

УДК 550.385

## БИОТРОПНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ $Pc1$ МАГНИТНОЙ БУРИ 17.03.2015 г.

© 2015 г. А.П. Сливинский

Украинский радиотехнический институт, г. Николаев, Украина

Для регистрации спектральных компонентов геомагнитного поля использовались данные, полученные с помощью детектора магнитного поля на основе датчиков Холла. Анализ особенностей спектральных характеристик геомагнитных колебаний показал, что выделенные в окрестности сильной магнитной бури 17.03.2015 г. пульсации являются колебаниями типа «жемчужин», т.е. биотропными геомагнитными пульсациями  $Pc1$ .

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

### Введение

В соответствии со сложившимися представлениями, изложенными в обширном обзоре [Троицкая, Гульельми, 1969], на поверхность Земли из космического пространства проникают электромагнитные волны ультранизких частот (УНЧ). Подобные волны, получившие название «геомагнитные пульсации», впервые наблюдались на обсерватории Кью близ г. Лондон около 150 лет назад. Однако интенсивное изучение пульсаций было начато лишь в период Международного геофизического года (1957–1958 гг.).

Геомагнитные пульсации – это электромагнитные волны в магнитосфере Земли. Спектр их частот – от миллигерц до ~ 1 кГц. Нижняя граница спектра совпадает с наименьшей частотой собственных колебаний магнитосферы, верхняя граница – с гирочастотой протонов в нижних слоях полярной ионосферы. Однако на частоте около 5 Гц существует резкая «отсечка» спектра колебаний, обусловленная тем, что идущие сверху волны сильно поглощаются в ионосфере и на поверхности Земли практически не наблюдаются. В этой связи установилось представление, что верхней границей диапазона геомагнитных пульсаций являются частоты в несколько герц.

С другой стороны, в научной литературе проблема неблагоприятного (биотропного) воздействия магнитных бурь на биосферу и здоровье человека обсуждается уже более 50 лет. 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. Данные о состоянии геомагнитного поля Земли получают с помощью дорогостоящего оборудования стационарных наземных и спутниковых магнитометров, в связи с чем мониторинг геомагнитного поля представляется затруднительным.

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 биотропных возмущений магнитного поля как в исследовательских целях университетских лабораторий, так и в профилактических целях для широких слоев населения. В рамках метода была показана возможность регистрации временной последовательности ежесекундных значений амплитуды геомагнитного поля Земли в режиме реального времени с последующей архивацией данных.

Путем спектрального анализа временных последовательностей ежесекундных значений амплитуды геомагнитного поля Земли в окрестностях времен прохождения магнитных бурь были выделены колебания  $Pc3$  ( $T = 10\text{--}45$  с),  $Pc4$  ( $T = 45\text{--}150$  с) и  $Pc5$  ( $T = 150\text{--}600$  с). Понятно, что в силу используемой частоты дискретизации ( $\sim 1$  Гц) сигнальной информации в рамках предложенного метода отсутствовала возможность выделения колебаний из области  $Pc1$  ( $T = 0.2\text{--}5.0$  с) и  $Pc2$  ( $T = 5\text{--}10$  с).

### Характеристики особенностей пульсаций $Pc1$

Анализ представительного объема результатов исследований, приведенных в работе [Клейменова, 2013], показал, что наиболее пагубное воздействие на биосферу и здоровье человека оказывают колебания в диапазоне  $Pc1$  с периодами  $T = 0.2\text{--}5.0$  с. Этот диапазон характеризуется колебаниями, которые В.А. Троицкая и А.В. Гульельми [1969] называли «жемчужины», поскольку их магнитограмма напоминает нитку жемчужного ожерелья. Пример аналоговой записи геомагнитных пульсаций приведен на рис. 1.

Термин «жемчужины» предложен для обозначения серий квазимонохроматических пульсаций в диапазоне  $Pc1$  с амплитудой порядка  $\sim 10^{-1}\text{--}10^{-2}$  нТл. Анализ динамических

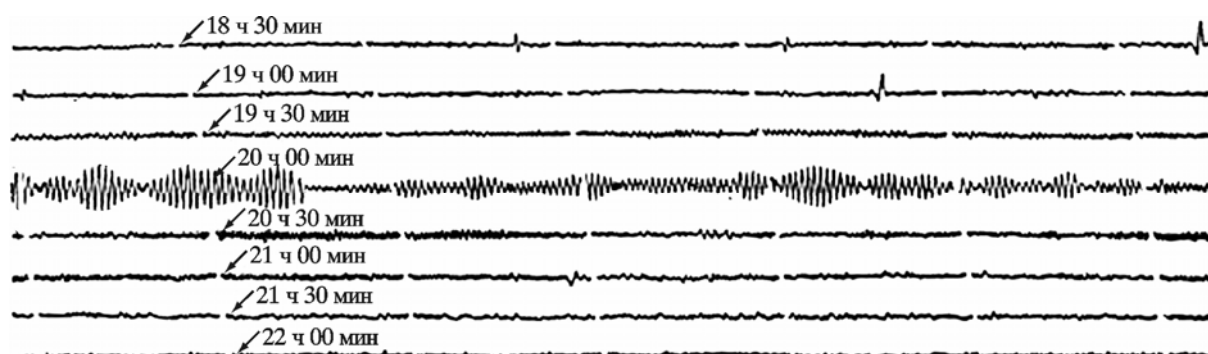


Рис. 1. Пример аналоговой записи геомагнитных пульсаций по данным [Клейменова, 2012] в обсерватории «Борок»

Каждая линия – 6-минутный интервал регистрации

спектров [Троицкая, Гульельми, 1969] показал, что в подавляющем большинстве случаев серии «жемчужин» состоят из дискретных тонов нарастающей частоты  $f$ , реже встречаются серии с уменьшающейся частотой. Типичный наклон структурных элементов –  $df/dt \sim 0.1$  Гц/мин. В конце серии становится заметным медленное изменение наклона с течением времени, т.е. дисперсионный эффект. Относительная ширина полосы изолированных серий сравнительно невелика –  $\Delta f/f \sim 0.2$ . «Жемчужины» с периодами  $T > 2-3$  с встречаются локально, в то время как «жемчужины» с периодами  $T < 2$  с наблюдались глобально на далеко отстоящих друг от друга обсерваториях.

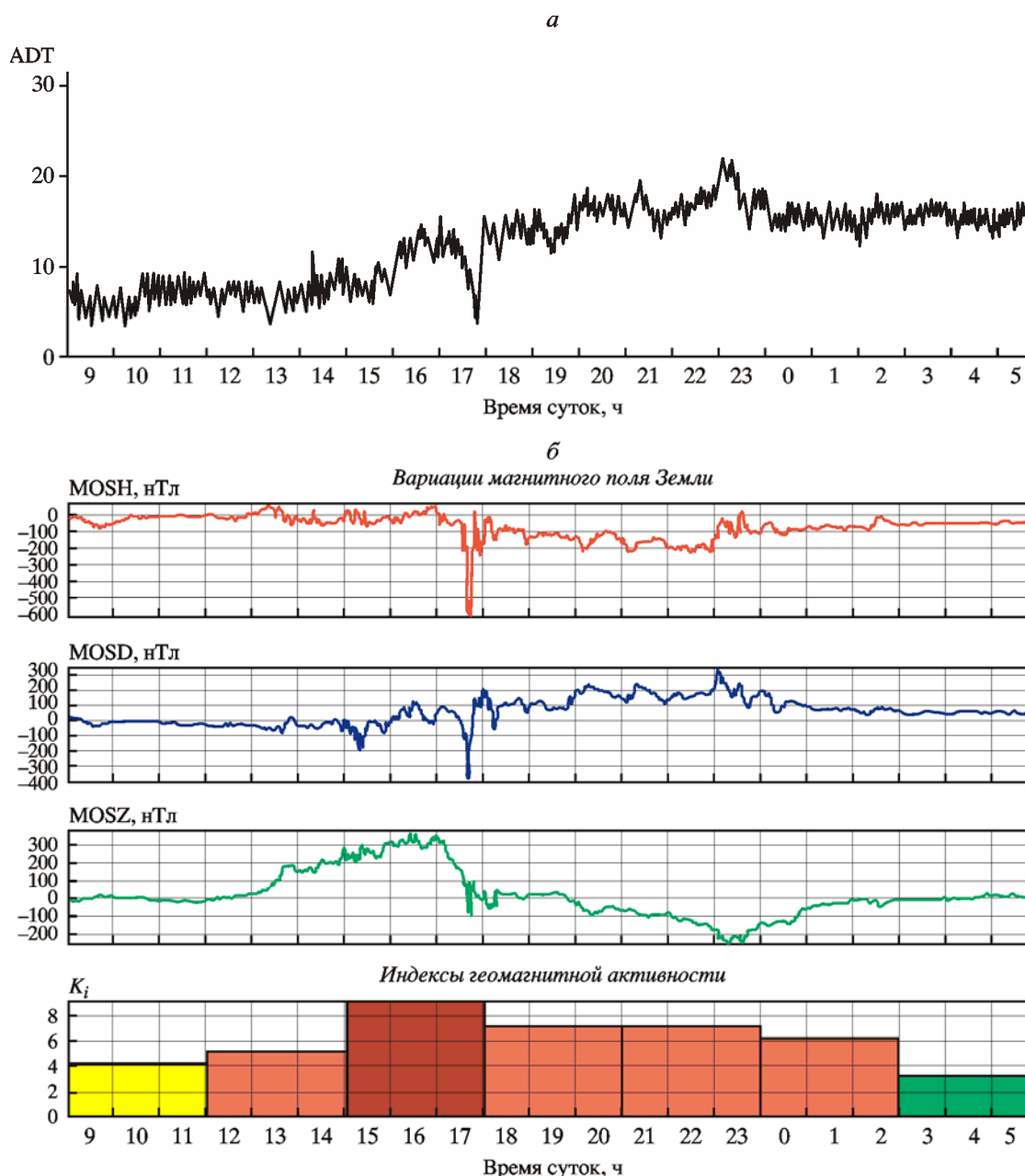
Возбуждение геомагнитных пульсаций типа  $Pc1$  связано с циклотронным взаимодействием волн и частиц в магнитосфере Земли [Троицкая, Гульельми, 1969]. Наиболее разработана в линейном приближении теория циклотронной неустойчивости протонов внешнего радиационного пояса магнитосферы. «Жемчужины» – сравнительно редкое явление, они возникают спорадически и длятся около 1 ч, но иногда серии «жемчужин» длятся часами. При прохождении магнитной бури увеличение вероятности появления «жемчужин» происходит примерно за 1 ч до внезапного начала ( $SC$ ) магнитной бури. Генерация  $Pc1$ -пульсаций характерна для восстановительной фазы магнитной бури, на 3–6-й день после ее внезапного начала [Плясова-Бакунина, Матвеева, 1968]. Иногда наблюдается ситуация, когда генерация геомагнитных пульсаций  $Pc1$  отмечается отдельными сериями в течение трех и более дней подряд. Часто «жемчужины» появляются через несколько минут после  $SC$  и длятся около 1 ч.

Удалось установить, что «жемчужины» распространяются вдоль земной поверхности по направлению от субавроральных широт к экватору со скоростью  $\sim 700-900$  км/с [Баранский и др., 1967]. Отличительная черта «жемчужин» – отсутствие явной связи момента их возникновения с другими проявлениями геомагнитной активности (за исключением  $SC$ ). Анализ данных вызовов бригад скорой медицинской помощи в г. Москве по поводу инфарктов показал, что наибольшее число вызовов, превышающее среднестатистическое значение, отмечалось в первый день появления  $Pc1$ -пульсаций, а затем число вызовов постепенно уменьшалось [Клейменова, 2013]. Это можно интерпретировать как адаптационную реакцию организма на внешний стресс (привыкание).

Циклические вариации пульсаций  $Pc1$  находятся в противофазе с 11-летней периодичностью солнечной активности [Матвеева, 1987]. В сезонных вариациях длительности среднеширотных  $Pc1$ -пульсаций максимум наблюдается в зимнее время. Особенно четко сезонный ход  $Pc1$ -пульсаций проявляется в годы минимума солнечной активности. В годы максимума солнечной активности число случаев появления  $Pc1$ -пульсаций уменьшается.

### Условия наблюдений

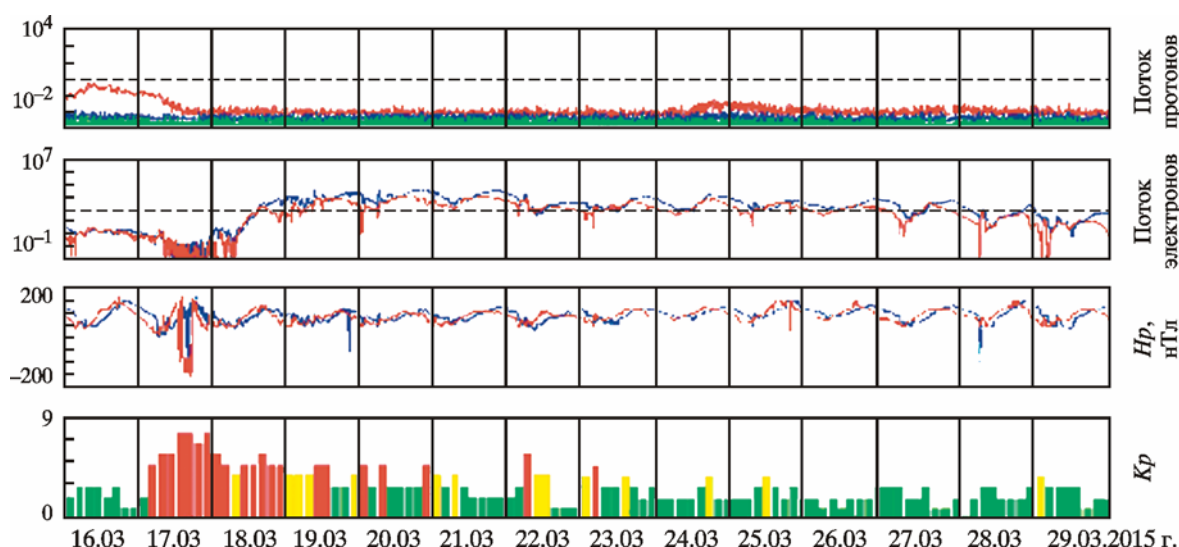
Для регистрации спектральных компонентов геомагнитного поля использовались данные, полученные с помощью детектора магнитного поля на основе датчиков Холла, подробно описанного в работе [Кубов, Сливинский, 2014]. С целью возможности выделения геомагнитных колебаний в области  $Pc1$  ( $T = 0.2-5.0$  с) проведена доработка программы обработки экспериментальных данных путем введения новой частоты дискретизации – 10 Гц. При этом непрерывный мониторинг состояния геомагнитного поля с помощью модифицированной программы обработки экспериментальных данных начался с 11 ч местного времени 17.03.2015 г. Ферритовые стержни, как и в предшествующих измерениях [Кубов, Сливинский, 2014], располагались в горизонтальной плоскости. Для иллюстрации на рис. 2 приведен график, построенный по данным магнитометров



**Рис. 2.** Магнитограммы, полученные 18.03.2015 г. в Украинском радиотехническом институте, г. Николаев (*a*) и в Институте земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва (*б*)

Украинского радиотехнического института (УРТИ) (г. Николаев) и Института земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) (г. Москва). (Данные обсерватории ИЗМИРАН размещены на сайте <http://forecast.izmiran.rssi.ru/magr.htm>.)

Во временном интервале, представленном на рис. 2, произошла сильная магнитная буря с показателем  $K_p = 9$ . Магнитная буря явилась следствием прохождения солнечной рентгеновской вспышки класса X, произошедшей 11.03.2015 г. Состояние магнитосферы на двухнедельном интервале, включающем магнитную бурю, охарактеризовано на рис. 3 данными, размещаемыми с пятиминутным тактом в режиме реального времени на сайте NASA <http://sec.noaa.gov/today.html>. Данные получены с помощью детекторов



**Рис. 3.** Состояние магнитосферы на двухнедельном интервале, включающем магнитную бурю, по данным NASA

Пояснения см. в тексте

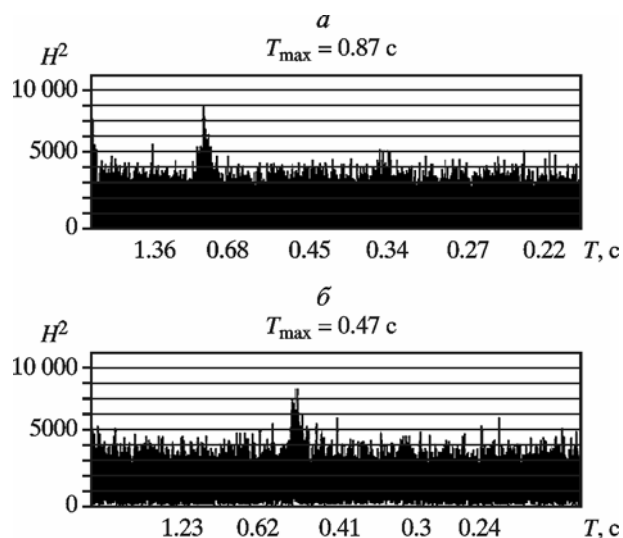
геостационарных спутников GOES-8, 10 и представлены в виде значений потока протонов, электронов, состояния околоземного магнитного поля (нТл) и планетарных  $Kp$ -индексов.

Согласно данным, представленным на рис. 3, возмущения магнитного поля по амплитуде были сравнимы с данными обсерватории ИЗМИРАН. Существенное увеличение потока протонов с 15.03.2015 г. и достижение им фонового значения 17.03.2015 г. не сказалось на возмущениях геомагнитного поля. Значения потока электронов таковы, что основной возмущающий фактор геомагнитного поля, по-видимому, обусловлен вкладом от возмущений потоков электронов. В соответствии с графиками рис. 2 следует, что наиболее выраженные выбросы возмущений в 17 и в 23 ч происходили синхронно по данным измерений на датчике УРТИ и на магнитометре ИЗМИРАН. При этом грубая оценка результатов соответствовала 1 ед. АЦП(ADT) = 1нТл.

### Результаты и их анализ

Использование частоты дискретизации 10 Гц привело к тому, что по сравнению с условиями обработки сигнальной информации, представленной в работе [Кубов, Сливинский, 2014], подлежащий обработке объем сигнальной информации при одних и тех же временных промежутках возрос на порядок. Такое обстоятельство позволяло надеяться на возможность выделения «жемчужин», амплитуды которых на порядок меньше единиц нанотесл за счет соответствующего увеличения когерентного накопления сигнальной информации.

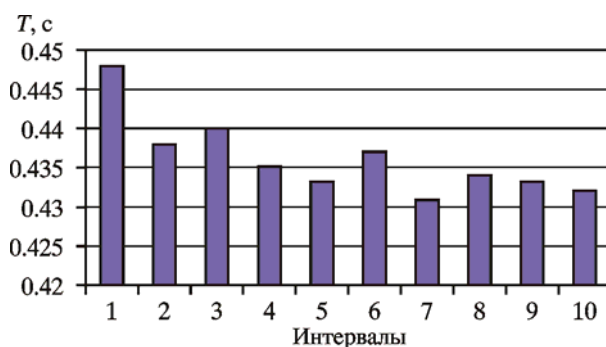
В предположении, что наиболее ощутимые амплитуды «жемчужин» в соответствии с данными, представленными на рис. 2, можно ожидать в окрестности наиболее выраженных выбросов возмущений, а именно в 17 и в 23 ч, 17.03.2015 г. для наблюдения были выбраны именно эти часовые интервалы. На рис. 4 приведены графики распределения спектральной плотности на указанных временных интервалах. Оказалось, что действительно по крайней мере в это время уверенно выделяются геомагнитные пульсации. В соответствии с данными рис. 4 положения линий максимумов спектральных



**Рис. 4.** Распределение спектральных плотностей в окрестностях времен 17 ч (а) и 23 ч (б) 17.03.2015 г. Пояснения см. в тексте

плотностей геомагнитных пульсаций приходится на периоды колебаний со значениями 0.87 и 0.47 с. Таким образом, эти пульсации попадают в диапазон *Pc1*, а подобные спектральные линии могут быть отнесены к «жемчужинам». Кроме того, например, по уровню 0.5 для колебания, выделенного на рис. 4, а,  $\Delta f_a/f_a \approx 0.18$ . Подобная величина уширения спектральной линии может быть обусловлена дрейфом частоты на избранной временной последовательности часовой длительности.

С целью иллюстрации правомерности такого утверждения исходный часовой интервал был разбит на 10 6-минутных временных последовательностей, каждая из которых подвергалась спектральному анализу. На рис. 5 представлен общий результат обработки данных. Из приведенных оценок следует, что на рассматриваемом отрезке времени отмечается наличие дрейфа периодов  $T$  геомагнитных пульсаций, причем просматриваются две независимые ветви колебаний. Подобные свойства дрейфа периодов осцилляций могут выступать в качестве достаточности признака принадлежности выделенных колебаний к «жемчужинам». Для более полного исследования влияния сильной магнитной бури 17.03.2015 г. на генерацию геомагнитных пульсаций *Pc1* с 9 ч UT 17.03.2015 г. по 02.04.2015 г. на протяжении каждого часа определялось и заносилось в таблицу положение максимума спектральной плотности (пример подобной процедуры представлен на рис. 2 для конкретного часа). Пример построения такой таблицы приводится далее.



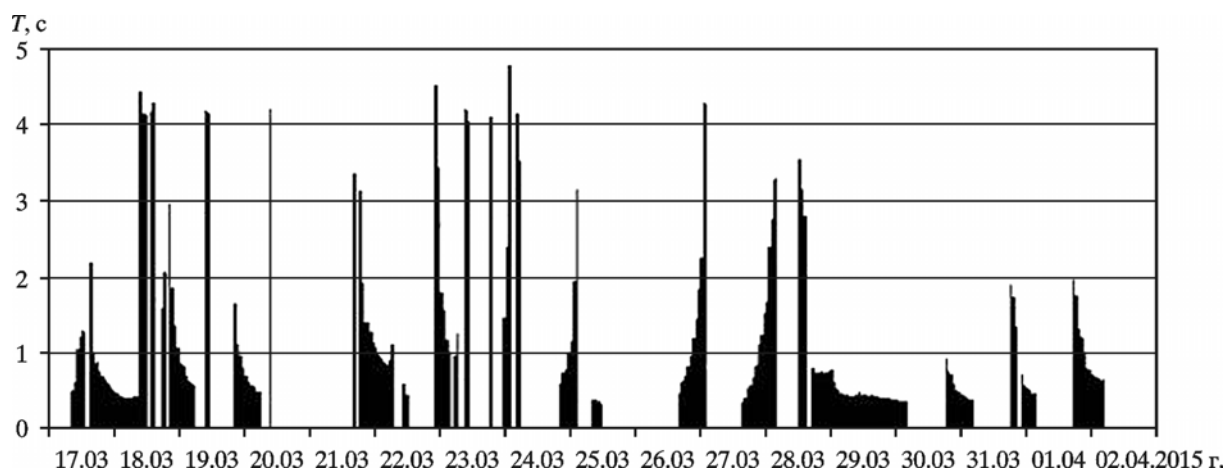
**Рис. 5.** Оценка периодов геомагнитных пульсаций внутри часа на 10 последовательных 6-минутных интервалах

Пояснения см. в тексте

**Почасовое изменение максимума спектральной плотности  
в период прохождения сильной магнитной бури 17.03.2015 г.**

Время UT, ч	Период ( $T$ ) по дням				
	17.03	18.03	19.03	20.03	21.03
0	0	0.86	0.688		1.07
1		0.827	0.607		0.98
2		0.688	0.573		0.91
3		0.62	0.55		0.87
4		0.59	0.491		0.84
5		0.558	0.491		0.9
6					1.106
7					
8	0.496				
9	0.6	4.17	4.2		
10	1.05	4.14			0.586
11	1.21				0.453
12	1.28				0.453
13					
14					
15	2.18				
16	0.97			3.35	
17	0.87				
18	0.76			3.13	
19	0.7			1.9	
20	0.65	1.645		1.4	
21	0.6	1.113		1.4	
22	0.55	0.97		1.27	4.512

С учетом данных таблицы на рис. 6 для удобства анализа построен сводный график почасовой обработки сигнальной информации с 17.03.2015 г. по 02.04.2015 г. На оси ординат отложены оценки периодов  $Pc1$  в случае их уверенного выделения. Отчетливо прослеживается дрейф периодов колебаний, как правило, в сторону уменьшения периодов или увеличения частот колебаний. Такое обстоятельство также может служить подтверждением признака достаточности для утверждения факта наблюдения геомагнитных пульсаций  $Pc1$ .



**Рис. 6.** Сводный график почасовой обработки сигнальной информации

Из данных, приведенных на рис. 6, следует, что наблюдение  $Pc1$  происходило практически ежедневно, главным образом в ночные часы. При этом через неделю после прохождения магнитной бури 17.03.2015 г. – с 24.03 по 28.03.2015 г. – наблюдался дрейф периодов колебаний в сторону их увеличения или уменьшения частот колебаний с последующим возвращением к обычному ходу дрейфа. После 03.04.2015 г. заметные максимумы спектральной плотности в этом диапазоне не выделялись.

На рис. 3 обращает на себя внимание факт отсутствия существенных геомагнитных возмущений после прохождения магнитной бури 17.03.2015 г. В то же время из данных рис. 6 следует длительное по времени наблюдение геомагнитных пульсаций типа  $Pc1$ . Для объяснения этого феномена можно сделать предположение о развитии после магнитной бури длительных мощных субавроральных возмущений, которые как раз и могли быть «поставщиками» геомагнитных пульсаций  $Pc1$  в среднеширотные области.

Для дальнейшего исследования такого эффекта были привлечены данные высокоширотной магнитной обсерватории Тромсё по трем компонентам магнитного поля, взятые с сайта <http://flux.phys.uit.no/cgi-bin/geodata.cgi?site=tro2a>. На рис. 7 представлена магнитограмма за март 2015 г., записанная на этой обсерватории, на которой видно, что после прохождения сильной магнитной бури 17.03.2015 г. практически до конца марта следовали существенные возмущения геомагнитного поля (ср. с данными NASA на рис. 3). Это обстоятельство как раз и могло способствовать длительному наблюдению колебаний  $Pc1$  на широте расположения датчика магнитного поля УРТИ.

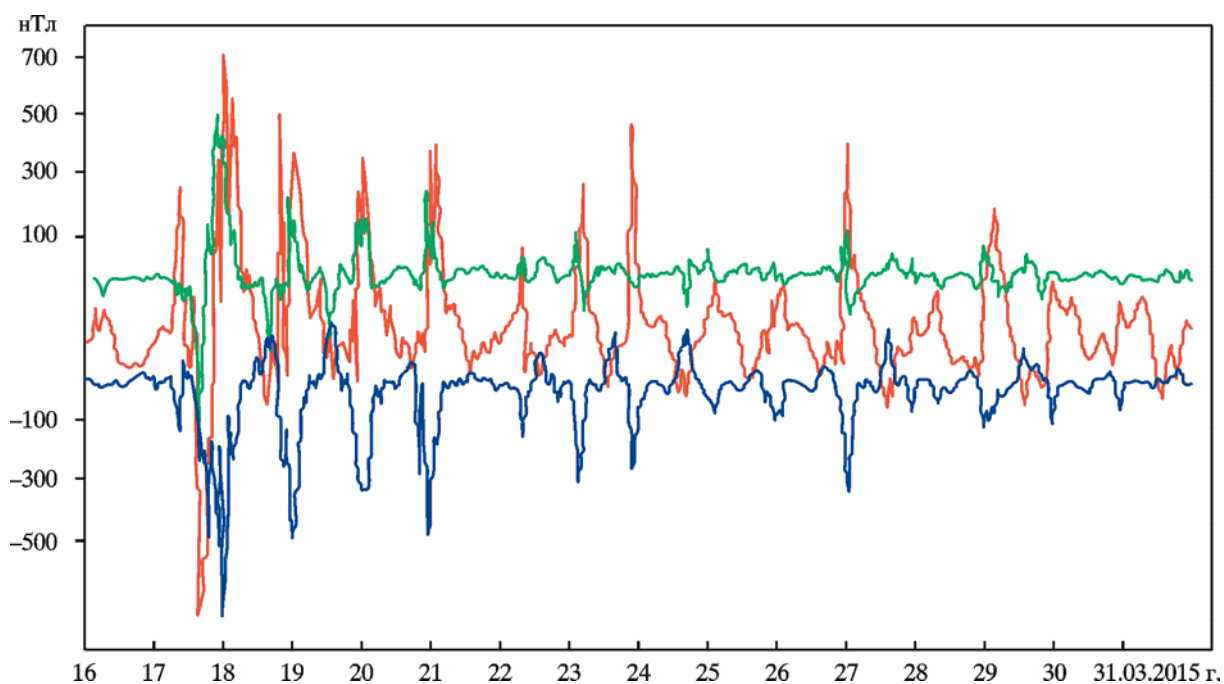


Рис. 7. Магнитограмма, полученная в высокоширотной обсерватории Тромсё по трем компонентам магнитного поля за 16–31.03.2015 г.

### Обсуждение результатов

Экспериментальными данными, полученными в ходе многочисленных исследований, достоверно установлено, что число обострений сердечно-сосудистых заболеваний возрастает с ростом возмущенности геомагнитного поля в окрестности прохождения магнитных бурь [Клейменова, Троицкая, 1992; Темуриянц и др., 1992; Птицына и др., 1998; Бреус, Рапопорт, 2003; Бреус и др., 2005; Рапопорт и др., 2006; Клейменова и др.,



2007; Клейменова, Козырева, 2008; Клейменова, 2013; Самсонов и др., 2013]. Этими же исследованиями 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 % от 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 вредоносного воздействия окружающей среды на биообъекты, т.е. как фактор биотропности геомагнитного поля. Известно, что геомагнитные пульсации  $Pc1$  обладают биотропными свойствами в наибольшей степени. Однако поскольку амплитуды  $Pc1$  составляют доли процента от величины магнитного поля Земли, их обнаружение представляет определенные трудности.

Увеличение частоты дискретизации до 10 Гц, по сравнению с условиями обработки сигнальной информации, представленной в работе [Кубов, Сливинский, 2014], приводит к тому, что подлежащий обработке объем сигнальной информации при одних и тех же промежутках по времени возрастает на порядок, что позволяет за счет соответствующего увеличения когерентного накопления сигнальной информации выделять колебания геомагнитного поля, амплитуды которых на порядок меньше единиц нанотесла. Анализ особенностей спектральных характеристик геомагнитных колебаний показал, что выделенные в окрестности сильной магнитной бури 17.03.2015 г. пульсации являются колебаниями типа «жемчужин», т.е. геомагнитными пульсациями  $Pc1$ .

### Заключение

Результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что модифицированный измерительный комплекс, описанный в работе [Кубов, Сливинский, 2014], при соответствующей автоматизации обеспечивает экономичную и технически простую возможность регистрации в реальном времени локальных биотропных возмущений магнитного поля  $Pc1$  как при выполнении научных исследований, так и с профилактическими целями оповещения широких слоев населения о возможных негативных внешних воздействиях.

### Благодарности

Считаю приятным долгом выразить благодарность доценту Черноморского государственного университета им. Петра Могилы В.И. Кубову за модификацию программы обработки сигнальной информации.

### Литература

- Баранский Л.Н., Казак Б.Н., Геллер Л.А. О скорости распространения короткопериодных колебаний электромагнитного поля Земли типа  $Pi2$  // Докл. АН СССР. 1967. Т. 177, № 1. С. 85–87.
- Бреус Т.К., Рапопорт С.И. Магнитные бури: медико-биологические и геофизические аспекты. М.: Сов. спорт, 2003. 192 с.
- 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., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации как один из экологических факторов среды // Биофизика. 1992. № 37, вып. 3. С. 429–439.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Бреус Т.К., Рапопорт С.И. Сезонные вариации инфарктов миокарда и возможное биотропное влияние короткопериодных пульсаций геомагнитного поля на сердечно-сосудистую систему // Биофизика. 2007. Т. 52, вып. 6. С. 1112–1119.
- Кубов В.И., Сливинский А.П. Выделение спектральных компонентов  $Pc$  осцилляций геомагнитного поля с помощью датчиков Холла // Наука и технологические разработки. 2014. Т. 93, № 4. С. 22–31.
- Матвеева Э.Т. Циклическая вариация активности геомагнитных пульсаций  $Pc1$  // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27, № 3. С. 392–395.
- Матвеева Э.Т., Троицкая В.А. Общие закономерности колебательного режима типа «жемчужин» // Геомагнетизм и аэрономия. 1965. Т. 5, № 6. С. 1078–1084.
- Плясова-Бакунина Т.А., Матвеева Э.Т. Связь колебаний типа  $Pc1$  с магнитными бурями // Геомагнетизм и аэрономия. 1968. Т. 8, № 1. С. 189–191.
- 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.
- Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наук. думка, 1992. 188 с.
- Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физ. наук. 1969. Т. 97. С. 453–494.

#### Сведения об авторе

**СЛИВИНСКИЙ Александр Петрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Украинский радиотехнический институт. Украина, 54031, г. Николаев, ул. Кирова, д. 238. E-mail: slivinsky\_ap@mail.ru

## BIOTROPIC GEOMAGNETIC PULSATIONS $Pc1$ RESULTING FROM MAGNETIC STORM 17.03.2015

A.P. Slivinsky

Ukrainian Radio Engineering Institute, Nikolaev, Ukraine

**Abstract.** We used the data obtained by the detector of magnetic field based on Hall sensors for registration of the spectral components of the geomagnetic field. An analysis of the features of the spectral characteristics of geomagnetic fluctuations showed that isolated in the vicinity of strong magnetic storm 17.03.2015 pulsations are variations of the «pearls» that is, biotropic  $Pc1$  geomagnetic pulsations.

**Keywords:**  $Pc$  pulsation, magnetic storms, biotropic, «pearls».