

УДК 550.385

БИОТРОПНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ $Pc1$, НАБЛЮДАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА

© 2022 г. А.П. Сливинский

Украинский радиотехнический институт, г. Николаев, Украина

e-mail: slivinsky40@gmail.com

Поступила в редакцию 02.02.2022 г.; после доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 14.07.2022 г.

Аннотация. Для регистрации спектральных компонент геомагнитного поля использовались данные, полученные с помощью детектора магнитного поля на основе датчиков Холла. Анализ особенностей спектральных характеристик геомагнитных колебаний показал, что вариации, выделенные в окрестности сильной магнитной бури 04.11.2021 г., являются колебаниями типа «жемчужин», т.е. биотропными геомагнитными пульсациями $Pc1$. «Жемчужины» наблюдались также и в окрестностях некоторых слабых магнитных бурь 2021–2022 гг., в том числе и в отсутствие магнитных возмущений. В то же время не наблюдались «жемчужины» при прохождении некоторых сильных магнитных бурь. Таким образом, утверждение о неблагоприятном воздействии на состояние организма человека только магнитовозмущенных периодов не совсем корректно.

Ключевые слова: $Pc1$ -пульсации, магнитные бури, биотропность, «жемчужины».

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-2>

Цитирование: Сливинский А.П. Биотропные геомагнитные пульсации $Pc1$, наблюдаемые с помощью детектора магнитного поля на основе датчиков Холла // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 3. С. 10–17. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-2>

ВВЕДЕНИЕ.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Пульсации в СНЧ-участке спектра (гидромагнитные шипения, колебания нарастающей частоты) возбуждаются по причине кинетической неустойчивости распределения энергичных частиц, заполняющих магнитосферу Земли. Напротив, механизм генерации длинноволновых пульсаций (собственных колебаний магнитосферы) – неустойчивость гидродинамического типа, возникающая, например, при обтекании магнитосферы солнечным ветром. Наиболее разработана в линейном приближении теория циклотронной неустойчивости протонов внешнего радиационного пояса. Эта неустойчивость, в которой многие авторы видят причину появления «жемчужин», обусловлена анизотропией распределения энергичных протонов по скоростям.

Геомагнитные пульсации $Pc1$ представляют собой гидромагнитные волны естественного происхождения в диапазоне 0.2–5 Гц. Центральная частота этих волн меняется в зависимости от уровня геомагнитной активности: при очень низкой геомагнитной активности ($Kp < 2$) центральная частота составляет 0.5–0.7 Гц, а при $Kp = 2–3$ она находится в диапазоне 1.0–1.2 Гц [Фейгин и др., 2015]. Подобные пульсации могут быть успешно использованы, например, для диагностики магнитосферы Земли, электромагнитного зондирования земной коры, в геологоразведке.

На ленте самописца магнитограмма напоминает нитку жемчужного ожерелья. На основании этого для обозначения подобных временных квазимонохроматических серий в диапазоне $Pc1$ с амплитудой порядка $\sim 10^{-2}–10^{-1}$ нТл в работе [Клейменова, Троицкая, 1992] был предложен термин «жемчужины». Действие столь слабых магнитных полей на биосистемы составляет объект исследований магнитобиологии. Ее современное развитие сопровождается рядом объективных трудностей, связанных со значительным отставанием теории от эксперимента.

Академический интерес к данной проблематике сдерживается отсутствием ясного физического объяснения экспериментальных данных и явным дисбалансом представленности в магнитобиологии физической и биологической науки: участие физиков в решении проблем магнитобиологии крайне незначительно. Тем не менее в научной литературе проблема неблагоприятного (биотропного) воздействия магнитных бурь на биосферу и здоровье человека обсуждается уже более 50 лет.

Действие слабых магнитных полей в диапазоне $Pc1$ находится ниже порога включения защитных биологических механизмов и поэтому способно накапливаться на субклеточном уровне. Эти пульсации могут быть биотропными (неблагоприятными по качеству воздействия на человеческий организм). В работе [Клейменова, Троицкая, 1992] высказано предположение, что биотропное действие магнитных бурь зависит

от волновой структуры и спектра геомагнитных пульсаций, представляющих так называемую тонкую структуру магнитной бури. Отсюда следует более строгое утверждение, что не всякая магнитная буря биотропна и только скрупулезный анализ спектрального портрета магнитной бури может дать ответ о пагубности ее воздействия.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные о состоянии геомагнитного поля Земли получают с помощью дорогостоящего оборудования стационарных наземных и спутниковых магнитометров, в связи с чем мониторинг тонкой спектральной структуры геомагнитного поля весьма затруднителен. Для преодоления этих трудностей при решении прикладных задач в работе [Кубов, Сливинский, 2014] предложен простой экономичный метод мониторинга геомагнитного поля Земли с использованием датчиков Холла. Этот измерительный комплекс при соответствующей автоматизации предполагает экономически выгодную и технически доступную возможность регистрации в реальном времени локальных возмущений геомагнитного поля как в исследовательских целях университетских лабораторий, так и в профилактических целях – для оповещения широких слоев населения о текущих неблагоприятных условиях.

В рамках метода нами была показана возможность регистрации временной последовательности ежесекундных значений амплитуды геомагнитного поля Земли в режиме реального времени с последующей архивацией данных и их спектральной обработкой. Исследования проводились на стенде Украинского радиотехнического института (УРТИ), г. Николаев.

С 2015 г. архивирование показаний детектора магнитного поля на основе датчиков Холла производилось с тактом 0.1 с (частота дискретизации – 10 Гц). Использование частоты дискретизации 10 Гц привело к тому, что подлежащий обработке объем сигнальной информации по сравнению с условиями посекундной обработки при одних и тех же временных промежутках возрос на порядок. Это позволяет надеяться на возможность выделения «жемчужин» с амплитудами на порядок меньше единиц нанотесла за счет соответствующего увеличения когерентного накопления сигнальной информации в процессе спектральной обработки.

В условиях прохождения длительной сильной магнитной бури, произошедшей 17.03.2015 г., архивирование показаний детектора магнитного поля на стенде УРТИ проводилось непрерывно в течение нескольких месяцев. При спектральной обработке сигнальной информации были успешно выделены геомагнитные пульсации $Pc1$ типа «жемчужин». Результаты наблюдений подробно представлены в работе [Сливинский, 2015].

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После 2015 г. по различным причинам регулярная регистрация геомагнитного поля на стенде УРТИ некоторое время не проводилась. Архивирование на отдельных отрезках времени возобновилось с 2019 г. и проводилось, подстраиваясь, по возможности, к моментам прохождения магнитных бурь. Однако в связи

с низкой солнечной активностью (и соответственно, редким возникновением магнитных бурь) и частыми аппаратно-программными сбоями (в том числе и по причине эпидемии COVID-19) регистрация таких событий осуществлялась крайне редко. Тем не менее в окрестности длительной и сильной магнитной бури 04.11.2021 г. на стенде УРТИ осуществлялась архивная запись с 11 до 17 ч местного времени. На рис. 1 представлены результаты регистрации вариаций магнитного поля Земли по данным Магнитной обсерватории Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва; г. Троицк (ИЗМИРАН).

Сохраненная на стенде УРТИ запись с 9 до 15 ч местного времени состояла из $n = 248\,902$ 0.1-секундных отсчетов. На первом этапе был проведен расчет спектра с основанием Фурье равным n . Так как рассматривалась только действительная часть преобразования Фурье, число фильтров в основании Фурье-спектров, представленных на рис. 1, равнялось $n/2$.

Если максимум спектральной плотности наблюдался в фильтре с номером f , то период T соответствующего колебания оценивался с помощью выражения $T(c) = 0.1(n/f)$. На рис. 2 представлены результаты расчета спектра для интервала времени с 12 до 18 ч местного времени 04.11.2021 г.

Согласно представленным на рис. 2 данным, наибольшие значения спектральной плотности по оценкам величины отношения сигнал/шум S/N (отмечены кружками) принадлежат фильтрам с номерами $f_1 = 5570$, $(S/N) \approx 1.5$; $f_2 = 69\,457$, $(S/N) \approx 1.2$ и $f_3 = 106\,122$, $(S/N) \approx 3.65$. Соответствующие оценки периодов колебаний: $T_1 = 0.1(n/f_1) = 4.46$ с ($1/T_1 = 0.22$ Гц), $T_2 = 0.1(n/f_2) = 0.358$ с ($1/T_2 = 2.79$ Гц) и $T_3 = 0.1(n/f_3) = 0.2345$ с ($1/T_3 = 4.26$ Гц). Таким образом, согласно определению достаточности признака, выделенные периоды колебаний могут принадлежать геомагнитным пульсациям из группы $Pc1$. Для более детального анализа на рис. 3 приводится спектральная структура наибольшего по величине амплитуды спектральной плотности сигнала T_3 .

В соответствии с данными, приведенными на рис. 3, структура сигнала T_3 носит ярко выраженный мультиплетный характер, что может косвенно указывать на наличие внутри мультиплетной группы необходимого признака сигналов типа «жемчужин».

На втором этапе для подтверждения достаточности признака обнаружения сигналов типа «жемчужин» сохраненная запись с 12 до 18 ч местного времени была разбита на семь часовых интервалов. Результаты проведенного спектрального анализа для каждого часового интервала демонстрируются в табл. 1. Кроме того, были привлечены еще три часовых интервала – 19, 20 и 21 ч.

Согласно данным, приведенным в табл. 1, просматривается дрейф частоты, характеризующий достаточность обнаружения признака сигналов типа «жемчужин». Серии представленных «жемчужин» состоят из дискретных тонов как с нарастающей, так и с уменьшающейся частотой. Здесь следует отметить, что в 12, 13 и 21 ч (отмечены прочерками) действительно отсутствовали пульсации типа $Pc1$.

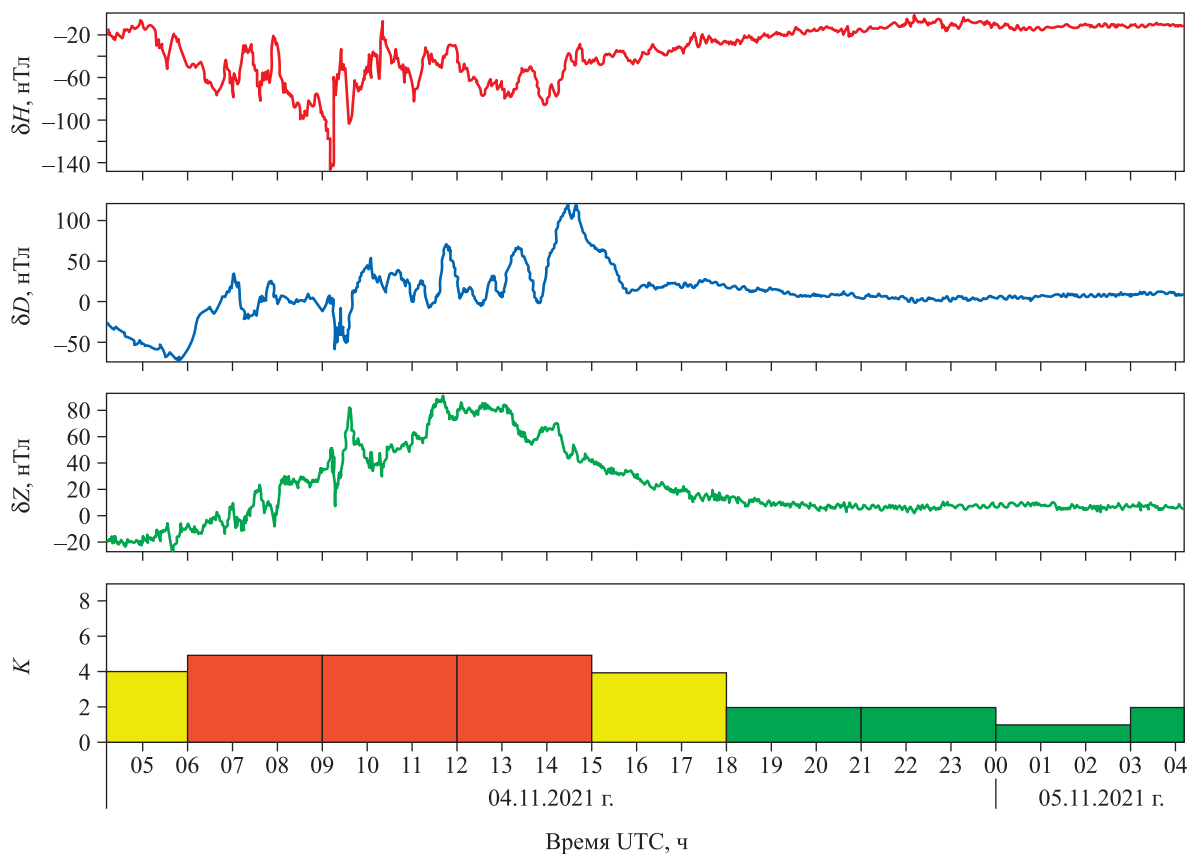


Рис. 1. Иллюстрация измерений вариаций геомагнитного поля Земли в окрестности продолжительной магнитной бури 04.11.2021 г. по данным Магнитной обсерватории ИЗМИРАН

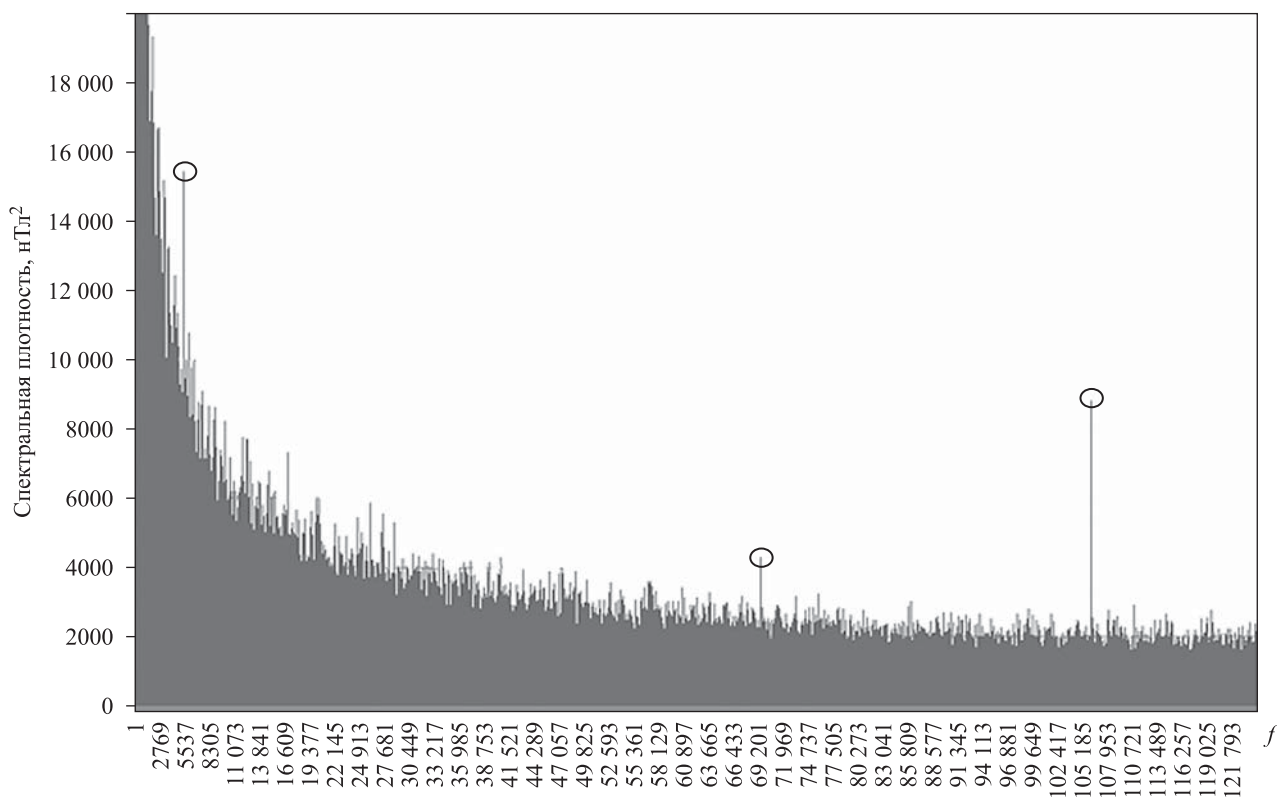


Рис. 2. Результаты расчета спектра геомагнитного поля 04.11.2021 г. на интервале с 12 до 18 ч местного времени
Кружками отмечены максимальные значения спектральной плотности

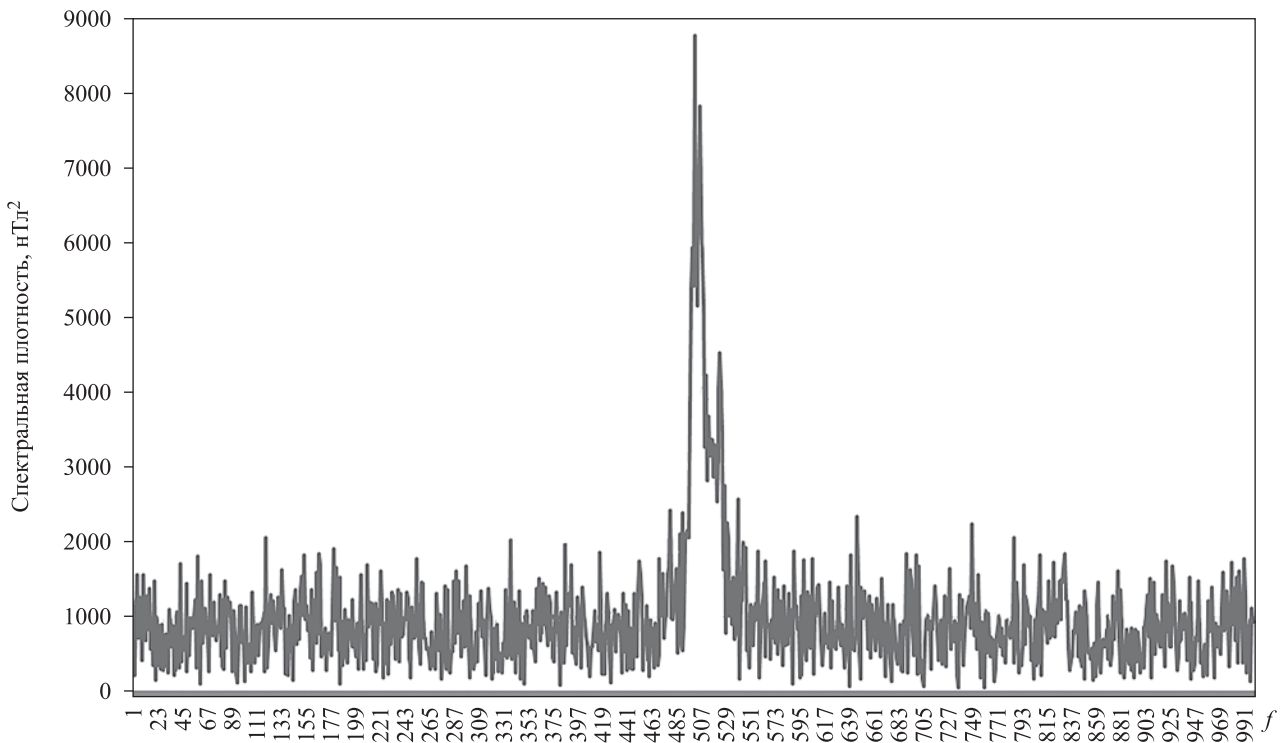


Рис. 3. Спектральная структура сигнала T_3 в полосе 1000 фильтров с центром в фильтре $f_3 = 106\ 122$
Пояснения см. в тексте

Таблица 1. Динамика оценок периодов, частот и амплитуд колебаний для максимумов спектральной плотности на часовых интервалах в окрестности магнитной бури 04.11.2021 г.

Местное время, ч	Период колебания T , с	Частота колебания $1/T$, Гц	Амплитуда отношения сигнал/шум S/N
12	–	–	–
13	–	–	–
14	0.234495	4.2644	≈ 7.3
15	0.234452	4.2625	≈ 5.2
16	0.234541	4.2636	≈ 4
17	0.234541	4.2636	≈ 4.9
18	0.234547	4.2635	≈ 4.9
19	0.234563	4.2632	≈ 5.9
20	0.234556	4.2633	≈ 2.8
21	–	–	–

Примечание. Полужирным выделен избранный для анализа временной участок с 12 до 18 ч местного времени.

Дополнительно в рамках настоящего исследования нами были выделены геомагнитные пульсации типа Pc1 в рядах наблюдений Магнитной обсерватории ИЗМИРАН за период с мая 2021 г. по февраль 2022 г. (табл. 2).

Согласно данным, приведенным в табл. 2, наибольшие значения спектральной плотности по оценкам величины отношения сигнал/шум S/N пришлось на геомагнитные возмущения 04.02.2022 г. Динамика геомагнитных возмущений 04.02.2022 г. показана на рис. 4.

Таблица 2. Спектральные характеристики геомагнитных колебаний с пульсациями типа *Pc1* за период с мая 2021 г. по февраль 2022 г.

Дата	Местное время	Период осцилляций, с	Частота, Гц	Амплитуда отношения сигнал/шум S/N
12.05.2021 г.	13–18 ч	–	–	–
26.05.2021 г.	19–21 ч	–	–	–
31.10.2021 г.	13–16 ч	0.2345	4.264	≈ 2.35
21.11.2021 г.	15–18 ч	0.3044	3.285	≈ 1.8
08.01.2022 г.	19–24 ч	0.2797	3.356	≈ 2.63
14.01.2022 г.	16–22 ч	–	–	–
15.01.2022 г.	18–22 ч	–	–	–
15.01.2022 г.	00–03 ч	0.2233	4.482	≈ 1.7
16.01.2022 г.	18–22 ч	0.2350	4.255	≈ 18.2
18.01.2022 г.	02–05 ч	–	–	–
19.01.2022 г.	00–06 ч	0.3319	3.012	≈ 1.56
20.01.2022 г.	16–22 ч	0.2694	3.712	≈ 2
21.01.2022 г.	18–22 ч	0.2348	4.259	≈ 17.4
29.01.2022 г.	14–17 ч	0.2348	4.258	≈ 2.32
02.02.2022 г.	02–05 ч	0.2531	3.951	≈ 1.68
02.02.2022 г.	18–20 ч	0.2476	4.038	≈ 1.4
03.02.2022 г.	05–11 ч	–	–	–
03.02.2022 г.	12–18 ч	0.2476	4.038	≈ 1.7
03.02.2022 г.	18–20 ч	0.2348	4.258	≈ 15.1
04.02.2022 г.	17–20 ч	0.2348	4.258	≈ 21.06
05.02.2022 г.	20–23 ч	0.4900	2.04	≈ 1.63
06.02.2022 г.	20–23 ч	0.2489	4.01	≈ 2.23
10.02.2022 г.	17–20 ч	0.2347	–	≈ 1.9

На рис. 5 демонстрируется график спектральной плотности для этого события. Это прямо-таки какой-то хор «жемчужин».

В некоторые дни, несмотря на наличие магнитных возмущений во время прохождения сильных магнитных бурь, пульсации типа *Pc1* отсутствовали. В качестве примера на рис. 6 показано изменение геомагнитного поля в окрестности события 18.01.2022 г. (см. также табл. 2).

Таким образом, подтверждается ранее высказанное предположение о том, что не всякая магнитная буря является биотропной и только скрупулезный анализ спектрального «портрета» магнитной бури может дать ответ о пагубности ее воздействия на организм человека. Так, при спокойном геомагнитном поле 20.01.2022 г. (см. рис. 6), согласно данным табл. 2, наблюдались осцилляции *Pc1*. Однако в течение этого дня наблюдалось прохождение сильной протонной вспышки (рис. 7).

В заключение следует отметить, что геомагнитные колебания с пульсациями типа *Pc1* группируются в основном в диапазоне частот $\sim 3\text{--}4$ Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальными данными, полученными в ходе многочисленных исследований, достоверно установлено, что число обострений сердечно-сосудистых заболеваний возрастает с ростом возмущенности геомагнитного поля в дни в окрестности прохождения магнитных бурь [Клейменова, Троицкая, 1992; Темурьянц и др., 1992; Птицына и др., 1998; Бреус и др., 2005; Рапопорт и др., 2006; Клейменова, 2007, 2013; Клейменова, Козырева, 2008; Самсонов и др., 2013]. Этими же исследователями установлено, что влияние геомагнитной активности на биосферу на энергетическом уровне не имеет места, так как вариации амплитуд магнитного поля даже во время очень сильных магнитных бурь не превышают 2–5 % величины магнитного поля Земли, что на много порядков ниже уровня естественных и антропогенных электромагнитных шумов.

В то же время в гелиобиологии мало данных о спектральных характеристиках геомагнитного поля, которые могут рассматриваться как фактор неблагоприятного воздействия окружающей среды на биобъекты, т.е. как фактор биотропности. Известно, что

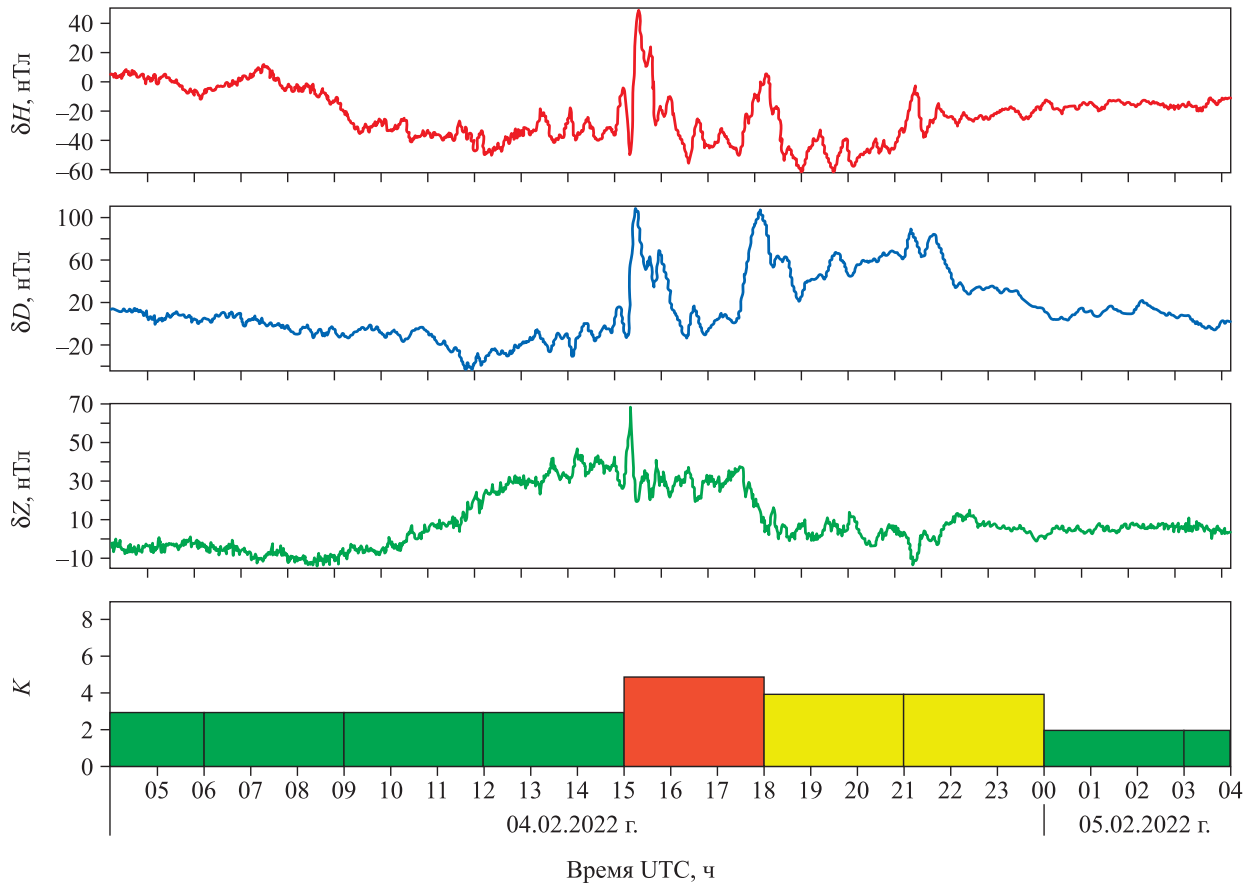


Рис. 4. Динамика вариаций геомагнитного поля 04.02.2022 г. по данным Магнитной обсерватории ИЗМИРАН

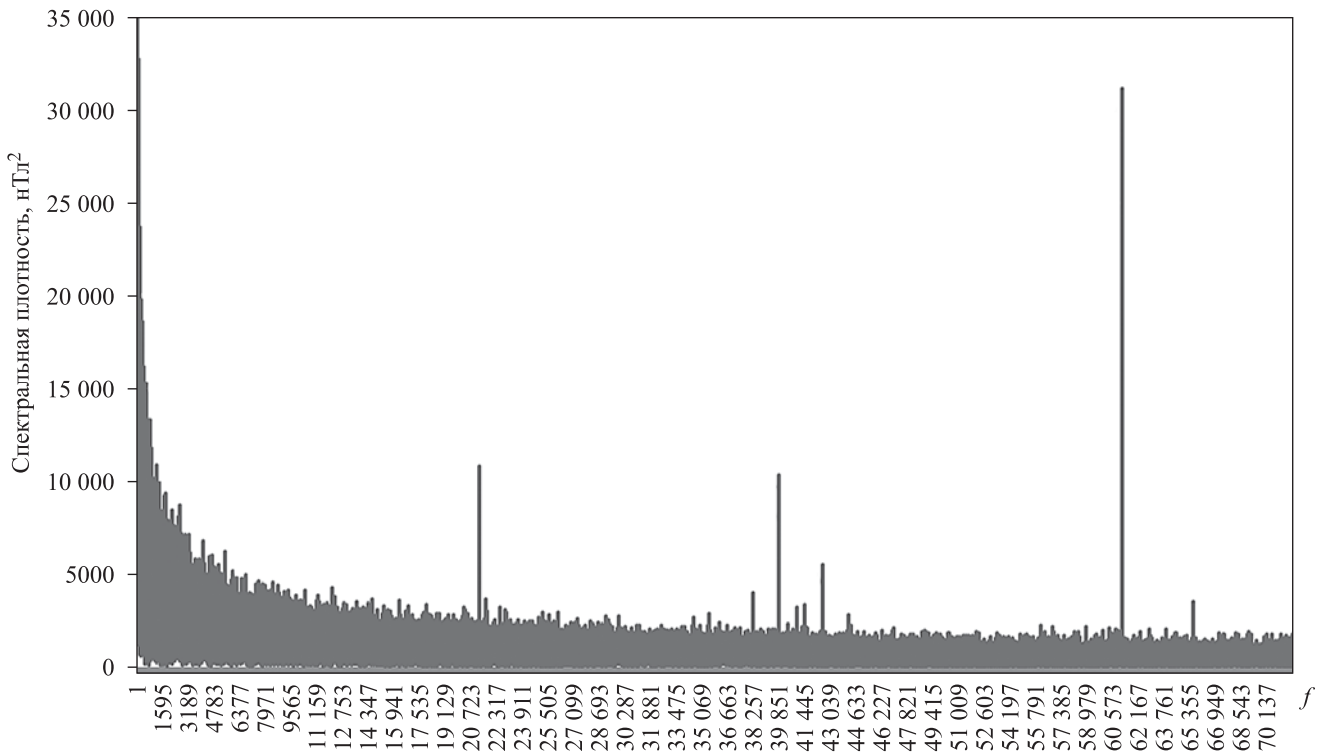


Рис. 5. График спектральной плотности геомагнитного возмущения 04.02.2022 г.

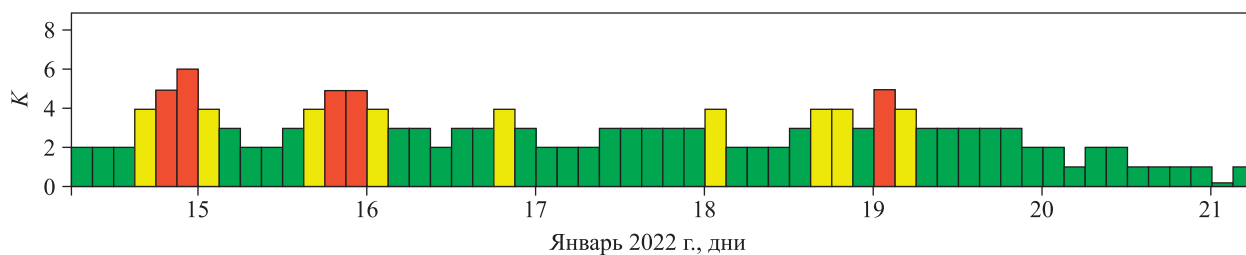


Рис. 6. Геомагнитная активность с 14.01.2022 г. по 21.01.2022 г. по данным Магнитной обсерватории ИЗМИРАН

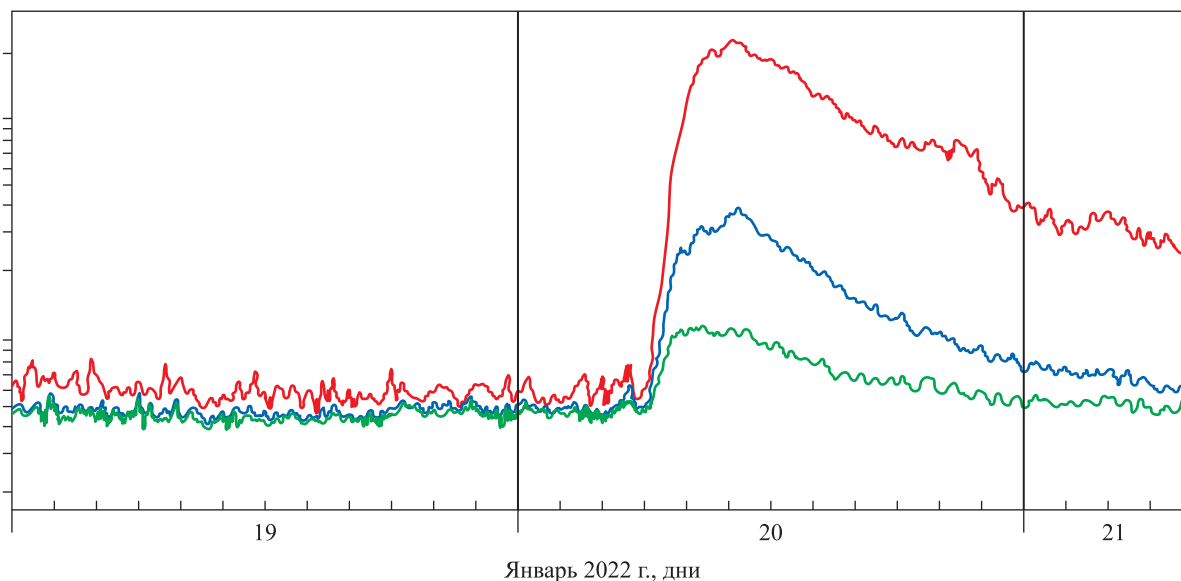


Рис. 7. Изменение магнитного поля Земли по трем компонентам за 19–21.01.2022 г.

геомагнитные пульсации $Pc1$ обладают биотропными свойствами в наибольшей степени. Поскольку амплитуды $Pc1$ составляют доли процента от величины магнитного поля Земли, их обнаружение представляет определенные трудности. Однако увеличение частоты дискретизации до 10 Гц по сравнению с условиями обработки сигнальной информации, представленными в работе [Кубов, Сливинский, 2014], приводит к тому, что подлежащий спектральной обработке объем сигнальной информации при одних и тех же промежутках по времени возрастает на порядок. Это позволяет надеяться, что за счет соответствующего увеличения когерентного накопления сигнальной информации можно будет выделять колебания геомагнитного поля, амплитуды которых на порядок меньше единиц нанотесла.

Выполненный нами ранее анализ особенностей спектральных характеристик геомагнитных колебаний в окрестности сильной магнитной бури 17.03.2015 г. [Сливинский, 2015] и окрестностях длительных сильных магнитных бурь 04.11.2021 г. и 04.02.2022 г. (см. настоящую работу) показал, что выделенные в обоих случаях геомагнитные пульсации являются колебаниями типа «жемчужин», т.е. геомагнитными пульсациями $Pc1$.

Результаты настоящей работы свидетельствуют, что модифицированный измерительный комплекс, описанный в работе [Сливинский, 2015], при соответствующей автоматизации может обеспечить экономичную и технически простую возможность регистрации в реальном времени локальных биотропных возмущений магнитного поля типа $Pc1$ как при выполнении научных исследований, так и с профилактическими целями оповещения широких слоев населения о возможных негативных внешних воздействиях, обусловленных возмущениями магнитного поля типа $Pc1$.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бреус Т.К., Комаров Ф.И., Рапопорт С.И. Медицинские эффекты магнитных бурь // Клиническая медицина. 2005. № 3. С. 4–12.
- Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации // Модели космоса / Под ред. М.И. Панасюк. М.: Изд-во МГУ, 2007. Т. 1. С. 511–627.

- Клейменова Н.Г. Пульсации в геомагнитном поле как важный биотропный фактор космической погоды // Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле: Тр. Междунар. конф., г. Москва, 4–8 июня 2012 г. / Под ред. А.И. Григорьева, Л.М. Зеленого. М.: ИКИ РАН, 2013. Т. 1. С. 163–183.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Магнитные бури и инфаркты: Всегда ли бури опасны // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7, № 3. С. 5–24.
- Клейменова Н.Г., Трошцкая В.А. Геомагнитные пульсации как один из экологических факторов среды // Биофизика. 1992. № 37, вып. 3. С. 429–439.
- Кубов В.И., Сливинский А.П. Выделение спектральных компонент Pc осцилляций геомагнитного поля с помощью датчиков Холла // Наука и технологические разработки. 2014. Т. 93, № 4. С. 22–31.
- Птицына Н.Г., Виллорези Дж., Дорман Л.И., Ючки Н., Тясто М.И. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы, потенциально опасные для здоровья // Успехи физ. наук. 1998. Т. 168, № 7. С. 767–791.
- Рапопорт С.И., Бреус Т.К., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Малиновская Н.К. Геомагнитные пульсации и инфаркты миокарда // Терапевтический архив. 2006. № 4. С. 56–60.
- Самсонов С.Н., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Петрова П.Г. Влияние космической погоды на заболевания сердечно-сосудистой системы человека в субавроральных широтах // Геофизические процессы и биосфера. 2013. Т. 12, № 4. С. 46–59.
- Сливинский А.П. Биотропные геомагнитные пульсации магнитной бури 17.03.2015 г. // Геофизические процессы и биосфера 2015. Т. 14, № 3. С. 61–70.
- Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наук. думка, 1992. 188 с.
- Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г., Клейменова Н.Г., Мальшева Л.М., Раита Т. Ширина частотного спектра геомагнитных пульсаций $Pc1$ в спокойных и возмущенных условиях // Геомагнетизм и аэрномия. 2015. Т. 55, № 2. С. 196–202. <https://doi.org/10.7868/S0016794015020042>

Сведения об авторе

СЛИВИНСКИЙ Александр Петрович – Украинский радиотехнический институт. Украина, 54031, г. Николаев, ул. Кирова, д. 238. E-mail: slivinsky40@gmail.com

BIOTROPIC GEOMAGNETIC PULSATIONS $Pc1$ OBSERVED WITH A MAGNETIC FIELD DETECTOR BASED ON HALL SENSORS

© 2022 A.P. Slivinsky

Ukrainian Institute of Radio Engineering, Nikolaev, Ukraine

e-mail: slivinsky40@gmail.com

Abstract. To register the spectral components of the geomagnetic field, we used data obtained using a magnetic field detector based on Hall sensors. An analysis of the features of the spectral characteristics of geomagnetic oscillations showed that those identified in the vicinity of the strong magnetic storm on November 4, 2021 are oscillations of the «pearl» type, i.e. biotrophic geomagnetic pulsations $Pc1$. «Pearls» were also observed in the vicinity of some weak magnetic storms in 2021–2022, including in the absence of magnetic disturbances. At the same time, «pearls» were not observed during the passage of some strong magnetic storms. That is, the statement about the unfavorability of only magnetically disturbed periods on the state of the human body is not entirely correct.

Keywords: $Pc1$ -pulsation, magnetic storms, biotrophic, «pearls».

About the author

SLIVINSKY Alexander Petrovich – Ukrainian Institute of Radio Engineering. Ukraine, 54031, Nikolaev, Kirova st., 238. E-mail: slivinsky40@gmail.com

Cite this article as: Slivinsky A.P. Biotrophic geomagnetic pulsations $Pc1$ observed with a magnetic field detector based on Hall sensors, *Geofizicheskie Protssesy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2022, vol. 21, no. 3, pp. 10–17 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2022.3-2>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, vol. 58. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>