

УДК 550.386.6

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РС1

Н. М. Шихова¹, С. В. Анисимов¹, Э. М. Дмитриев¹

Поступила в редакцию 09.11.2017 г.

Разработка методов обнаружения короткопериодных геомагнитных пульсаций в автоматическом режиме является насущной задачей в связи с изучением физики магнитосферы, а также развитием мониторинга и прогноза космической погоды. В работе представлен оригинальный алгоритм автоматического обнаружения геомагнитных пульсаций РС1 в непрерывных амплитудно-временных рядах данных геомагнитных наблюдений. Алгоритм учитывает морфологические свойства и характеристики детектируемых пульсаций, эффективно использует статистические методы анализа рядов данных, позволяет идентифицировать серии пульсаций РС1, а также определять характерные значения частоты и амплитуды пульсаций для каждой серии. С применением данного алгоритма составлен каталог геомагнитных пульсаций РС1, наблюдавшихся на ГО «Борок» ИФЗ РАН в 1998–2014 гг.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: короткопериодные геомагнитные пульсации, геомагнитная активность, компьютерные методы

ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитные пульсации РС1 — короткопериодные колебания магнитного поля Земли с периодом от 0,2 до ~5,0 с и с характерной модуляцией амплитуды в виде отдельных волновых пакетов длительностью около 1–4 мин, повторяющихся через 1–2 мин, что создает сложную картину биений, наблюдающихся, как правило, непрерывными сериями длительностью от нескольких минут до нескольких часов. Эти пульсации были поэтически названы «жемчужинами» (pearl pulsation — PP), поскольку в координатах амплитуда-время магнитограмма РС1 напоминает нитку жемчужного ожерелья. Для характеристики интенсивности «жемчужин» был предложен индекс активности РС1 [1], где за единицу измерения принимался 15 мин интервал, в котором РС1 пульсации наблюдались не менее 5 мин. Индекс представлял собой сумму таких интервалов за сутки.

До перехода регистрации геомагнитных пульсаций с аналоговой на цифровую, выделение пульсаций РС1 проводилось, как правило, визуально. Внедрение цифровой регистрации геомагнитного поля значительно расширило технические и математические возможности анализа геомагнитных пульсаций и создало возможность автоматического выделения пульсаций РС1 в непрерывных цифровых амплитудно-временных рядах данных. Первоначально для этого применялись простейшие компьютерные методы идентификации геомагнитных пульсаций на спектрально-временных диаграммах. Наиболее употребительным был компьютерный поиск в зарегистрированном спектре пиков, превышающих заданное пороговое значение и лежащих в частотной области, соответствующей искомому типу пульсаций [2, 3]. Для более уверенного определения геомагнитных пульсаций на фоне возможных техногенных помех задавались пороговые значения интенсивности и длительности пульсаций [4]. В дальнейшем были разработаны алгоритмы анализа спектрально-временных диаграмм, не только применяющие более тонкие методы идентификации геомагнитных пульсаций, но и позволяющие рассчитывать их характеристики [5].

В последние годы для автоматического обнаружения геомагнитных пульсаций в данных наземных и спутниковых наблюдений на основе частотно-временного анализа наряду с преобразованием Фурье широко применяются вейвлет-преобразования [6, 7]. В ряде работ для автоматического выделения геомагнитных пульсаций того или иного типа применяется фильтрация данных геомагнитных наблюдений в соответствующей полосе частот [8–10]. Однако, в большинстве работ и ныне применяются усовершенствованные алгоритмы идентификации геомагнитных пульсаций на основе анализа спектрально-временных диаграмм [11].

¹ Шихова Наталья Михайловна, с. н. с., ГО «Борок» ИФЗ РАН, (48547)24631, e-mail: extern@borok.yar.ru

¹ Анисимов Сергей Васильевич, директор, ГО «Борок» ИФЗ РАН, (48547)24663, e-mail: director@borok.yar.ru

¹ Дмитриев Эльдар Михайлович, ученый секретарь, ГО «Борок» ИФЗ РАН, (48547)24196, e-mail: eldar@borok.yar.ru

В настоящей работе описан оригинальный алгоритм автоматического выделения геомагнитных пульсаций Pc1 в данных цифровой регистрации геомагнитного поля на геофизической обсерватории «Борок» — филиале Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ГО «Борок» ИФЗ РАН). Алгоритм эффективно использует статистические методы анализа рядов данных, позволяет идентифицировать серии пульсаций Pc1, а также рассчитывать характерные значения частоты и амплитуды пульсаций для каждой серии. С применением данного алгоритма составлен каталог геомагнитных пульсаций Pc1, наблюдавшихся на ГО «Борок» ИФЗ РАН в 1998–2014 гг.

ДАННЫЕ

ГО «Борок» ИФЗ РАН (географические координаты: 58°04' N; 38°14' E) ведет непрерывные геомагнитные наблюдения с момента своего основания в 1957 г. Сохраняющийся низкий уровень антропогенного электромагнитного и естественного сейсмического шума позволяет ГО «Борок» ИФЗ РАН и по сей день осуществлять непрерывный мониторинг естественных геофизических полей. В настоящее время на ГО «Борок» ИФЗ РАН непрерывно регистрируются также аэроэлектрические, аэрофизические и метеорологические поля [12, 13]. Геомагнитные наблюдения [14] включают цифровую регистрацию короткопериодных колебаний, длиннопериодных вариаций и главных компонент магнитного поля Земли [15].

В качестве датчиков короткопериодных геомагнитных пульсаций в измерительном комплексе обсерватории используются индукционные магнитометры [16], ориентированные в направлении север–юг (H_x), восток–запад (H_y) и вертикально (H_z). Линейная частотная характеристика магнитометров (рис. 1) позволяет компенсировать спектральную неоднородность и регистрировать геомагнитные пульсации в широком динамическом диапазоне. Коэффициент передачи индукционного датчика с усилителем составляет около 1 В/(нТл·Гц) в частотном диапазоне 0,001–3,0 Гц при уровне шума индукционного магнитометра 0,5 пТл/Гц^{1/2} на частоте $f = 1$ Гц.

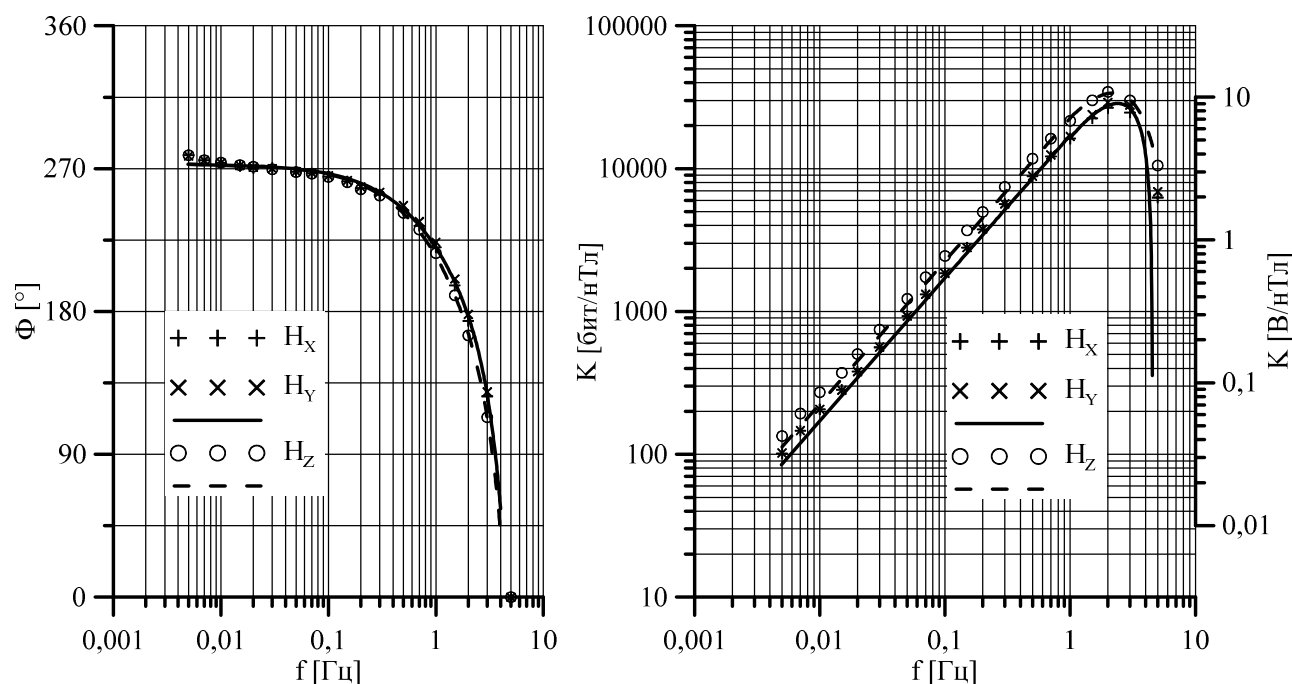


Рис. 1. Фазочастотная $\Phi(f)$ и амплитудно-частотная $K(f)$ характеристики индукционных магнитометров ГО «Борок» ИФЗ РАН.

По данным аналоговой регистрации, представляющих собой записи фоторегистратора с протяжкой 30 мм/мин, был составлен каталог геомагнитных пульсаций Pc1, наблюдавшихся на геофизической обсерватории «Борок» в 1958–1997 гг. [17]. В 1997 г. на геофизической обсерватории «Борок» была введена цифровая регистрация результатов обсерваторских геофизических наблюдений. Непрерывная цифровая регистрация пульсаций геомагнитного поля производится основной обсерваторской системой сбора данных. Тактовая частота сбора данных составляет 10 Гц. Привязка результатов наблюдений к мировому времени обеспечивается высокоточным GPS-приемником. С появлением

цифровой регистрации активно развивается компьютерная обработка результатов геофизических наблюдений [18–20]. В частности, по данным наблюдений длиннопериодных вариаций геомагнитного поля в режиме реального времени вычисляются К-индексы геомагнитной активности [21]. По данным наблюдений короткопериодных геомагнитных пульсаций ежедневно строятся спектрально-временные диаграммы. Пример такой диаграммы представлен на рис. 2.

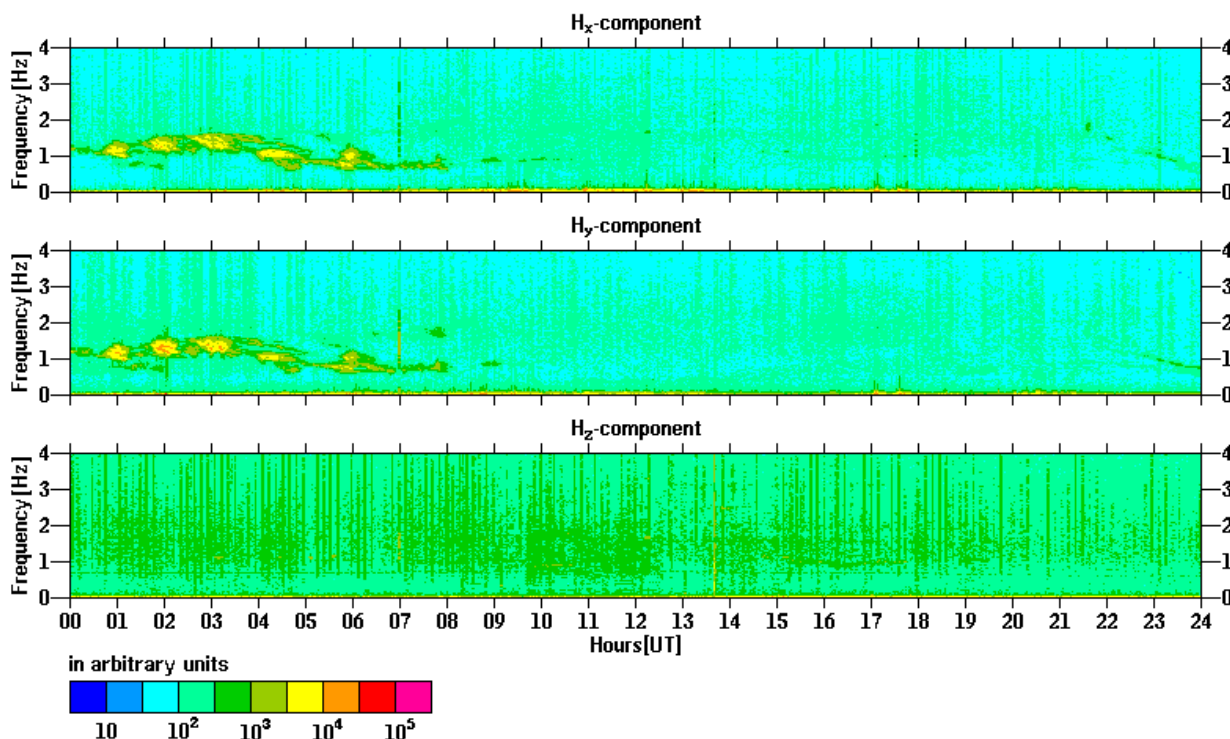


Рис. 2. Пример суточной спектрально-временной диаграммы ультранизкочастотных (0,001 – 4 Гц) пульсаций компонент геомагнитного поля по данным ГО «Борок» ИФЗ РАН от 4 января 2016 г.

Для компонент геомагнитного поля H_X и H_Y в начале суток на диаграмме можно визуально определить пульсации с частотами примерно 0,5–1,5 Гц. Однако, интервал наличия пульсаций типа Pc1, точное время их начала и окончания, а также характерные частоту и амплитуду по диаграммам такого типа установить затруднительно, а в большинстве случаев — невозможно. Для обнаружения пульсаций Pc1, а также автоматического определения основных характеристик данного класса пульсаций, был разработан и реализован компьютерный алгоритм, представленный в следующем разделе статьи.

АЛГОРИТМ

Алгоритм, разработанный авторами, осуществляет автоматическое обнаружение геомагнитных пульсаций диапазона Pc1 с учетом их морфологических свойств и характеристик. Для обработки использовались временные ряды данных наблюдений компоненты H_X геомагнитного поля, поскольку, как показал анализ данных геомагнитных наблюдений ГО «Борок» ИФЗ РАН, именно для этой компоненты отношение «сигнал-шум» максимально.

На первом шаге алгоритма временной ряд данных разбивается на последовательные отрезки из N отсчетов, для каждого из которых при помощи быстрого преобразования Фурье строится спектр мощности сигнала (рис. 3, а–б). Тем самым формируется последовательность спектров, соответствующая спектрально-временной диаграмме. Для данных ГО «Борок» ИФЗ РАН было выбрано значение $N = 300$, что при частоте дискретизации 10 Гц соответствует временному интервалу 30 с.

В полученных спектрах определяются максимумы, лежащие в заданной полосе частот от f_{\min} до f_{\max} . В нашем случае были заданы значения $f_{\min} = 0,2$ Гц, что соответствует нижней границе частотного диапазона пульсаций Pc1, и $f_{\max} = 3$ Гц, что обусловлено амплитудно-частотными характеристиками используемых индукционных магнитометров (рис. 1). Далее отбираются максимумы спектров, отношение которых к среднему значению спектральной мощности для данного спектра превышает некоторую пороговую величину (рис. 3, б). Конкретная пороговая величина рассчитывалась для заданной

обеспеченности p с использованием статистических таблиц распределения χ^2 [22]. В нашем случае задавалось $p = 0,99$, что гарантировало достоверность идентификации пульсаций Pc1 в анализируемом интервале с вероятностью 99 %.

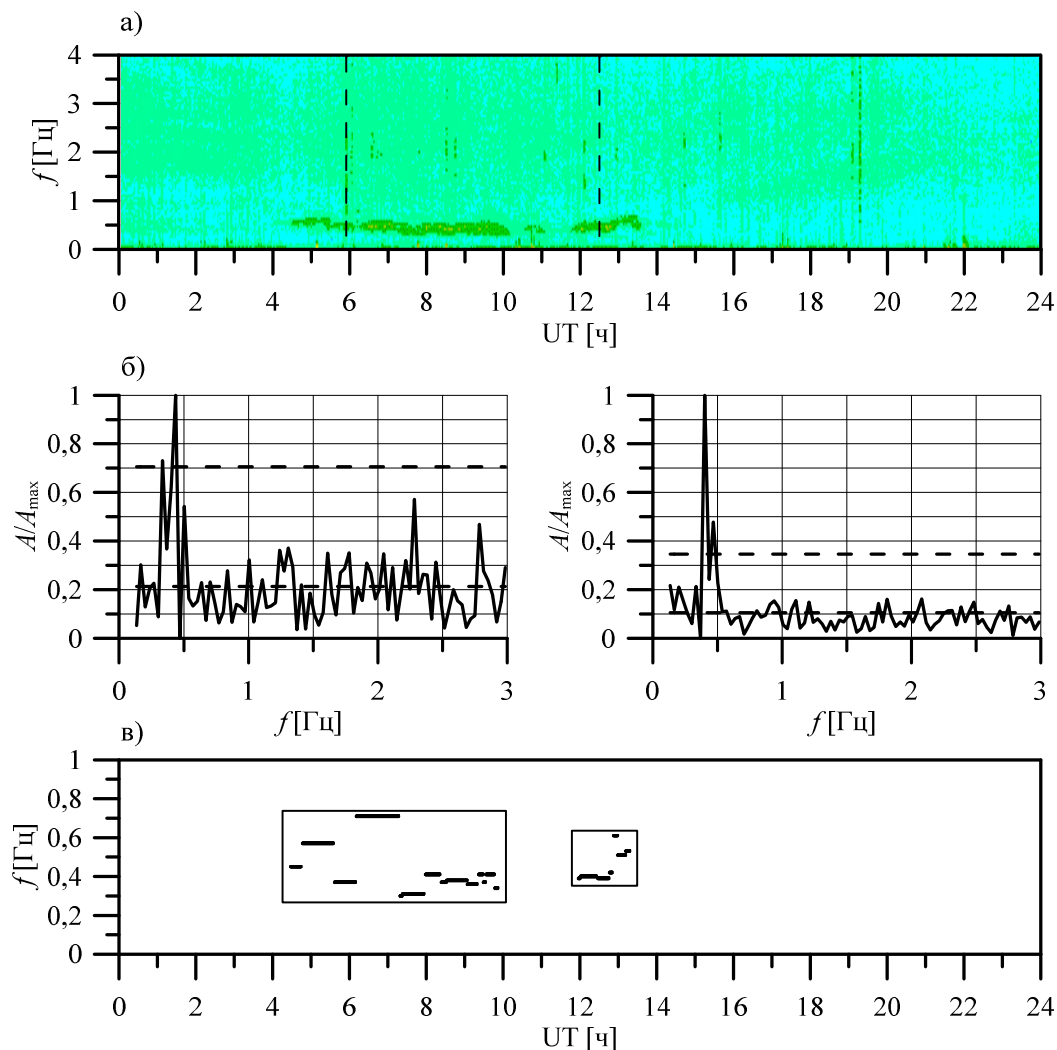


Рис. 3. Пример обнаружения геомагнитных пульсаций Pc1 по данным ГО «Борок» ИФЗ РАН от 31 октября 2006 г. а) — спектрально-временная диаграмма. б) — динамические спектры $A(f)$ для моментов времени, отмеченных на рисунке (а) пунктирными линиями. Спектры нормированы на максимальное значение A_{max} . Пунктирными линиями показаны средняя амплитуда и пороговое значение амплитуды для выделения спектральных максимумов, соответствующих пульсациям Pc1. в) — выявление геомагнитных пульсаций Pc1 и объединение их в серии (отмечены прямоугольниками).

Затем алгоритм выявляет непрерывные последовательности обнаруженных на предыдущем шаге временных интервалов, в каждом из которых наличие спектральных составляющих диапазона Pc1 было признано достоверным. Волновой пакет пульсаций Pc1 считается обнаруженным в случае его наличия не менее чем в двух последовательных временных интервалах с общей длительностью 1 мин. Заметим, что средняя продолжительность волнового пакета серии пульсаций Pc1 составляют (1–4) мин [23]. Следующие друг за другом волновые пакеты с паузой не более 2 мин объединяются в серии (Рис. 3, в).

Наконец проводится отбор пульсаций по пороговым значениям амплитуды и дисперсии частоты. Экспертным путем были определены пороговые значения амплитуды в диапазоне 3–300 пТл, а также стандартной погрешности средней частоты волнового пакета в диапазоне 0,002–0,150 Гц, начиная с которых обнаруженные волновые пакеты считаются относящимися к пульсациям Pc1. Выбранный диапазон стандартной погрешности частоты позволил исключить из каталога наряду с помехами

также «колебания убывающего периода», так как их девиация частоты существенно превышает заданный диапазон.

На заключительном этапе для каждой обнаруженной серии пульсаций Pc1 определяются: время начала серии (с точностью до 30 с), продолжительность серии, средние значения амплитуды и частоты, а также их среднеквадратическая погрешность, максимальные и минимальные величины амплитуды, число отдельных волновых пакетов в каждой серии Pc1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием разработанного алгоритма создан каталог зарегистрированных в обсерватории «Борок» в 1998–2014 гг. серий пульсаций Pc1 и их основных морфологических характеристик. Фрагмент каталога, приведён в таблице 1. Каталог дает возможность анализировать динамику возникновения серий Pc1 в широком диапазоне временных интервалов от десятка лет до часа.

Таблица 1. Фрагмент каталога серий пульсаций Pc1. $\langle f \rangle$ — средняя частота в серии; Δf — стандартная погрешность средней частоты; $\langle A \rangle$ — средняя амплитуда пульсаций в серии; ΔA — стандартная погрешность амплитуды.

№ серии в каталоге	Год	Месяц	День	Время начала чч:мм:сс	Длительность, с	$\langle f \rangle$, Гц	Δf , Гц	$\langle A \rangle$, нТл	ΔA , нТл	Число всплесков
360	2001	11	14	15:49:30	3240	1.380	0.029	0.040	0.008	5
361	2001	11	15	04:24:00	14100	1.260	0.070	0.025	0.003	16
362	2001	11	16	05:24:00	2790	1.460	0.012	0.027	0.006	5
363	2001	11	30	05:06:30	3000	0.760	0.011	0.022	0.002	4
364	2001	11	30	13:00:30	11340	1.270	0.102	0.034	0.007	9
365	2001	12	3	01:20:30	4560	1.490	0.020	0.011	0.002	4
366	2001	12	12	00:36:30	10140	0.570	0.010	0.043	0.004	11
367	2001	12	27	00:15:00	2730	0.240	0.038	0.038	0.004	3
368	2002	1	14	03:20:00	3210	0.230	0.028	0.040	0.003	4
369	2002	1	15	06:38:30	15630	0.230	0.041	0.074	0.014	7
370	2002	4	15	01:40:30	2400	0.740	0.015	0.035	0.003	3
371	2002	4	28	00:49:00	3810	1.070	0.057	0.052	0.005	7
372	2002	5	16	18:30:30	2370	1.760	0.047	0.008	0.000	4
373	2002	5	21	21:36:00	3990	0.980	0.045	0.023	0.005	7
374	2002	5	26	05:54:00	1770	1.390	0.095	0.012	0.002	3
375	2002	5	30	20:41:30	7320	1.030	0.057	0.018	0.001	11
376	2002	6	13	18:46:30	1110	0.230	0.026	0.101	0.037	3
377	2002	6	19	01:49:00	1350	0.270	0.012	0.089	0.018	3
378	2002	7	1	04:11:00	3180	0.230	0.019	0.128	0.016	5
379	2002	8	4	18:11:30	1680	1.340	0.015	0.010	0.000	3
380	2002	8	22	17:50:00	1470	1.280	0.024	0.013	0.002	4
381	2002	8	24	04:02:30	3330	1.180	0.032	0.010	0.001	3
382	2002	8	26	15:45:00	3030	0.350	0.117	0.089	0.021	4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и реализован алгоритм обнаружения в амплитудно-временных рядах геомагнитных данных геомагнитных пульсаций типа Pc1. Алгоритм включает спектральный анализ данных с оценкой значимости спектральных составляющих, оценку амплитуд, периода и длительности серий выделенных пульсаций Pc1. На основе обработки цифровых амплитудно-временных рядов данных наземных геомагнитных наблюдений ГО «Борок» ИФЗ РАН в частотном диапазоне 0,2–3,0 Гц с использованием разработанного алгоритма создан каталог зарегистрированных на ГО «Борок» ИФЗ РАН в 1998–2014 гг. серий пульсаций Pc1. Каталог содержит основные морфологические характеристики серий пульсаций Pc1 и создает возможность анализировать их динамику в широком диапазоне временных интервалов от десятка лет до часа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-01242).

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеева Э. Т. Индекс активности геомагнитных пульсаций Pc1 («жемчужин») // «Солнечные данные», 1972, №5, С. 108–112.
2. Anderson B. J., Erlandson R. E., Zanetti L. J. A statistical study of Pc 1–2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: 2. Wave properties // *J. Geophys. Res.*, 1992, V. 97, P. 3089–3101, doi: 10.1029/91JA02697.
3. Erlandson R. E., Anderson B. J. Pc 1 waves in the ionosphere: A statistical study // *J. Geophys. Res.*, 1996, V. 101, P. 7843–7858, doi: 10.1029/96JA00082.
4. Loto'aniu T. M., Fraser B. J., Waters C. L. Propagation of electromagnetic ion cyclotron wave energy in the magnetosphere // *J. Geophys. Res.*, 2005, V. 110, doi:10.1029/2004JA010816.
5. Bortnik J., Cutler J. W., Dunson C., Bleier T. E. An automatic wave detection algorithm applied to Pc1 pulsations // *J. Geophys. Res.*, 2007, V. 112, A04204, doi:10.1029/2006JA011900.
6. Balasis G., Daglis I. A., Georgiou M., Papadimitriou C., Haagmans R. Magnetospheric ULF wave studies in the frame of Swarm mission: a time-frequency analysis tool for automated detection of pulsations in magnetic and electric field observations // *Earth Planets Space*, 2013, V. 65, P. 1385–1398.
7. Kunagu, P., Balasis G., Lesur V., Chandrasekhar E. Wavelet characterization of external magnetic sources as observed by CHAMP satellite: evidence for unmodeled signals in geomagnetic field models // *Geophys. J. Int.*, 2013, V. 192, P. 946–950.
8. Hamar D., Tarcsai G. High resolution frequency time analysis of whistlers using digital matched filtering, part 1: theory and simulation studies // *Ann. Geophys.*, 1982, V. 38, P. 119–128.
9. Singh R. P., Singh D. K., Singh A. K., Hamar D., Lichtenberger J. Application of matched filtering and parameter estimation technique to low latitude whistlers // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 1999, V. 61, P. 1081–92.
10. Зелинский Н. Р., Клейменова Н. Г., Козырева О. В., Агаян С. М., Богоутдинов Ш. Р., Соловьев А. А. Алгоритм распознавания геомагнитных пульсаций Pc3 на секундных данных экваториальных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ // *Физика Земли*. 2014. № 2. С. 91–99.
11. Park J., Luhr H., Rauberg J. Global characteristics of Pc1 magnetic pulsations during solar cycle 23 deduced from CHAMP data // *Ann. Geophys.*, 2013, V. 31, P. 1507–1520.
12. Анисимов С.В., Дмитриев Э.М., Информационно-измерительный комплекс и база данных Геофизической обсерватории «Борок» РАН, Москва, ОИФЗ РАН, 2003, 57 С.
13. Anisimov S. V., Chulliat A., Dmitriev E. M. Information-measuring complex and database of mid-latitude Borok Geophysical Observatory // *Russian Journal of Earth Sciences*, 2008, V. 10, ES3007, doi:10.2205/2007ES000227.
14. Анисимов С. В., Дмитриев Э. М., Афиногенов К. В., Гурьев А. В. Геомагнитные наблюдения на геофизической обсерватории «Борок» // *Вестник Отделения наук о Земле РАН*, 2011, Т. 3, NZ5002, doi: 10.2205/2011NZ00010.
15. Anisimov S. V., Chulliat A. The Borok INTERMAGNET magnetic observatory // *Russian Journal of Earth Sciences*, 2008, V. 10, ES3003, doi:10.2205/2007ES000238.
16. Анисимов С. В., Боровков Ю. Е., Гончаров В. И., Рубан В. Ф., Русаков Н. Н. Высокочувствительный полевой магнитометр с МДМ усилителем // *Результаты исследований по международным геофизическим проектам: геомагнитные исследования*, 1982, № 30, М.: Радио и связь, С. 43–45.
17. Матвеева Э. Т. Каталог колебаний Pc1, зарегистрированных на обсерватории «Борок» (58.03 N, 38.97 E) с 1958 по 1997 годы, 1997, http://www.wdcb.ru/stp/data/catal_pc.
18. Анисимов С. В., Дмитриев Э. М., Сычева Н. К., Сычев А. Н., Щербаков В. П., Виноградов Ю. К. Информационные технологии в геомагнитных измерениях на Геофизической обсерватории «Борок» // *Геофизические исследования*, 2008, Т. 9, № 3.
19. Анисимов С. В., Дмитриев Э. М. Геоинформационные технологии геомагнитных наблюдений на Геофизической обсерватории «Борок» // *Российский журнал наук о Земле*, 2009, Т. 11, doi: 10.2205/2009ES000401.
20. Анисимов С. В., Дмитриев Э. М. Информатизация геомагнитных наблюдений на геофизической обсерватории «Борок» // *Вестник Отделения наук о Земле РАН*, 2010, Т. 2, NZ6005.
21. Анисимов С. В., Дмитриев Э. М., Гурьев А. В., Филиппов В. А. Вычисление К-индексов геомагнитной активности в режиме реального времени // *Гелиогеофизические исследования*, 2015, вып. 13, С. 62–72.
22. Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. М.: Издательство иностранной литературы, 1956. 664 с.
23. Troitskaya V. A. Rapid variations of the electromagnetic field of the Earth // *Res. Geophys.*, 1964 V. 1, P. 485–532.

AUTOMATIC DETECTION OF SHORT-PERIOD GEOMAGNETIC PULSATIONS PC1

N. M. Shikhova, S. V. Anisimov, E. M. Dmitriev

Automatic detection of short-period geomagnetic pulsations is a vital task, closely linked to investigation of magnetospheric processes, monitoring and forecast of space weather. The original algorithm of automatic detection of Pc1 geomagnetic pulsations in data series of continuous geomagnetic observations is presented. The algorithm considers morphological properties and characteristics of detected pulsations, effectively uses statistical methods to analyze the data series, allows to identify series of Pc1 pulsations and also to obtain characteristic frequencies and amplitudes in the series of Pc1. The catalog of Pc1 geomagnetic pulsations observed in Borok geophysical observatory in 1998–2014 is made with usage of the algorithm.

KEYWORDS: SHORT-PERIOD GEOMAGNETIC PULSATIONS, GEOMAGNETIC ACTIVITY, COMPUTER TECHNIQUES