

**В.В. Ступин**

*Байкальский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**В.А. Пархомов**

*Байкальский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

**Т.И. Ведерникова**

*Байкальский государственный университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация*

## МОДЕЛЬ ОБОБЩЕННОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ ПУЛЬСАЦИИ

**Аннотация.** В качестве подхода к формальной классификации геомагнитных пульсаций для решений диагностических задач, результаты которых могут быть использованы при прогнозировании чрезвычайных ситуаций естественного происхождения, рассматривается модель обобщенной пульсации. Обосновано включение в модель детерминированной и стохастической составляющих. Детерминированный компонент может быть представлен комбинацией модулированных гармонических колебаний. В качестве стохастической составляющей предлагается использовать случайный процесс. Показано, что для описания стохастической составляющей необходимо предусмотреть более сложные модели случайных процессов, чем представление в виде «белого шума». Предложено использовать эргодический стационарный случайный процесс с заданными одномерным законом распределения вероятностей и автокорреляционной функцией.

**Ключевые слова.** Космическая погода, модель, геомагнитные пульсации, закон распределения вероятностей, автокорреляционная функция.

**Информация о статье.** Дата поступления: 4 февраля 2021 г.

**V.V. Stupin**

*Baikal State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

**V.A. Parkhomov**

*Baikal State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

**T.I. Vedernikova**

*Baikal State University,  
Irkutsk, Russian Federation*

## MODEL OF GENERALIZED GEOMAGNETIC PULSATION

**Annotation.** A generalized pulsation model was considered as an approach to the formal classification of geomagnetic pulsations for solving diagnostic problems, the results of which can be used in predicting natural emergencies. The inclusion of deterministic and stochastic components in the model is justified. The deterministic component can be represented by a combination of modulated harmonic oscillations. As a stochastic component it is proposed to use a random process. It is shown that to describe the stochastic component it is necessary to provide more complex models of random processes than the representation in the form of «white noise». The authors proposed to use an ergodic stationary random process with given one-dimensional probability distribution law and an autocorrelation function.

---

**Keywords.** Space weather, model, geomagnetic pulsations, law of probability distribution, autocorrelation function

**Article info.** Received 4 February 2021.

---

Для обеспечения защиты от чрезвычайных ситуаций естественного происхождения важны прогнозы не только приземной, атмосферной погоды, но и предсказания погоды космической. Под космической погодой понимают состояние околоземного космического пространства, которое находится под постоянным воздействием Солнца, в результате чего возникают магнитные бури и связанные с ними геофизические явления. В качестве основных неблагоприятных для человечества последствий геомагнитных бурь традиционно рассматриваются: ухудшение коротковолновой радиосвязи, наводки в линиях электропередач и трубопроводах, неблагоприятные воздействия на различные технические системы вследствие индукционного воздействия мощных электромагнитных импульсов и токов, которые генерируются в ионосфере Земли [1]. Среди многих исторических примеров можно выделить 13 марта 1989 г. — когда мощная геомагнитная буря вызвала масштабные сбои в энергосетях Канады и Северной Америки, проблемы радиосвязи во всем мире, сбои в работе космических аппаратов и обширные полярные сияния от северных широт до экватора. В результате этой бури канадская провинция Квебек погрузилась во тьму на 9 часов, а 6 миллионов жителей остались без тепла, света и связи [2].

Магнитные бури кроме воздействия на технические системы, влияют на самочувствие и здоровье людей. Во время магнитных бурь возрастает количество вызовов скорой помощи для людей с расстройствами сердечно-сосудистой и психических систем. Резко возрастает число автомобильных аварий.

Актуальность диагностики состояния околоземного космического пространства возрастает и в связи с быстрым перемещением магнитного полюса Земли, который расположен сегодня в Канадской Арктике, но дрейфует в сторону российской Арктики и к 2050 г. достигнет Новой Земли. Это приведёт к перераспределению ионосферных токов, текущих на высотах порядка 100 км, возрастанию угроз энергосистемам северных областей России, нефте- и газопроводам, нарушению условий связи на коротких длинах волн и работе навигационных систем [3].

Одним из важных элементов космической погоды являются геомагнитные пульсации (далее — ГМП), определяющие передачу энергии в системе солнечный ветер – магнитосфера Земли. Вариации характеристик геомагнитных пульсаций на земной поверхности используются как диагностический инструмент слежения за состоянием околоземного космического пространства [4].

К настоящему времени существует устоявшийся подход к классификации геомагнитных пульсаций [5]. Тем не менее, не создана универсальная модель, которая позволила бы произвести четкое отождествление каждой пульсации из всего наблюдаемого многообразия конкретному классу с характерными, только ему присущими признаками. Во многом это обуславливается тем, что ГМП как объект исследования еще недостаточно изучены. Следовательно, задача определения классов наблюдаемых пульсаций может быть доведена до практического решения только для некоторых, хорошо формализуемых групп ГМП. Однако всегда заманчиво найти решение (или хотя бы пути к решению) задачи в общем виде.

Один из таких путей, который обеспечит получение практических результатов при данном уровне знаний, заключается в создании формальной модели сигнала, в первую очередь, отражающей общие черты ГМП, во вторую, — позволяющей учитывать характерные особенности отдельных групп пульсаций по мере выявления этих особенностей.

Таким образом, необходимо на основании априорной информации разработать структуру общей формальной модели ГМП, в рамках которой при соответствующей настройке ее элементов обеспечивалась бы возможность описания узких классов пульсаций.

Прежде чем приступить к описанию модели ГМП, обратимся к общим принципам, характеризующим состояние физических систем. Любая физическая система может находиться в двух состояниях: равновесном и неравновесном. Если говорить о магнитосфере в целом, то здесь регулярно наблюдаются переходы от неравновесности к равновесности. Так предсуббуревое состояние характеризуется в первом приближении ламинарным характером магнитосферной конвекции; начало суббури — есть переход конвекции в турбулентный режим [6]. Волны являются механизмом, который наиболее быстро осуществляет переход магнитосферы от неравновесного состояния к равновесному. Соответственно, в состоянии неравновесности (режим турбулентного течения) спектр волновых возмущений широкий (широкополосный шум, охватывающий весь диапазон естественных электромагнитных излучений). По мере возвращения к исходному состоянию магнитосфера входит в режим «саморегулирования», что приводит к возбуждению излучений с дискретным спектром (регулярные колебания).

Вышесказанное можно отнести и к процессам генерации ГМП. В зависимости от того, в каком состоянии находится генератор, определяется соотношение регулярной и шумовой компонентов излучения. Следует учитывать, что немаловажную роль при этом играет среда распространения, которая заметно влияет на характеристики пульсаций.

Таким образом, ГМП в общем виде можно представить комбинациями гармонических (модулированных гармонических) колебаний и случайных процессов, имитирующих, соответственно, детерминированную и стохастическую природу пульсаций. Предложенная процедура дискриминации свойств по существу формальна, следовательно, информация о среде возбуждения и распространения ГМП может присутствовать в обоих компонентах модели пульсации, поэтому для описания стохастической составляющей необходимо предусмотреть более сложные модели случайных процессов, чем широко распространенное в подобных ситуациях представление в виде «белого шума».

Учитывая это, перейдем к описанию модели ГМП.

Пусть все рассматриваемые пульсации сгруппированы в  $L$  непересекающихся классах. Предположим теперь, что каждому из  $L$  классов взаимно-однозначно соответствует выражение

$$X_1(\theta_1(t), t) = A_1({}^A\theta_1(t), t) + \xi_1({}^\xi\theta_1(t), t), \quad (1)$$

где  $t = t_B, t_B + \Delta t, \dots, t_E; = 1, 2, \dots, L; [t_B, t_E]$  — временной интервал существования пульсации;  $A_1(\cdot)$  — детерминированная составляющая — функция от  $t$  и вектора параметров  ${}^A\theta_1(t) \subset \theta_1(t)$ ;  $\xi_1(\cdot)$  — стохастическая составляющая — случайный процесс с характеристиками  ${}^\xi\theta_1(t) \subset \theta_1(t)$ ;  $\theta_1(t)$  — вектор параметров.

Вид функциональной зависимости  $A_1(\cdot)$  от времени определяется индивидуально для каждого класса пульсаций. На стохастическую составляющую налагаются более общие ограничения. Рассмотрим их подробнее.

Наиболее часто используемый способ задания случайных процессов основан на описании семейства их конечномерных распределений. Это связано с тем, что если случайный процесс является функцией дискретного аргумента  $t$ , а именно этому свойству удовлетворяет стохастическая составляющая в (1), то семейство конечномерных распределений однозначно и полно определяет его вероятностную структуру [7]. Но такой способ описания правомочен, когда есть возможность многократного повторения наблюдений, по которым строятся конечномерные распределения, в аналогичных, статистически однородных условиях. В случае наблюдений за ГМП соблюдение таких условий гарантировать нельзя. Обычно в подобных ситуациях к случайным процессам предъявляют требования стационарности и эргодичности, а семейство конечномерных распределений не распространяют дальше двумерных [8]. Предполагая, что возможная нестационарность ГМП будет учитываться детерминированной составляющей, в качестве стохастической составляющей в (1) примем эргодический стационарный случайный процесс с заданными одномерным законом

распределения вероятностей и автокорреляционной функцией. Поскольку, во-первых, эти характеристики являются в большинстве случаев основной, а иногда и единственной информацией, которую возможно получить о случайном процессе [9], во-вторых, такой выбор связан с проблемами воспроизведения случайных процессов.

С учетом введенных для стохастической составляющей ограничений, перепишем выражение (1) следующим образом:

$$X_1(\theta_1(t), t) = A_1(A\theta_1(t), t) + \xi_1(\xi\theta_1, t), \quad (2)$$

где  $\xi\theta_1 = (F_\xi(z), R_\xi(\tau))$ ;  $R_\xi(\tau) = M[(\xi_1(., t) - M[\xi_1(., t)])(\xi_1(., t + \tau) - M[\xi_1(., t + \tau)])] = M[(\xi_1(., t) - M[\xi_1(., t)])(\xi_1(., t + \tau) - M[\xi_1(., t + \tau)])]$  — АКФ, а  $F_\xi(z)$  — одномерная функция распределения процесса  $\xi_1(., t)$ ;  $|\tau| = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots$ ;  $z$  — действительный аргумент функции  $F_\xi(z)$ ;  $M[.]$  — оператор математического ожидания.

Описание (2) может послужить основой при решении задач классификации и идентификации, в частности, для организации автоматической классификации и идентификации пульсаций [10].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kappenman John G. Comment on «Space Weather and the Electricity Market: An Initial Assessment» by Kevin F. Forbes and O. C. St. Cyr. — DOI 10.1029/2005SW000168 / John G. Kappenman // Space Weather. — 2006. — Vol. 4, iss. 9.
2. Odenwald S. The Day the Sun Brought Darkness / S. Odenwald // National Aeronautics and Space Administration. — 2017. — August 7. — URL: [http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun\\_darkness.html](http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html).
3. Ляхов А.Н. Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли / А.Н. Ляхов, Ю.И. Зецер, Т. Фуллер-Роуелл // Доклады Академии Наук. — 2006. — Т. 409, № 5. — С. 1–3.
4. Пархомов В.А. Проблемы и инструменты геомагнитного мониторинга / В.А. Пархомов, В.Э. Чиликин, А.В. Дмитриев. — DOI 10.17150/1993-3541.2016.26(2).300-311 // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права). — 2016. — Т. 26, № 2. — С. 300–311.
5. Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации / Н.Г. Клейменова // Модель Космоса / под ред. М.И. Панасюк. — Москва, 2007. — Т. 1. — С. 611–626.
6. Трахтенгерц В.Ю. Взрывная фаза суббури как следствие турбулентного режима магнитосферной конвекции / В.Ю. Трахтенгерц, А.Я. Фельдштейн // Геомагнетизм и аэрономия. — 1988. — Т. 28, № 5. — С. 743–748.
7. Губарев В.В. Способы задания и некоторые модели случайных процессов / В.В. Губарев; Новосиб. электротехн. ин-т. — Новосибирск, 1976. — 37 с. — Деп. в ВИНТИ 10.11.76, № 3662–77.
8. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений / В.Н. Тутубалин. — Москва: Тривола, 1994. — 232 с.
9. Шалыгин А.С. Прикладные методы статистического моделирования / А.С. Шалыгин, Ю.И. Палагин. — Ленинград: Машиностроение, 1986. — 320 с.

10. Пархомов В.А. Идентификация пульсаций методами имитации в задачах диагностики магнитосферы / В.А. Пархомов, В.В. Ступин // Геомагнетизм и аэронавтика. — 1990. — Т. 30, № 1. — С. 44–49.

## REFERENCES

1. Kappenman John G. Comment on «Space Weather and the Electricity Market: An Initial Assessment» by Kevin F. Forbes and O. C. St. Cyr. *Space Weather*, 2006, vol. 4, iss. 9. DOI: 10.1029/2005SW000168.
2. Odenwald S. The Day the Sun Brought Darkness. *National Aeronautics and Space Administration*, 2017, August 7. Available at: [http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun\\_darkness.html](http://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html).
3. Lyakhov A.N., Zetzer Yu.I., Fuller-Rouell T. Possible consequences of magnetic pole displacement for the structure and dynamics of the Earth's upper atmosphere. *Doklady Akademii nauk = Reports of the Academy of Sciences*, 2006, vol. 409, no. 5, pp. 1–3. (In Russian).
4. Parkhomov V.A., Chilikin V.E., Dmitriev A.V. Issues and Tools of the Geomagnetic Monitoring. *Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii (Baykalskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i prava) = Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy (Baikal State University of Economics and Law)*, 2016, vol. 26, no. 2, pp. 300–311. DOI: 10.17150/1993-3541.2016.26(2).300-311. (In Russian).
5. Kleimenova N.G. Geomagnetic Pulsations. In Panasyuk M.I. *Model' Kosmosa* [Model of the Cosmos]. Moscow, 2007, vol. 1, pp. 611–626. (In Russian).
6. Trakhtengerts V.Yu., Feldshtein A.Ya. Explosive phase of a substorm as a consequence of the turbulent regime of magnetospheric convection. *Geomagnetizm i aeronomiya = Geomagnetizm i Aeronomiya*, 1988, vol. 28, no. 5, pp. 743–748. (In Russian).
7. Gubarev V.V. *Sposoby zadaniya i nekotorye modeli sluchainykh protsessov* [Methods of setting and some models of stochastic processes]. Novosibirsk Electrotechnical Institute Publ., 1976. 37 p.
8. Tutubalin V.N. *Statisticheskaya obrabotka ryadov nablyudenii* [Statistical processing of observational data]. Moscow, Trivola Publ., 1994. 232 p.
9. Shalygin A.S., Palagin Yu.I. *Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniya* [Applied Methods of Statistical Modeling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 320 p.
10. Parkhomov V.A. Stupin V.V. Identification of Pulsations by Simulation Methods in Problems of Magnetosphere Diagnostics. *Geomagnetizm i aeronomiya = Geomagnetizm i Aeronomiya*, 1990, vol. 30, no. 1, pp. 44–49. (In Russian).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ступин Виталий Валерьевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: [stupinvv@bgu.ru](mailto:stupinvv@bgu.ru).

**Пархомов Владимир Александрович** — доктор физико-математических наук, профессор, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: [pekines\\_41@mail.ru](mailto:pekines_41@mail.ru).

**Ведерникова Татьяна Ивановна** — кандидат технических наук, доцент, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: [VedernikovaTI@bgu.ru](mailto:VedernikovaTI@bgu.ru).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vitaliy V. Stupin** — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: stupinvv@bgu.ru.

**Vladimir A. Parkhomov** — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: pekines\_41@mail.ru.

**Tatyana I. Vedernikova** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: VedernikovaTI@bgu.ru.

#### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Ступин В.В. Модель обобщенной геомагнитной пульсации / В.В. Ступин, В.А. Пархомов, Т.И. Ведерникова // *System Analysis & Mathematical Modeling*. — 2021. — Т. 3, № 1. — С. 38–44.

#### FOR CITATION

Stupin V.V., Parkhomov V.A., Vedernikova T.I. Model of Generalized Geomagnetic Pulsation. *System Analysis & Mathematical Modeling*, 2021, vol. 3, no. 1, pp. 38–44. (In Russian).