

УДК 550.385.4

## УЧЕТ ПРОЦЕССА ЗАГРУЗКИ МАГНИТОСФЕРЫ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОЛИРОВАННЫХ СУББУРЬ

© 2025 г. Н. А. Бархатов<sup>1</sup>, \*, С. Е. Ревунов<sup>1</sup>, О. М. Бархатова<sup>2</sup>,  
В. Г. Воробьев<sup>3</sup>, Е. А. Ревунова<sup>2</sup>, О. И. Ягодкина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина (НГПУ), Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup>Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (НГАСУ),  
Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup>Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты (Мурманская обл.), Россия

\*e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 06.08.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

В исследовании выполнена классификация изолированных магнитосферных суббури по временным характеристикам фаз суббури совместно с данными о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Результаты классификации демонстрируют причинно-следственные связи суббуровой активности с характеристиками потока солнечного ветра, натекающего на земную магнитосферу. При этом используются комбинации параметров солнечного ветра, учитывающие процесс загрузки кинетической энергии солнечного ветра в полярную магнитосферу. Нейросетевые эксперименты показали, что динамические параметры суббуровой активности содержат в себе информацию о характеристиках плазменных потоков. Это выразилось в обнаружении классов изучаемых образов, отвечающих физическим представлениям о генерации высокоширотной геомагнитной активности.

**Ключевые слова:** суббури, магнитосфера, классификация, нейросети

**DOI:** 10.31857/S0016794025020024, **EDN:** CWNYUZ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение солнечного ветра и прогнозирование геомагнитных возмущений, опирающееся на данные патрульных космических аппаратов, находящихся за пределами магнитосферы, продолжает быть одной из задач современной гелиогеофизики. Существует ряд факторов, которые способствуют интересу к этим проблемам. Известно, что наиболее заметная перестройка токовых систем в магнитосфере и высокоширотной ионосфере происходит в периоды магнитосферных суббури, следующих за воздействием замагнченного потока солнечного ветра на земную магнитосферу [Gallardo-Lacour et.al., 2012]. Индикатором таких событий, в частности, является динамика *AL*-индекса, характеризующая фазы развития суббурового процесса. Считается, что

началом активной фазы суббури является взрывной переход накопленной потенциальной энергии искаженного магнитного поля полярной магнитосферы в кинетическую энергию заряженных частиц, заполняющих колышевой ток и плазменный слой магнитосферы и ионизующих высокоширотную атмосферу [Henderson et.al., 1996]. Накопление энергии в магнитосфере, происходящее в период подготовительной фазы суббури, обеспечивается усилением крупномасштабного западного электрического поля конвекции поперец хвоста магнитосферы [Nishimura et.al., 2010].

Решение задач классификации геомагнитных суббури, наряду с развитием фундаментальных научных теорий их возникновения, также представляет научный интерес, поскольку способствует лучшему пониманию особенностей взаи-

модействия земной магнитосферы с солнечным ветром. В работе [Воробьев и др., 2016] по результатам визуального анализа вариаций геомагнитного поля в высоких широтах предложено разделение суббури на 5 типов в зависимости от значений  $B_z$ -компоненты ММП до и в период начала фазы развития суббури. Авторы уделяют основное внимание суббурям, фаза развития которых проходила при южной ориентации ММП (тип 1) и суббурям, начало которых ассоциировалось с поворотом на север  $B_z$ -компоненты ММП (тип 3). В исследовании [Бархатов и др., 2023] выполнена автоматическая нейросетевая классификация аналогичного набора изолированных суббури также на 5 классов, с учетом признаков, характеризующих особенности генерации различных суббуровых фаз. Анализ полученных классов позволил сформулировать их особенности и сделать физические выводы. Однако при использовании в качестве классификационных признаков только продолжительности фаз их причинно-следственные связи с параметрами солнечного ветра и ММП учитывались косвенно.

В настоящем исследовании нейросетевая классификация выполнена с прямым учетом параметров солнечного ветра, и поэтому такой подход должен отражать существующую в суббуровом процессе их причинно-следственную физическую связь. При этом рассмотрение динамики суббури и всех её фаз крайне затруднительно, если учитывать только мгновенные значения основных параметров межпланетного магнитного поля (ММП) и плазмы солнечного ветра ( $B_z$ ,  $N$ ,  $I$ ), так как процесс постепенного накопления в магнитосфере магнитной энергии солнечного ветра протекает в условиях непрерывного поступления в магнитосферу кинетической энергии частиц ( $NV^2$ ) солнечного ветра ( $N$  – плотность, а  $V$  – скорость солнечного ветра). Ранее в работе [Бархатов и др., 2017] для описания процесса формирования суббури и прогнозирования ее динамики было предложено использование интегрального параметра в виде кумулятивной суммы  $\Sigma NV^2$  наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра. Однако, данный параметр может быть использован не только для прогнозирования, но и для классификации магнитосферных суббури. Таким образом в данной работе классификация изолированных суббури выполняется при учете продолжительности фазы зарождения, фазы развития и фазы восстановления суббури, длительности всей суббури, а также значений  $B_z$ -компоненты межпланетного магнитного поля, кумулятивного параметра  $\Sigma NV^2$ , амплитудных значений индекса  $AL$  и электрического поля  $E$  в потоке солнечного ветра.

Целью данной работы является демонстрация результатов решения задачи нейросетевой классификации изолированных суббуровых событий при учёте процесса загрузки кинетической энергии солнечного ветра полярной магнитосферы.

## 2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужили изолированные суббури, выбранные по вариациям минутных значений индекса  $AL$  за все зимние сезоны 1995–2012 гг. Первичный отбор суббури проводился визуально по суточным вариациям  $AL$ -индекса. Дополнительным признаком появления суббури являлось наличие соответствующих вариаций в индексах магнитной активности  $SYM/H(D)$  или  $ASYM/H(D)$  [Воробьев и др., 2016]. Было использовано 106 изолированных суббуровых событий различной интенсивности, каталог которых представлен на страницах (<http://pgia.ru/lang/en/data/>). Данные по индексам магнитной активности и по параметрам межпланетной среды с разрешением в 1 мин взяты на портале OMNI Web (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

Ранее в работе [Бархатов и др., 2023] нами была выполнена нейросетевая классификация изолированных суббури, с учетом признаков, характеризующих особенности генерации различных суббуровых фаз. Для этого были выбраны такие классификационные признаки, как продолжительность фазы зарождения, фазы развития, фазы восстановления и длительность всей суббури в целом, а также неявно учитывалась особенность поведения компоненты  $B_z$  ММП. Под последним признаком подразумевается поворот компоненты  $B_z$ -компоненты ММП к югу, который определяет начало фазы зарождения суббури. Непосредственно компонента  $B_z$  в число классификационных параметров не входила. Рассмотренные признаки были приняты в качестве входных рядов для создаваемых самообучающихся нейросетевых моделей [Бархатов и др., 2023]. Результатом работы классификационных нейросетей являлось формирование графических образов набора указанных классификационных признаков, каждый из которых содержал информацию о продолжительности фаз рассматриваемых суббури. Классификационные нейросетевые эксперименты, проведенные в работе [Бархатов и др., 2023], позволили разделить суббури на пять классов. Физические особенности выделенных классов, по все вероятности, определяются причинно-следственными связями продолжительности суббуровых фаз с параметрами солнечного ветра и особенностями ММП.

Классификационные нейросетевые эксперименты, представленные в настоящем исследовании, проводились с использованием нейросети ранее уже обученной на четырех классификационных признаках суббури [Бархатов и др., 2023]: продолжительность фазы зарождения ( $P1$ ), фазы развития ( $P2$ ), фазы восстановления ( $P3$ ) суббури и длительность всей суббури в целом ( $P4$ ). При сохранении числа учитываемых признаков мы теперь привлекаем и ряд других параметров, а именно,  $Bz$ -компоненту ММП, кумулятивный параметр  $\Sigma NV^2$  (вычислен за 2 ч до начала развития суббури), амплитуду индекса  $AL_{max}$  и электрического поля  $E_{max}$  солнечного ветра. Применяемая нейросеть содержит зафиксированные для нее ранее оптимальные весовые коэффициенты на входах и в её слоях. Задача по обнаружению классов суббури в случае применения других признаков должна, как и ранее, отвечать следующим критериям/ограничениям:

1. Количество входов нейросети (классификационных параметров) должно быть всегда равно 4.
2. Количество классов, на которые нейросеть пытается разделить выборку из имеющихся событий, всегда равно 5.
3. Применение исходных классификационных параметров ( $P1, P2, P3, P4$ ) позволяет получить эталонную/референсную картину классификации, с которой следует сравнивать классификационные исходы при других наборах параметров.
4. Замену исходных классификационных параметров ( $P1, P2, P3, P4$ ) классификационными признаками ( $Bz, \Sigma NV^2, AL, E$ ) организуем последовательно, с целью выяснения вклада каждого нового параметра.

Таблица 1. Процент совпадения классификационных исходов с референсной классификацией

Номер эксперимента из общего числа, равного 7920	Комбинация параметров	Количество точно совпадающих классификационных исходов с референсной классификацией	Процент совпадения классификационных исходов с референсной классификацией
301	$P1, P2, P4, \Sigma NV^2$	74	70
1422	$P1, P2, P3, Bz_{To}$	79	75
1604	$P1, P2, P3, E_{To}$	78	74
2499	$P1, P2, Bz_{max}, P3$	77	73
5012	$P1, P2, P3, E_{max}$	82	77
3284	$P1, P2, P3, AL_{max}$	84	79
6826	$P1, P2, P3, Bz_{max}$	84	79

5. Результаты каждого классификационного эксперимента с определенным набором параметров сравниваем с референсной картиной классификации и делаем соответствующие выводы.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты каждого выполненного классификационного эксперимента с определенным набором параметров сравнивались с референсной картиной классификации. Для этого выполнялся учёт проиндексированных суббуровых событий отнесенных нейросетью в один и тот же класс в разных экспериментах. Результаты такой индексации с оценкой качества классификации (соответствия нового исхода классификации предыдущим выводам) приведены в табл. 1 для наиболее показательных экспериментов.

Как видно из табл. 1, для указанных комбинаций классификационных параметров более 70% суббуровых событий отнесены нейросетью в классы, обнаруженные ранее в работе [Бархатов и др., 2023], когда в качестве признаков использовались только продолжительности различных суббуровых фаз. Можно заметить, что в комбинациях параметров всегда фигурируют продолжительности фазы зарождения ( $P1$ ) и фазы развития ( $P2$ ). Это говорит о важности указанных классификационных признаков для определения типа суббури, фактически они определяют особенности классов событий. Вместе с тем, параметры, отвечающие за продолжительность фазы восстановления ( $P3$ ) или всей суббури ( $P4$ ), могут быть заменены одним из новых классификационных признаков.

Демонстрация полученных результатов выполнена с помощью разработанного в [Barkhatov et. al., 2020] алгоритма визуализации данных. Он позволяет представлять графическими образами существующие причинно-следственные связи. На рисунках 1–5 демонстрируется данные эксперимента № 6826, для которого наблюдается максимальное совпадение результатов классификационного эксперимента при использовании набора параметров ( $P1, P2, P3, Bz_{max}$ ) с референсной

картиной классификации (84 из 106 событий или 79%). Визуальную оценку можно выполнить по цветовой кодировке классов: класс 1 – белый в черной рамке (суббури с продолжительным развитием и восстановлением и с укороченной фазой зарождения), класс 2 – темно-серый в черной рамке (суббури с продолжительной фазой зарождения), класс 3 – белый в серой рамке (суббури с равновеликими фазами), класс 4 – черный в серой рамке (суббури с продолжительной фазой

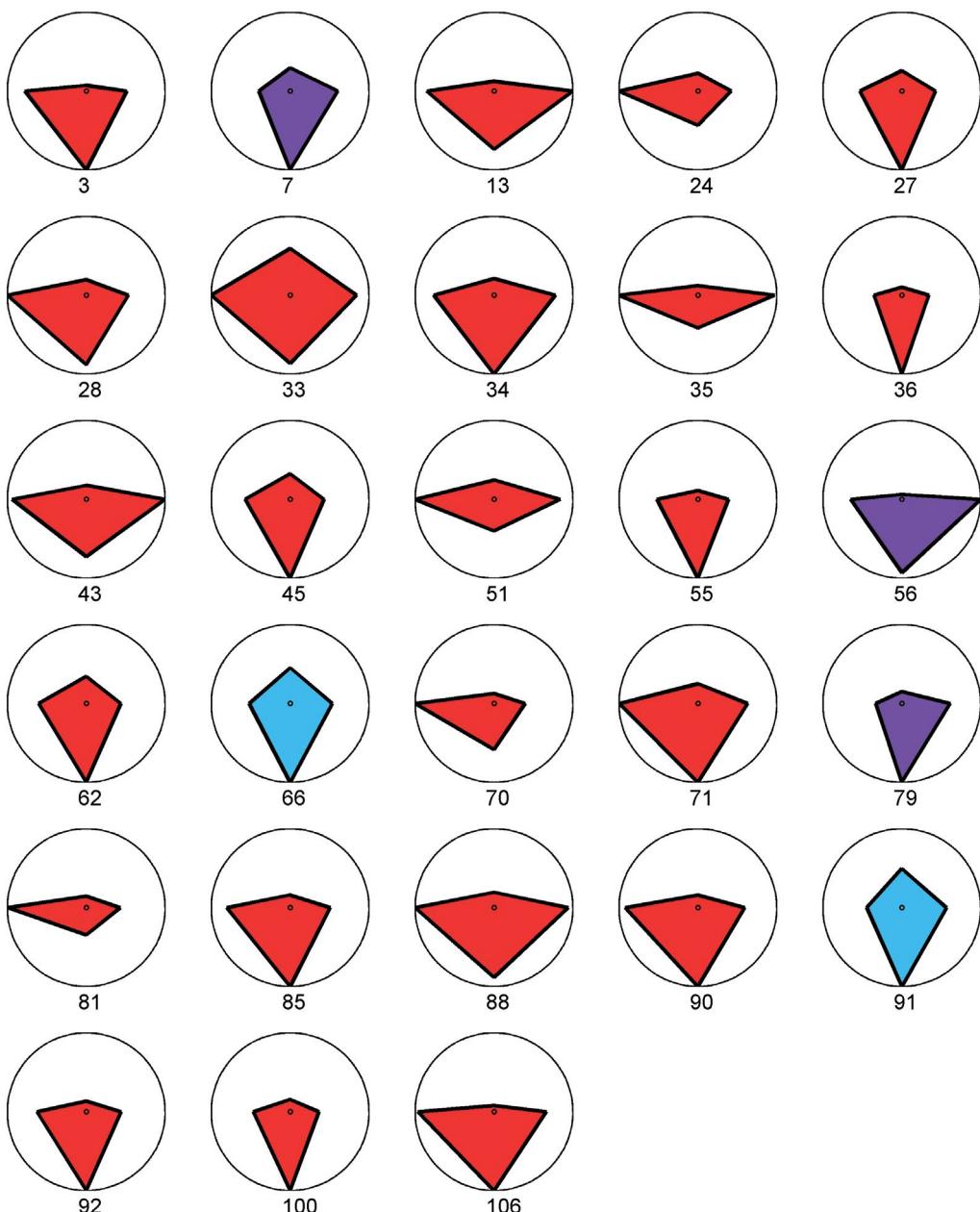


Рис. 1. Новый класс 1 включает суббури с продолжительным развитием и восстановлением и с укороченной фазой зарождения.

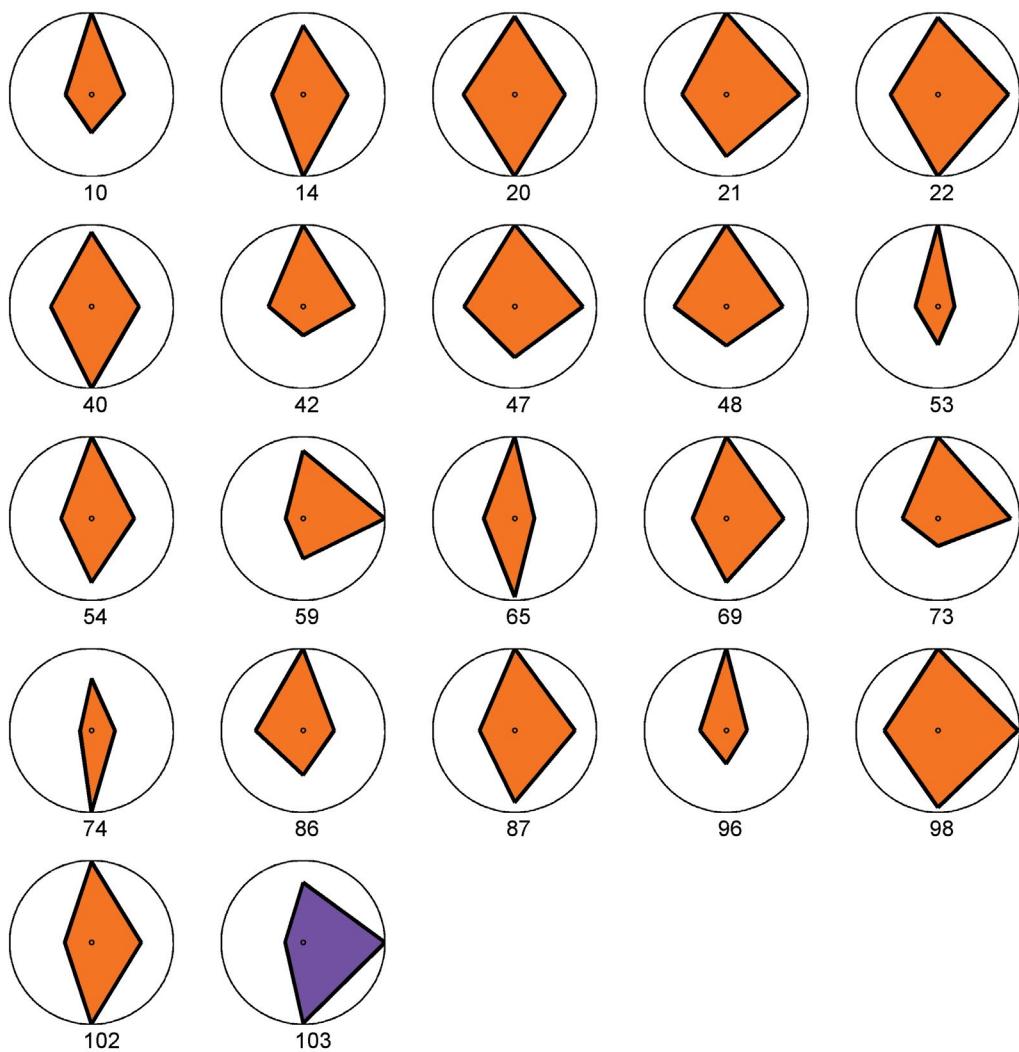


Рис. 2. Новый класс 2 включает суббури с продолжительной фазой зарождения.

развития), класс 5 – светло-серый в черной рамке (суббури с короткой фазой восстановления). Под каждым графическим образом указан номер суббурового события. Погрешности в определении классов по новому набору данных обнаруживаются при перемешивании цветности.

Можно заметить, что наиболее перемешанным оказался класс 5 (рис. 5), который в референсной классификации соответствовал суббуровым событиям с короткой фазой восстановления. В других экспериментах именно этот класс поддается выделению наиболее проблематично. Привлечение новых классификационных параметров солнечно-гого ветра или межпланетного магнитного поля здесь не проявляется в условиях требуемой классификации. Это можно объяснить тем обстоятельством, что эти параметры физически не принима-

ют участия на фазе восстановления суббурового процесса. Полученные результаты классификации подтверждают причинно-следственную связь высокоширотной геомагнитной активности с анализируемыми параметрами околоземного космического пространства. Всего было обнаружено 5 классов. При этом установлено, что: класс 1 предполагает продолжительное развитие и восстановление суббури с укороченной фазой зарождения, которая наблюдается в основном при южной ориентации ММП; классы 2 и 3 с продолжительной фазой зарождения и равновеликими фазами развития и восстановления суббури ассоциируются с поворотом на север  $Bz$ -компоненты ММП, при этом наблюдаются наибольшие отклонения в индексе  $AL$ ; класс 4 связан с продолжительной фазой развития и характеризуется вы-

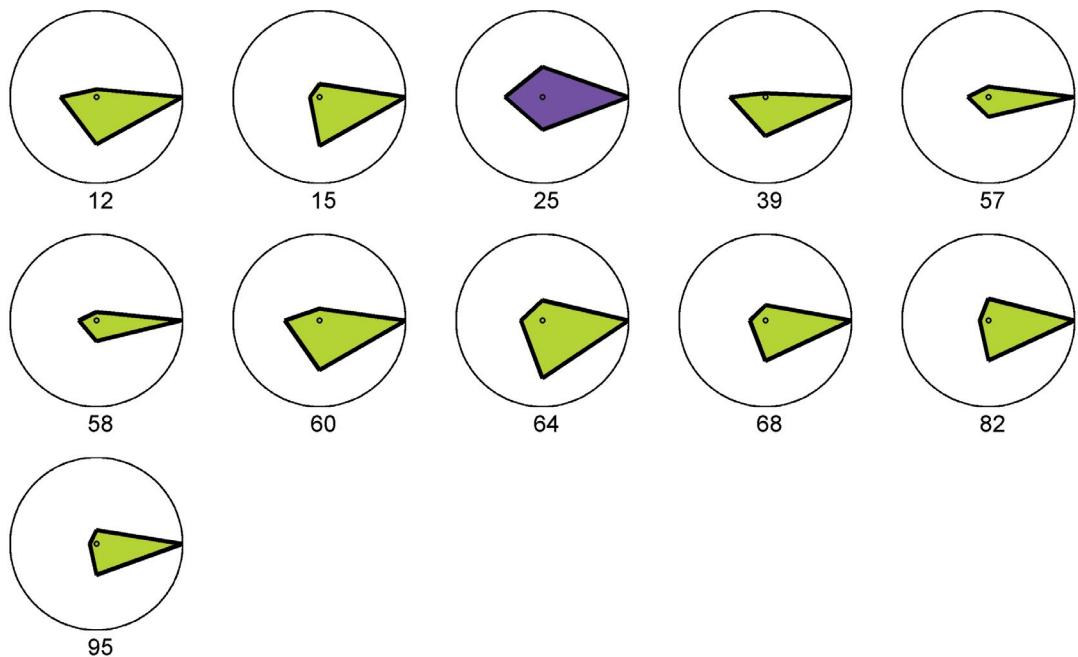


Рис. 3. Новый класс 3 включает суббури с равновеликими фазами.

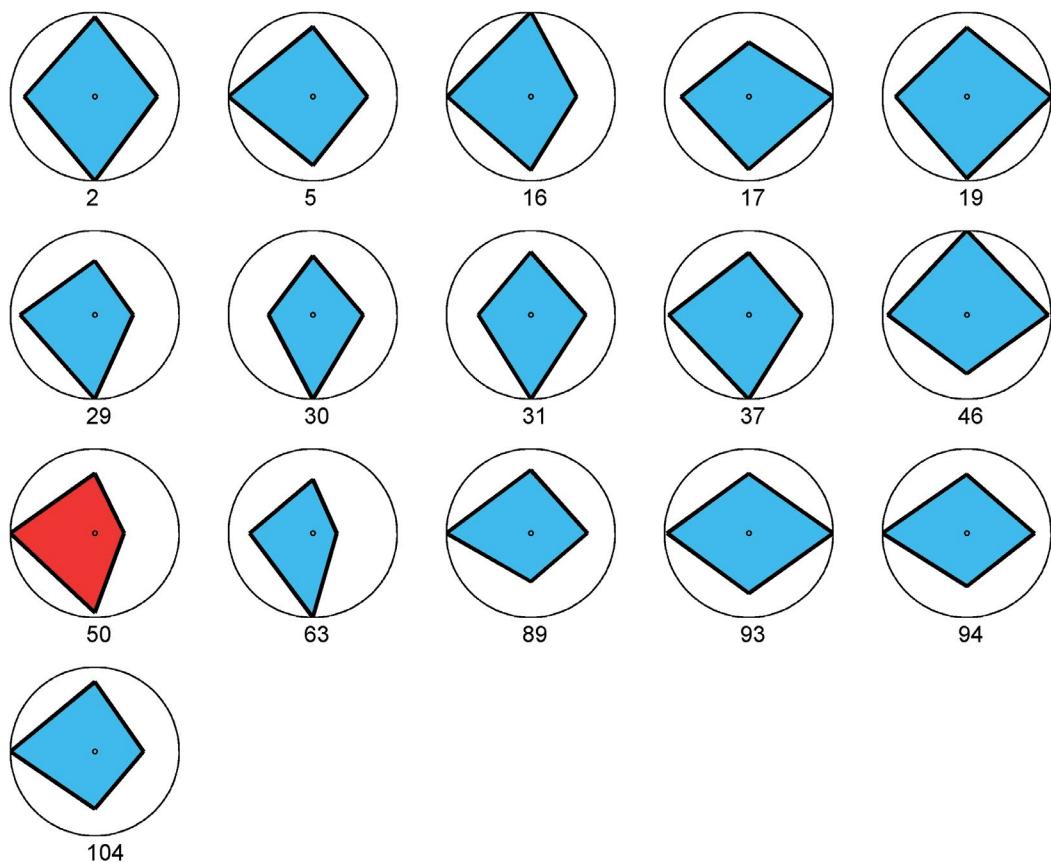


Рис. 4. Новый класс 4 включает суббури с продолжительной фазой развития.

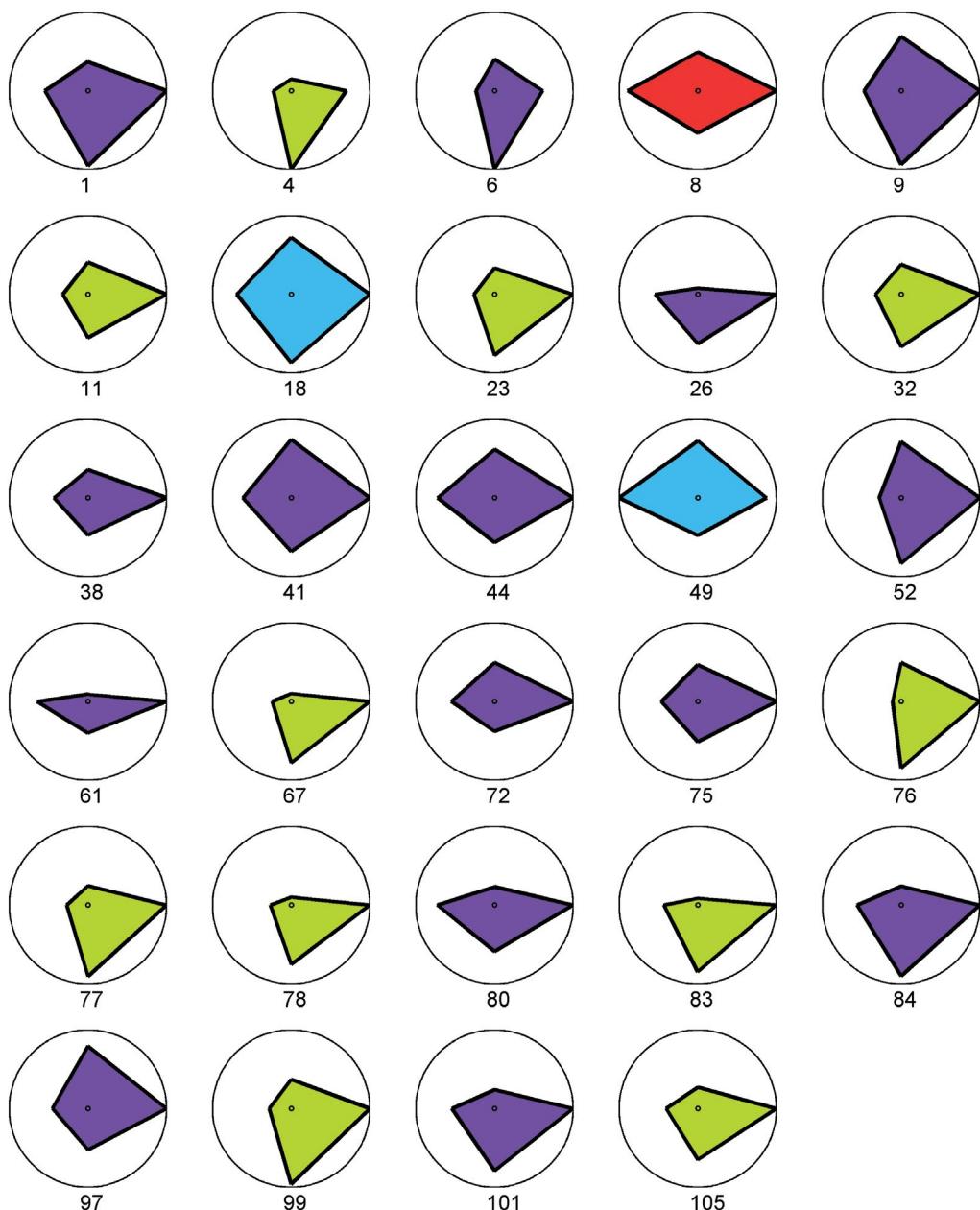


Рис. 5. Новый класс 5 включает суббури с короткой фазой восстановления.

сокими отрицательными значениями  $B_\zeta$ ; класс 5 содержит суббури с короткой фазой восстановления, для которого привлечение новых классификационных параметров солнечного ветра или межпланетного магнитного поля не проявляется в условиях требуемой классификации. Физические особенности обнаруженной классификации обуславливаются причинно-следственные связи продолжительности суббуровых фаз с параметрами солнечного ветра и ММП.

Как показали эксперименты, учет кинетической энергии солнечного ветра через кумулятивный параметр  $NV^2$  является ключевым элементом для выявления особенностей воздействия космических плазменных потоков на высокоширотную магнитосферу. Использование интегрального параметра в виде кумулятивной суммы  $\sum NV^2$  наравне с другими геоэффективными параметрами солнечного ветра позволяет точнее моделировать эти воздействия и разрабатывать методы защиты

от их негативных последствий. Это важно для обеспечения безопасности космических полетов, защиты сотовых сетей и других систем связи, а также сохранения работоспособности космических аппаратов в условиях повышенной солнечной активности.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено классификационное нейросетевое исследование характеристик изолированных суббурь, которые были отобраны по вариациям 1-мин значений *AL*-индекса. Для выбора суббурь использовались специальные критерии, подробно рассмотренные в [Воробьев и др., 2016]. Автоматическая нейросетевая классификация выполнена с учетом параметров солнечного ветра и поэтому такой подход отражает существующую в суббуревом процессе причинно-следственную физическую связь явлений в солнечном ветре и магнитосфере Земли. При использовании разных наборов параметров продемонстрировано, что исследуемые конфигурации динамики *AL*-индекса содержат в себе информацию о характеристиках плазменных потоков. Показано, что в комбинациях классификационных параметров всегда фигурируют продолжительности фазы зарождения и фазы развития суббурь. Это говорит о важности указанных классификационных признаков для определения типа суббури при совместном учете параметров солнечного ветра. Таким образом, определяются особенности классов событий и причинно-следственные связи внутри групп классификационных параметров. Результаты настоящего исследования можно признать более объективными по сравнению с предыдущими выводами, поскольку наряду с параметрами суббурь, как следствий физического процесса, были учтены и параметры солнечного ветра, как причины проходящего.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность модераторам веб-узла NASA's Space Physics Data Facility за воз-

можность получения данных по параметрам солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена без финансовой поддержки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 3. С. 273–279. 2017.
- Бархатов Н.А., Ревунов С.Е., Бархатова О.М., Ревунова Е.А., Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Классификация изолированных суббурь при учете условий генерации и характеристик фаз // Космические исследования. Т. 63. № 1. С. 71–78. 2025.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 721–732. 2016.
- Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е., Зверев В.Л. Влияние параметров плазмы солнечного ветра на интенсивность изолированных магнитосферных суббурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 311–323. 2018.
- 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. V. 205. № 105301. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105301>
- Gallardo-Lacour B., Nishimura Y., Lyons K.R., Donovan E. External triggering of substorms identified using modern optical versus geosynchronous particle data // Ann. Geophysicae. V. 30. P. 667–673. 2012. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-667-2012>
- Henderson M.G., Reeves G.D., Belian R.D., Murphree J.S. Observations of magnetospheric substorms occurring with no apparent solar wind/ IMF trigger // J. Geophys. Res. V. 101 № A5. P. 10773–10792. 1996 <https://doi.org/10.1029/96JA00186>
- Nishimura Y., Lyons R. L., Zou S., Angelopoulos V. Substorm triggering by new plasma intrusion: THEMIS all sky imager observations // J. Geophys. Res. V. 115. № A07222. 2010. <https://doi.org/10.1029/2009JA015166>

## Accounting of the Process of Magnetospheric Loading by the Kinetic Energy of the Solar Wind in the Problem of Classification of Isolated Substorms

N. A. Barkhatov<sup>1,\*</sup>, S. E. Revunov<sup>1</sup>, O. M. Barkhatova<sup>2</sup>, V. G. Vorobjev<sup>3</sup>, E. A. Revunova<sup>2</sup>,  
O. I. Yagodkina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Nizhny Novgorod State Pedagogical University (Minin University), Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>3</sup>*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

\*e-mail: nbarkhatov@inbox.ru

The study classifies isolated magnetospheric substorms according to the temporal characteristics of substorm phases together with data on the solar wind and interplanetary magnetic field parameters. The classification results demonstrate causal relations of substorm activity with the characteristics of the solar wind flux flowing to the Earth's magnetosphere. Combinations of solar wind parameters are utilized to account for the process of solar wind kinetic energy loading into the polar magnetosphere. Neural network experiments have shown that the dynamic parameters of substorm activity contain information about the characteristics of plasma flows. This was expressed in the detection of classes of the studied patterns that correspond to the physical concepts of generation of high-latitude geomagnetic activity.

*Keywords:* substorms, magnetosphere, classification, neural networks