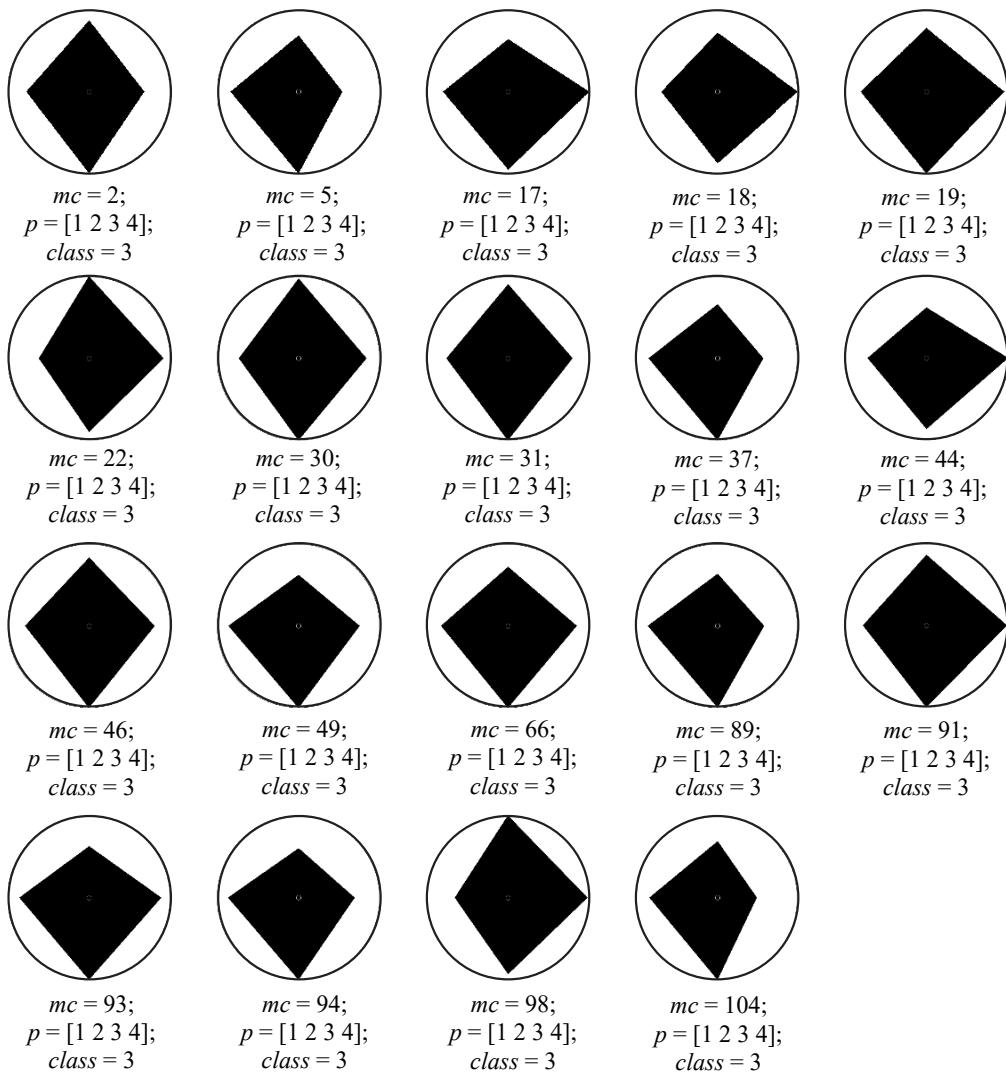


Рис. 6. Класс 3

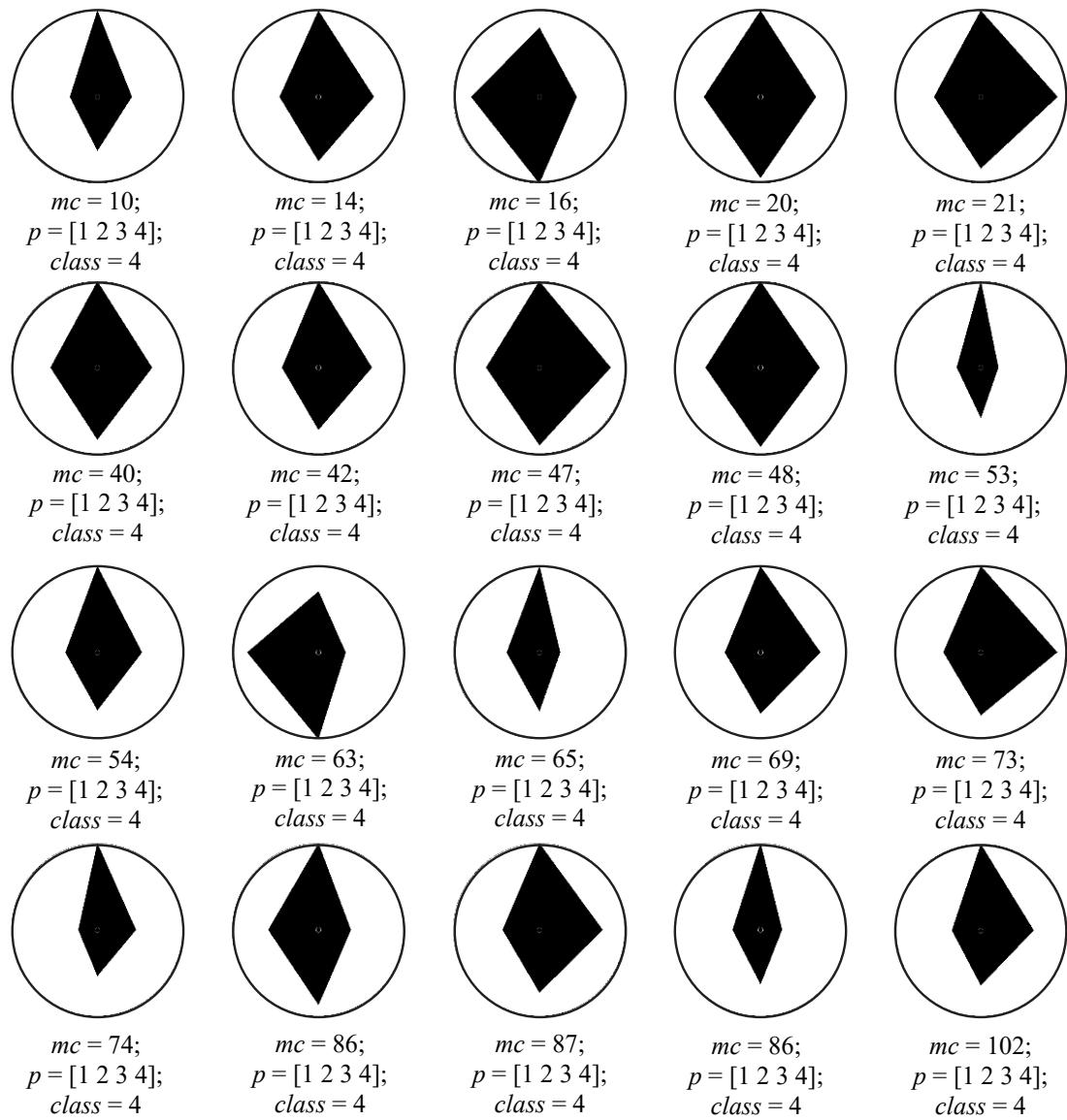


Рис. 7. Класс 4

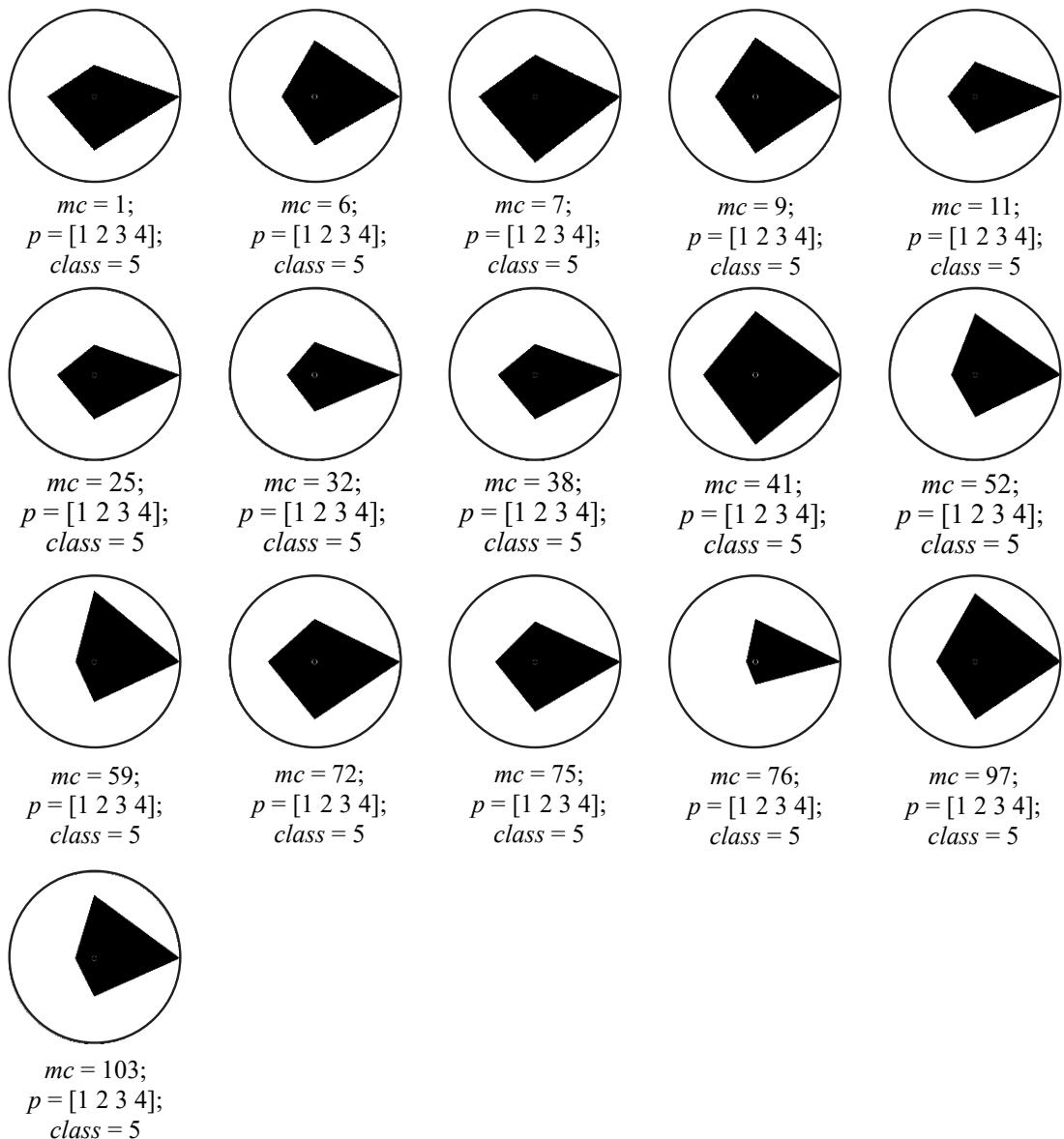


Рис. 8. Класс 5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббурьской активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 3. С. 273–279.
2. Бархатов Н.А., Громова Л.И., Дремухина Л.А. и др. Учет энергетического бюджета магнитосферы в задаче классификации источников магнитосферной активности // Известия Российской Академии наук. Серия физическая. 2006. Т. 70. № 10. С. 1535–1537.
3. Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зеерев В.Л. Влияние параметров плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 3. С. 311–323.
4. Vorobjev V.G., Antonova E.E., Yagodkina O.I. How the intensity of isolated substorms is controlled by the solar wind parameters // Earth, Planets and Space. 2018. V. 70. Iss. 148. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0922-5>
5. Lynch B., Zurbuchen T., Fisk L. et al. Internal structure of magnetic clouds: Plasma and composition // J. Geophys. Res. 2002. V 08. Iss. A6. Art.ID. 1239.
6. Newell P.T., Sotirelis T., Liou K. et al. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Art.ID. A01206.

7. Crooker N.U., Kahler S.W., Gosling J.T. et al. Evidence in magnetic clouds for systematic open flux transport on the Sun // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Art.ID. A12107. <https://doi.org/10.1029/2008JA013628>
8. Kilpua E.K.J., Li Y., Luhmann J.G. et al. On the relationship between magnetic cloud field polarity and geoeffectiveness // *Ann. Geophys.* 2012. V. 30. P. 1037–1050. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1037-2012>
9. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е. и др. Суббуровая активность и ориентация фронта ударной волны межпланетного магнитного облака // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т. 59. № 4. С. 427–436.
10. Бархатов Н.А., Ревунов С.Е. Нейросетевая классификация разрывов параметров космической плазмы // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 14(127). С. 42–51.
11. Barkhatov N.A., Vorobjev V.G., Revunov S.E. et al. Neural network classification of substorm geomagnetic activity caused by solar wind magnetic clouds // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2020. V. 205. Art.ID. 105301.
12. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е. и др. Нейросетевая классификация причинно-следственной связи суббуровой активности со структурными элементами магнитных облаков солнечного ветра // Известия Российской Академии наук. Серия физическая. 2022. Т. 86. № 3. С. 329–334.

CLASSIFICATION OF ISOLATED SUBSTORMS TAKING INTO ACCOUNT GENERATION CONDITIONS AND PHASE CHARACTERISTICS

© 2025 N. A. Barkhatov^{1,*}, S. E. Revunov¹, O. M. Barkhatova²,
E. A. Revunova², V. G. Vorobjev³, O. I. Yagodkina³

¹*Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), Nizhny Novgorod, Russia*

²*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

³*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

*e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

A neural network classification of isolated substorms was performed, taking into account the features characterizing the peculiarities of generation of different substorm phases. For this purpose, the following classification features were chosen: the duration of the nucleation phase, the development phase, the recovery phase, and the duration of the substorm as a whole, as well as the behavior of the B_z component of the interplanetary magnetic field (IMF). The latter feature is understood as the southward rotation of the B_z component of the IMF, which determines the beginning of the nucleation phase of the substorm. These features are adopted as input series for the self-learning neural network models being created. The result of the classification neural networks is the formation of graphical images of the set of the above classification features, each of which contains information on the duration of the phases of the considered substorms. Classification neural network experiments allow us to divide substorms into five classes. The physical features of the selected classes consist in the cause-and-effect relationships between the duration of substorm phases and solar wind parameters and MMP features.