

**ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ТИПА PC4 МЕТОДАМИ BIG DATA
В СРЕДЕ MATLAB****А. Г. Коробейников**

*Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
Korobeynikov_A_G@mail.ru*

Аннотация. Геомагнитные пульсации, под которыми обычно понимается изменение напряженности геомагнитного поля в определенном частотном диапазоне под действием времени и разных факторов, формально можно представлять в виде магнитогидродинамических волн, распространяющихся в околоземной плазме. На поверхности Земли пульсации можно выделять из ультранизкочастотных электромагнитных колебаний, зарегистрированных, например, в геомагнитных обсерваториях. По геомагнитным пульсациям возможно получать информацию, например, о параметрах среды в области их генерации, об особенностях развития геомагнитных бурь и суббурь. Проанализированы особенности работы с одним из самых распространенных видов геомагнитных пульсаций — Pc4, имеющих период колебаний 45–150 с. Обработываемые данные получены от международной сети INTERMAGNET. Поскольку объем таких данных превышает объем оперативной памяти компьютера, применены технологии BigData, реализованные в среде MATLAB.

Ключевые слова: *BigData, FilterDesign, INTERMAGNET, MATLAB, Pc4, высокие массивы, геомагнитная обсерватория, магнитное поле Земли, полосовой фильтр, хранилище данных*

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-27-00011.

Ссылка для цитирования: *Коробейников А. Г. Выделение геомагнитных пульсаций типа Pc4 методами Big Data в среде MATLAB // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 6. С. 475–480. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-475-480.*

**IDENTIFICATION OF PC4 TYPE GEOMAGNETIC PULSATIONS USING BIG DATA METHODS
IN MATLAB ENVIRONMENT****A. G. Korobeynikov**

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS,
St. Petersburg Branch, St. Petersburg, Russia
Korobeynikov_A_G@mail.ru*

Abstract. Geomagnetic pulsations, which usually mean a change in the strength of the geomagnetic field in different frequency ranges depending on time and various factors, can be formally represented as magnetohydrodynamic waves in the near-Earth plasma. On the Earth's surface, geomagnetic pulsations can be isolated from ultra-low-frequency electromagnetic oscillations recorded, for example, in geomagnetic observatories. Geomagnetic pulsations contain various information, for example, about environmental parameters in the areas of their generation; about the features of the development of geomagnetic storms and substorms. The features of working with one of the most common types of geomagnetic pulsations — type Pc4, with an oscillation period of 45–150 s, are analyzed. The processed data is obtained from the international INTERMAGNET network. Since the volume of such data exceeds the amount of computer RAM, BigData technologies implemented in the MATLAB environment are used.

Keywords: *Big Data, Filter Design, INTERMAGNET, MATLAB, Pc4, tall array, geomagnetic observatory, Earth's magnetic field, bandpass filter, data storage*

Acknowledgment: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-27-00011.

For citation: Korobeynikov A. G. Identification of Pc4 type geomagnetic pulsations using big data methods in matlab environment. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 6. P. 475–480 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-6-475-480.

Введение. Геомагнитное поле (ГМП) обычно представляют суммой нескольких полей, которые имеют разную физическую природу*:

$$B_T = B_0 + B_a + \delta B,$$

где B_0 — главное поле; B_a — поле земной коры (литосферное); δB — поле геомагнитных вариаций (пульсаций).

Под геомагнитными пульсациями (ГП) обычно понимается изменение напряженности ГМП в определенном частотном диапазоне под действием времени и разных факторов. ГП принято представлять в виде магнитогидродинамических (МГД) волн, распространяющихся в околоземной плазме. Эти волны возбуждаются различными физическими процессами, протекающими, например, в солнечном ветре, магнитосфере, плазмосфере или ионосфере [1]. На поверхности Земли ГП регистрируются как ультранизкочастотные (УНЧ) электромагнитные колебания. МГД-волны можно фиксировать во время геомагнитных бурь, суббурь, а также в магнитоспокойное время. ГП обладают высокой информативностью. Анализируя ГП, можно получать много информации, например, о параметрах среды в области их генерации; об особенностях развития геомагнитных бурь и суббурь; о потоках высыпавшихся частиц и пути их распространения к земной поверхности. Отсюда следует, что анализ ГП связан с решением как прикладных задач, например диагностикой текущего состояния околоземной среды и прогнозом космической погоды, так и фундаментальных, включая дальнейшее развитие теории ГП.

В настоящей статье исследуется работа с ГП типа Pc4, т.е. ГП с периодом колебаний в диапазоне 45–150 с, такой вид ГП — один из самых распространенных. В работе показано, как можно выделять ГП Pc4 из данных, полученных в геомагнитных обсерваториях, в частности, международной сети INTERMAGNET (International Real-Time Magnetic Observatory Network) [2, 3].** Большой объем обрабатываемых данных невозможно поместить в оперативную память компьютера, поэтому необходимо применять технологии BigData [4]. В качестве программного инструментария использовался MATLAB, при помощи которого можно решать задачи в различных предметных областях [5–8].

Подготовка данных. Исходные данные состояния ГМП за 2023 год с частотой дискретизации $f_d = 1 \text{ с}^{-1}$ взяты из базы INTERMAGNET. Файлы данных содержат четыре столбца — LYCX, LYCY, LYCZ и LYCF, где LYCX, LYCY, LYCZ — компоненты вектора ГМП, LYCF — модуль вектора ГМП. Из-за большого объема данных применяются специальные средства, такие как Datastore (хранилище данных). Код на MATLAB приведен в [2], после небольшой модификации за счет его выполнения будет построен график (на рис. 1 представлены исходные данные с LYC за 01.01.2023–31.12.2023).

Из рис. 1 видно, что в исходных данных имеется несколько выбросов, связанных, вероятнее всего, с прекращением работы магнитометрических сенсоров. В таких случаях общепринятой практикой считается занесение числа 99999 в соответствующую базу данных. Для дальнейшей работы такие данные необходимо удалить. Это можно сделать, например, так:

```
toDelete_XYZF = (LYC.LYCX == 99999) | (LYC.LYCY == 99999) ...
| (LYC.LYCZ == 99999) | (LYC.LYCF == 99999);
LYC(toDelete_XYZF, :) = [];
clearvars toDelete_XYZF;
stackedplot(LYC);
```

Обработанные таким кодом данные представлены на рис. 2.

* ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. М.: Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. 23 с.

** <https://www.intermagnet.org>.

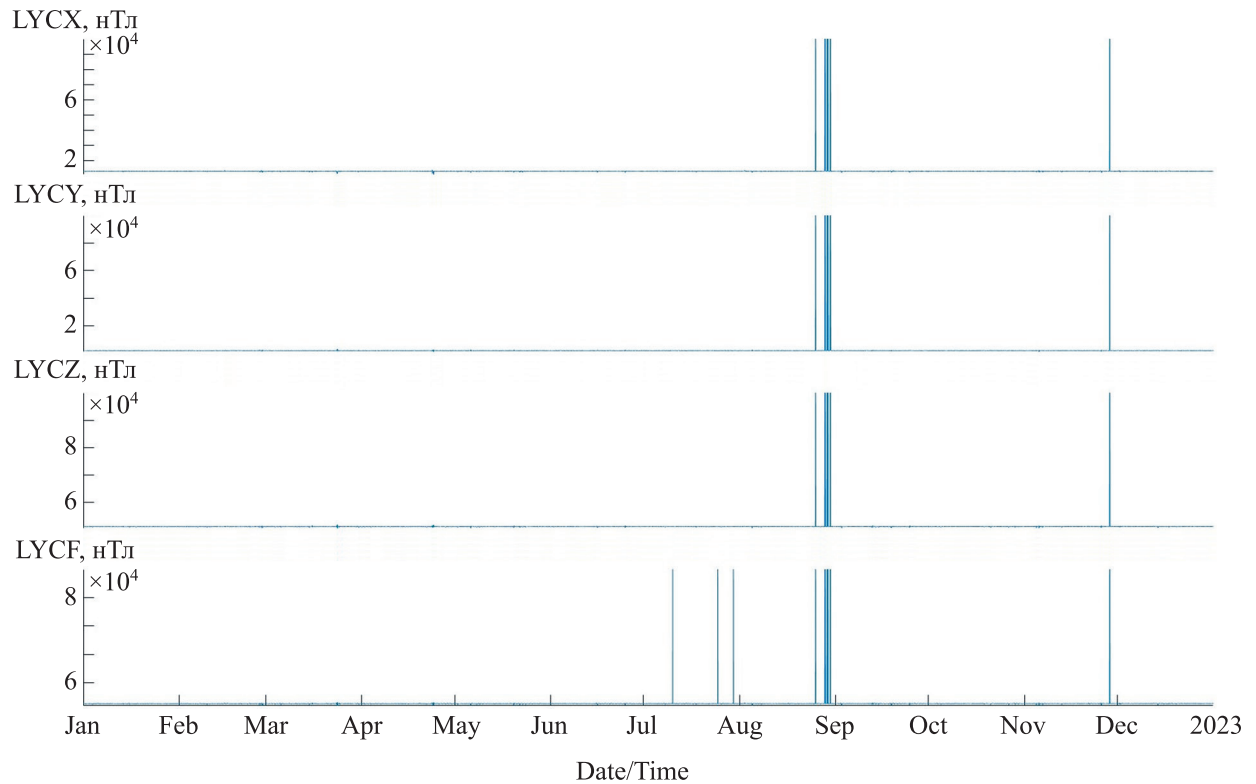


Рис. 1

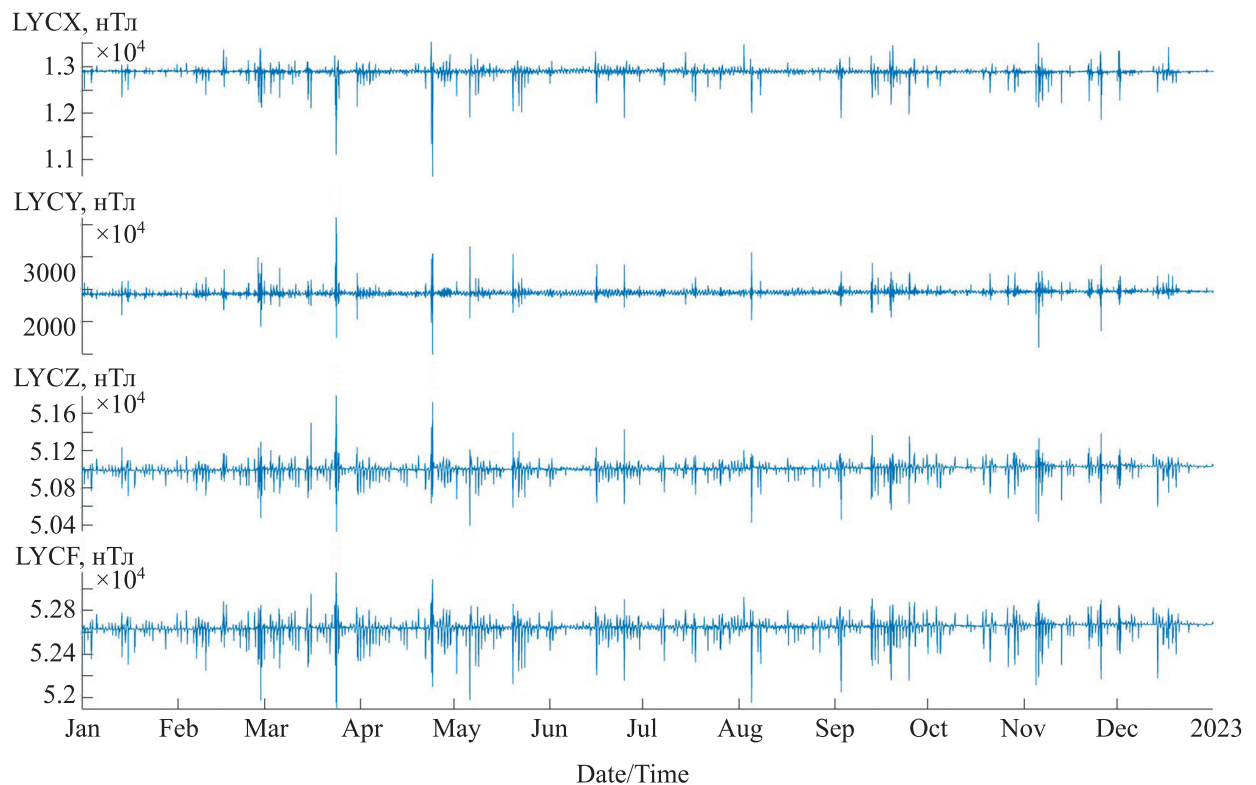


Рис. 2

Решение задачи выделения ГП типа Pc4. В качестве первого шага необходимо удалить тренд из данных. Это можно сделать, например, при помощи одной такой команды:

```
LYC_detrend=detrend(LYC,3);
```

Цифра 3 задает тренд в виде кубического сплайна.

На следующем шаге зададим параметры для полосового цифрового фильтра (ЦФ) в соответствии с нашими условиями:

```
Fs_45_s=1/45; Fs_150_s=1/150; % Диапазон частот Pc4
Fs=1; % Частота дискретизации
Fpass1 = Fs_150_s; % Левая граница частоты полосы пропускания (ПП)
Fpass2 = Fs_45_s; % Правая граница частоты ПП
Fstop1=0.99*Fpass1; % Левая граничная частота полосы задержки (ПЗ)
Fstop2=1.01*Fpass2; % Правая граничная частота ПЗ
Astop1=120; % Величина затухания в левой ПЗ (дБ)
Astop2=120; % Величина затухания в правой ПЗ (дБ)
Apass=0.01; % Величина затухания в ПП (дБ)
```

Создаем полосовой ЦФ с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр) при помощи следующей команды.

```
digital_filter_Pc4= designfilt('bandpassiir', ... % Response type
'StopbandFrequency1', Fstop1, ... % Frequency constraints
'PassbandFrequency1', Fpass1, ...
'PassbandFrequency2', Fpass2, ...
'StopbandFrequency2', Fstop2, ...
'StopbandAttenuation1', Astop1, ...% Magnitude constraints
'PassbandRipple', Apass, ...
'StopbandAttenuation2', Astop2, ...
'DesignMethod','ellip', ... % Design method
'MatchExactly','passband', ... % Design method options
'SampleRate', Fs) % Samplerate
```

Далее, применяя функцию `filtfilt`, пропускаем данные через спроектированный ЦФ с учетом фазовой задержки.

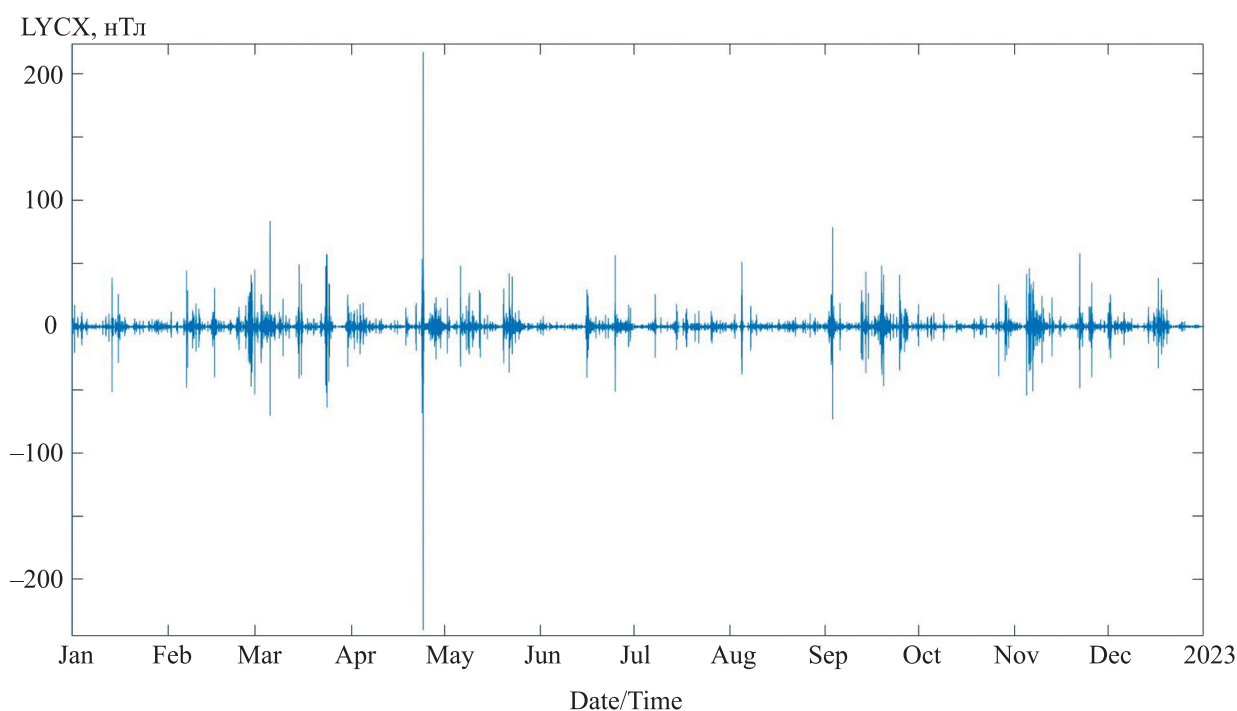


Рис. 3

```
LYC.LYCX = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCX);  
LYC.LYCY = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCY);  
LYC.LYCZ = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCZ);  
LYC.LYCF = filtfilt(digital_filter_Pc4, LYC_detrend.LYCF);
```

Результат такой фильтрации для LYCX за 01.01.2023–31.12.2023 представлен на рис. 3.

Для того чтобы убедиться, что полученные результаты попадают в диапазон ГП Pc4, можно, например, представить данные на небольшом промежутке времени (рис. 4, 03.06.2023 с 03:42 по 03:56).

Анализ рис. 4 показывает, что, обработав предлагаемым кодом исходные данные большого объема, можно выделять колебания с периодами, соответствующими диапазону ГП Pc4.

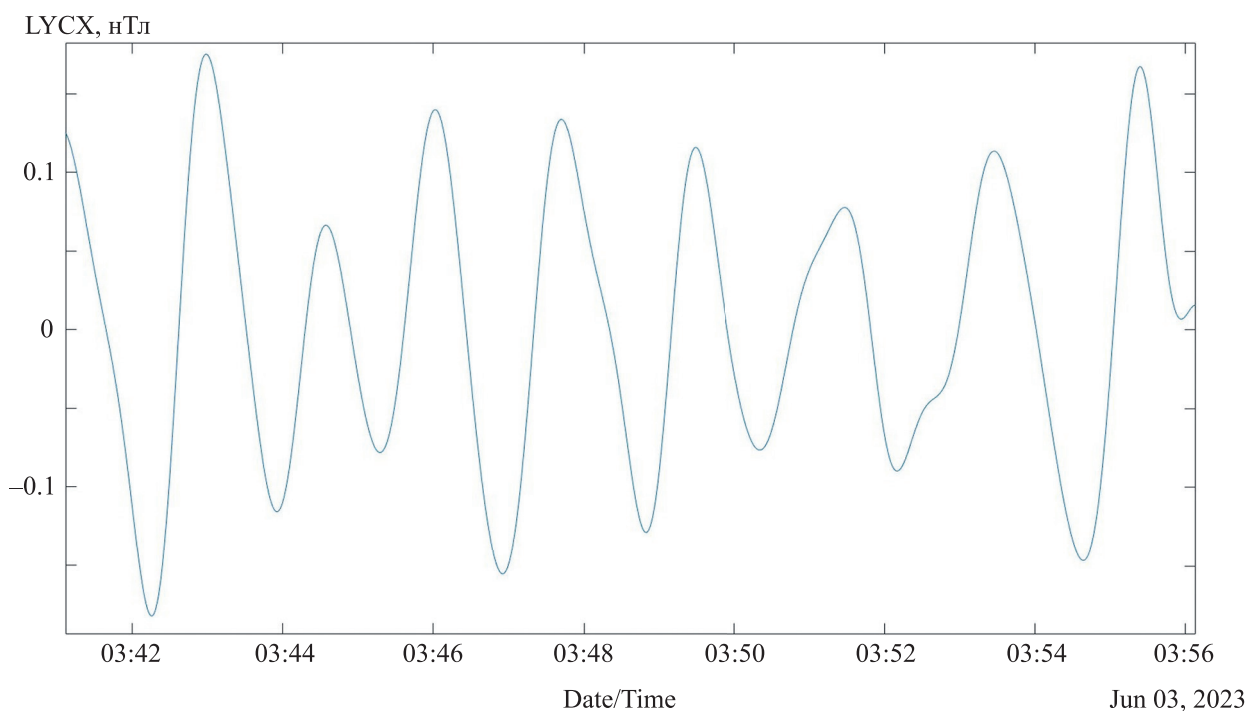


Рис. 4

Заключение. Таким образом, в настоящей работе предложен и реализован подход к решению задачи выделения ГП Pc4 из исходных данных при помощи цифровой фильтрации. Визуальный анализ полученных результатов показывает, что можно хорошо разделять „спокойные“ и „возмущенные“ дни. Дополнительно можно наблюдать фазы развития магнитных бурь (см. рис. 3).

Кроме того, результаты, полученные после обработки с использованием предлагаемого подхода, могут служить входными данными для решения фундаментальных и прикладных задач. Например, изучение УНЧ-волн в магнитосфере, является активно развивающейся областью физики магнитосферы. Основные нерешенные проблемы связаны с развитием кинетической и магнитогидродинамической теории этих волн в трехмерно-неоднородных моделях магнитосферы.

Представленные результаты показывают, что, применяя систему MATLAB, можно достаточно эффективно работать с технологиями BigData, которые позволяют успешно решать геофизические задачи.

В заключение можно отметить, что использование графических процессоров (GPU) также позволит повысить эффективность работы с технологиями BigData, которые реализованы в MATLAB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонович А. С., Мазур В. А. Линейная теория МГД-колебаний магнитосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 480 с.
2. Коробейников А. Г. Применение методов Big Data для сравнения данных геомагнитных обсерваторий сети INTERMAGNET // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 12. С. 993–1001. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-993-1001.
3. Коробейников А. Г. Обработка и анализ данных с российского сегмента мировой сети магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ // Междунар. журн. гуманитарных и естественных наук. 2018. № 8. С. 91–98.
4. Макишанов А. В., Журавлев А. Е., Тындыкарь Л. Н. Большие данные. Big Data. СПб: Лань, 2022. 188 с. ISBN 978-5-8114-9834-5.
5. Гришенцев А. Ю., Коробейников А. Г., Величко Е. Н., Непомнящая Э. К., Розов С. В. Синтез бинарных матриц для формирования сигналов широкополосной связи // Радиотехника. 2015. № 9. С. 51–58.
6. Дьяконов В. П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. М.: ДМК-Пресс, 2016. 976 с.
7. Матюшкин И. В. Моделирование и визуализация средствами MATLAB физики наноструктур. М.: Техносфера, 2011. 168 с.
8. Коробейников А. Г. Применение искусственных нейронных сетей в системах автоматического управления магнитной левитацией // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35, № 3. С. 452–457. DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Анатолий Григорьевич Коробейников — докт. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук; зам. директора по науке; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

Поступила в редакцию 29.01.2024; одобрена после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 16.04.2024.

REFERENCES

1. Leonovich A. S., Mazur V. A. *Lineynaya teoriya magnitogidrodinamicheskikh kolebaniy magnitosfery* (Linear Theory of Magnetohydrodynamic Oscillations of the Magnetosphere), Moscow, 2016, 480 p. (in Russ.)
2. Korobeynikov A. G. *Journal of Instrument Engineering*, 2023, no. 12(66), pp. 993–1001, DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-12-993-1001. (in Russ.)
3. Korobeynikov A. G. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*, 2018, no. 8, pp. 91–98. (in Russ.)
4. Makshanov A. V., Zhuravlev A. E., Tyndykar L. N. *Bol'shiye dannyye. Big data* (Big Data. Big Data), St. Petersburg, 2022, 188 p., ISBN 978-5-8114-9834-5. (in Russ.)
5. Grishentsev A. Y., Korobeynikov A. G., Velichko E. N., Nepomnyashchaya E. K., Rozov S. V. *Radioengineering*, 2015, no. 9, pp. 51–58. (in Russ.)
6. Dyakonov V. P. *MATLAB i SIMULINK dlya radioinzhenerov* (MATLAB and SIMULINK for Radio Engineers), Moscow, 2016, 976 p. (in Russ.)
7. Matyushkin I. V. *Modelirovaniye i vizualizatsiya sredstvami MATLAB fiziki nanostruktur* (Modeling and Visualization by Means of MATLAB of the Physics of Nanostructures), Moscow, 2011, 168p. (in Russ.)
8. Korobeynikov A. G. *Software & Systems*, 2022, no. 3(35), pp. 452–457, DOI: 10.15827/0236-235X.139.452-457. (in Russ.)

DATA ON AUTHOR

Anatoly G. Korobeynikov — Dr. Sci., Professor; Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the RAS, Directorate; E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

Received 29.01.2024; approved after reviewing 08.02.2024; accepted for publication 16.04.2024