

УДК 550.344

15-МИНУТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ГЕОЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН $Pc1$

© 2010 г. А.В. Гульельми¹, О.Д. Зотов²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН,
пос. Борок (Ярославская обл.), Россия

Статья посвящена проблеме человеческого воздействия на электромагнитные колебания магнитосферы Земли в частотном диапазоне 0.2–5 Гц (волны $Pc1$), которые спонтанно возбуждаются в результате ионно-циклотронной неустойчивости космической плазмы. Основное внимание сосредоточено на анализе долговременных наземных наблюдений при изучении специфической 15-минутной модуляции активности волн $Pc1$, которая, как предполагается, имеет антропогенное происхождение. Для статистического исследования использованы данные, накопленные при непрерывной записи волн $Pc1$ на Геофизической обсерватории “Борок” (58.03°с.ш., 38.97°в.д., $L = 2.9$) в период с 1958 по 1992 гг. База данных содержит 15592 серий колебаний $Pc1$. Методом суперпозиции эпох убедительно показано наличие 15-минутной модуляции активности волн $Pc1$, коэффициент которой (относительная глубина 15-минутного цикла) составляет примерно 7%. Показана статистическая достоверность эффекта на достаточно высоком уровне значимости. Основной вывод работы состоит в том, что антропогенная 15-минутная модуляция волновой активности $Pc1$ представляет собой реальное геофизическое явление; названы возможные источники антропогенных сигналов, воздействие которых на околоземную плазму приводит к слабой 15-минутной модуляции волн $Pc1$.

Ключевые слова: электромагнитные волны, магнитосфера, техносфера.

Введение

Ультранизкочастотные электромагнитные волны $Pc1$ наблюдаются в диапазоне 0.2–5 Гц повсеместно на земной поверхности в виде серий колебаний продолжительностью 0.5–1 ч. Общий взгляд на происхождение волн $Pc1$ состоит в том, что в магнитосфере спорадически возникают ионно-циклотронные колебания, которые усиливаются во внешнем радиационном поясе, затем в виде волн Альвена распространяются к Земле вдоль геомагнитных силовых линий, частично отражаются от ионосферы в магнитосопряженных областях и возвращаются в радиационный пояс, переводя его в режим самовозбуждения. Глобальность распространения волн $Pc1$ принято объяснять тем, что волны Альвена, падающие на ионосферу сверху, частично трансформируются в магнитозвуковые волны, которые распространяются вдоль земной поверхности на большие расстояния в ионосферном магнитогидродинамическом волноводе. Это представление, сложившееся к середине 60-х годов прошлого века, на протяжении десятилетий служит основой для успешной интерпретации многообразных связей волн $Pc1$ с проявлениями солнечной и геомагнитной активности (см. например обзоры и монографии [Troitskaya, Guglielmi, 1967; Гульельми, Троицкая, 1973; Гульельми, 1979, 2007; Нишида, 1980; Guglielmi, Pokhotelov, 1996; Kangas, Guglielmi, Pokhotelov, 1998]).

Итак, магнитосферное происхождение волн $Pc1$ не вызывает никакого сомнения. Существуют многочисленные свидетельства того, что режим их возбуждения контролируется параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля перед фронтом магнитосферы. Вместе с тем, в литературе неоднократно поднимался вопрос о

слабой, но вполне обнаружимой связи возбуждения и/или распространения волн $Pc1$ с динамическими процессами в литосфере и техносфере. В ряде статей приводятся данные о связи волн $Pc1$ с сейсмической активностью [Bortnik et al., 2008; Guglielmi, Zotov, 2008; Довбня, Зотов, Щенетнов, 2008; Потапов, Добня, Цзгмед, 2008; Зотов, Гульельми, 2009], а также с режимом функционирования технологических систем, в частности, с режимом работы электро- и радиотехнических устройств [Гульельми и др., 1978; Зотов, Калишер, 1979; Fraser-Smith, 1979, 1981; Гульельми, Зотов, 1986; Guglielmi, Zotov, 2007; Довбня, Зотов, Щенетнов, 2008; Зотов, Гульельми, 2009].

Данная работа посвящена так называемому “эффекту часовых меток”, впервые описанному в работах [Гульельми и др., 1978; Зотов, Калишер, 1979]. Следует отметить, что в настоящее время не существует общепринятого названия для этого эффекта. Ранее авторами предлагались и другие варианты – “*Big Ben effect*”, “*clock pulse effect*”, “*chime effect*”, “эффект синхронизации $Pc1$ курантами” и т.п., – но ни один из них пока не стал употребительным. В дальнейшем изложении будет использоваться описательное обозначение исследуемого эффекта, приведенное в названии статьи.

Если эффект слабой 15-минутной модуляции волн $Pc1$, о котором идет речь в данной статье, действительно существует, то это безусловно свидетельствует о перманентном импульсном воздействии техносферы на магнитосферу. Общая идея состоит в том, что начало каждого часа и другие выделенные моменты времени тем или иным образом синхронно модулируют работу мировой сети радиопередатчиков и других мощных электрических систем, которые предположительно воздействуют на ионосферу и магнитосферу. Результатом воздействия становится возбуждение и/или подавление колебаний $Pc1$. В частности, мощные радары некогерентного рассеяния, входящие в мировую сеть, производят синхронно согласованные наблюдения по международной программе. Автоматические ионосферные станции (АИС) мировой сети производят радиозондирование ионосферы одновременно через каждые 15 минут также по согласованной международной программе.

В работах [Гульельми и др., 1978; Зотов, Калишер, 1979] выполнен анализ волн $Pc1$ в соответствии с указанным выше предположением. Один из результатов анализа приведен на рис. 1, где представлено распределение событий по величине задержки относительно момента посылки радиоимпульса АИС (событием считается начало серии колебаний $Pc1$). По горизонтальной оси отложено время, прошедшее с момента пуска АИС, по вертикальной – число событий N . Значения N в углах полигона соответствуют числу событий в данную минуту 15-минутного интервала.

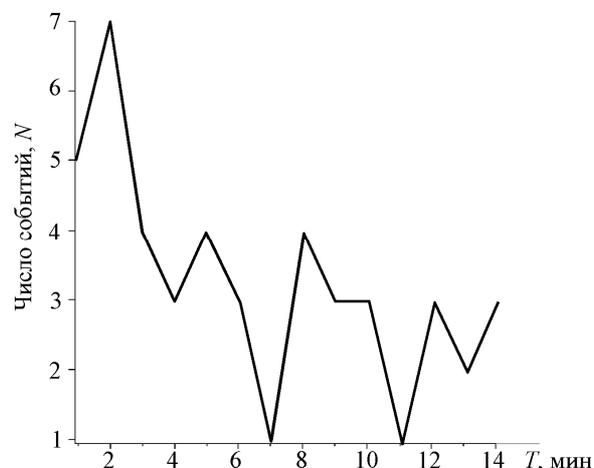


Рис. 1. Распределение событий по времени начала серии колебаний $Pc1$ в пределах 15-минутного интервала. Наблюдения на обсерватории “Тикси” в период с 19 марта по 04 апреля 1976 г., в течение которого было зарегистрировано 46 серий колебаний $Pc1$ (см. текст)

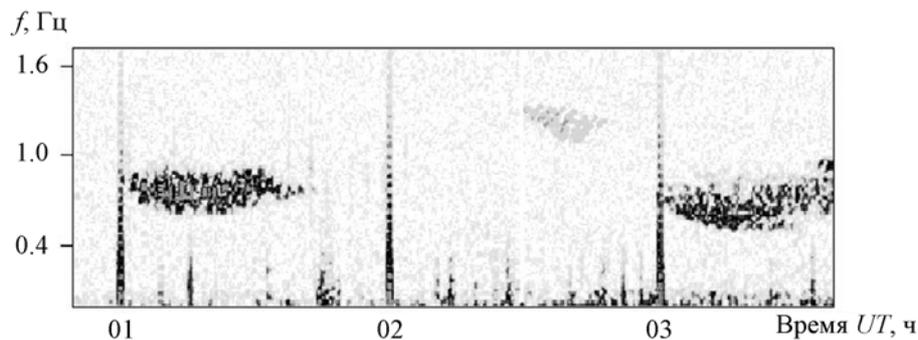


Рис. 2. Динамические спектры трех серий колебаний $Pc1$, зарегистрированных на обсерватории “Борок” 12.05.1975 г. Вертикальные линии – часовые метки. Начало второй серии – 2 ч 30 мин UT

Если вероятность появления волн $Pc1$ никак не связана с работой технологических систем (в рассматриваемом случае с работой АИС), то распределение событий по времени должно быть равномерным. Но на рис. 1 отчетливо видна неравномерность распределения: в первой половине интервала (1–7 мин) число событий заметно больше, чем во второй (8–14 мин).

Очевидно, нельзя исключать, что изображенное на рис. 1 – случайное отклонение от нормы, т.е. от равномерного распределения. Обратимся, однако, к рис. 2, на котором показаны динамические спектры колебаний, зарегистрированных на обсерватории “Борок” 12.05.1975 г. Отчетливо видны две серии колебаний $Pc1$, которые возникают сразу же вслед за часовыми метками в 01 ч UT и 03 ч UT на частотах 0.8 Гц (первая серия) и 0.7 Гц (вторая серия). На этом же рисунке в 02 ч 30 мин UT можно проследить начало более слабой серии $Pc1$ на частоте 1.3 Гц.

Глядя на этот и подобные рисунки, часть которых приведена в монографии [Гульельми, 1979] и в статье [Довбня, Зобов, Щепетнов, 2008]), трудно освободиться от впечатления, что “бой часов” самым парадоксальным образом стимулирует возбуждение волн $Pc1$. Было замечено, что иногда появление часовой метки совпадает с внезапным прекращением колебаний. Связь начала и окончания колебаний $Pc1$ с часовыми метками наблюдается нечасто, но она настолько выразительна, что трудно поверить в простые совпадения. Рассматриваемый эффект наблюдался также в пятнадцатую и сорок пятую минуту часа. В дополнение нелишне заметить, что эффект был прослежен при просмотре большого количества динамических спектров, полученных не только на обсерваториях “Тикси” и “Борок”, но и на обсерваториях “Восток”, “Колледж”, “Соданкюля”.

Информация, содержащаяся в работах [Гульельми и др., 1978; Зотов, Калишер, 1979], посвященных обсуждаемому эффекту, неоднократно публиковалась авторами. Она представлена в монографиях [Гульельми, 1979; Guglielmi, Pokhotelov, 1996], упоминалась в докладах на международных конференциях (см. например [Guglielmi, Zotov, 2006, 2008]) и, казалось бы, должна быть известна широкому кругу специалистов. Тем не менее, эффект, который важен для геофизики и, безусловно, интересен с чисто физической точки зрения, до сих пор не привлек к себе достаточного внимания научной общественности. Можно назвать две публикации, одна из которых – [Fraser-Smith, 1981] – содержит весьма одобрительный отзыв о работах авторов, а вторая – [Menk, 1985] – резкую критику, ответ на которую см. в работе [Гульельми, Зотов, 1986]; этим практически исчерпываются ссылки на работы [Гульельми и др., 1978; Зотов, Калишер, 1979]. Возможно, это объясняется тем, что авторы названных оригинальных публикаций ограничились анализом сравнительно небольшого числа ярких событий и были недостаточно

убедительны в своей аргументации, в то время как столь необычный эффект может вызвать определенное недоверие.

В данной работе представлены результаты количественной оценки статистической достоверности эффекта, выполненной авторами с использованием достаточно большой выборки.

Статистическое исследование

Проведем статистическую проверку гипотезы о равномерном распределении событий внутри 15-минутного интервала, обратившись к рис. 1. Проверяемую гипотезу назовем нулевой и обозначим H_0 . Гипотеза H_0 соответствует представлению об отсутствии влияния техносферы на магнитосферу. Более точно содержание нулевой гипотезы следует записать в виде $H_0:p = 0.5$, где p – вероятность того, что событие произойдет в первой половине 15-минутного интервала. Альтернативная гипотеза H_1 состоит в том, что $H_1:p > 0.5$, т.е. распределение неравномерно, причем частота событий в первой половине интервала выше, чем во второй. Эта гипотеза соответствует представлению, изложенному в работах [Гульельми и др., 1978; Зотов, Калишер, 1979].

Для нашей цели естественно использовать правостороннюю критическую область, определяемую неравенством $m/n > p_1$, где n – общее число всех накопленных событий, а m – число событий, наблюдавшихся в первой половине 15-минутных интервалов. Граница критической области p_1 зависит от уровня значимости α . Величина α имеет смысл вероятности совершения ошибки первого рода, т.е. отклонения верной гипотезы H_0 на основе неравенства $m/n > p_1$.

По величине α находим аргумент z_α функции Лапласа

$$\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp(-t^2/2) dt, \quad (1)$$

используя для этой цели уравнение $\Phi(z_\alpha) = 1 - 2\alpha$.

Наконец, по формуле

$$p_1 = p + z_\alpha \left[\frac{p(1-p)}{n} \right]^{1/2} \quad (2)$$

находим границу критической области. Величина $\alpha = 0.05$ обычно считается вполне приемлемым уровнем надежности. Если же выбрать $\alpha = 0.01$, то при $m/n > p_1$ нулевую гипотезу H_0 следует отклонить с практически полной уверенностью (см. например [Четыркин, Калихман, 1982]).

В случае распределения, изображенного на рис. 1, мы имеем $n = 46$, $m = 27$ и $m/n = 0.587$. Поскольку представленная выборка относительно невелика, граница критической области p_1 оказывается настолько высокой, что нулевую гипотезу H_0 нельзя отклонить на уровне $\alpha = 0.05$. Нулевая гипотеза H_0 отклоняется лишь на уровне $\alpha = 0.125$ (в таком случае $z_\alpha = 1.15$ и $m/n > p_1 = 0.584$), но этого недостаточно, чтобы с практически полной уверенностью принять альтернативную гипотезу H_1 .

Отсюда следует, что как бы ни были психологически убедительны соображения, основанные на графическом представлении малочисленных выборок (см. рис. 1) или на визуальном анализе ярких событий (см. рис. 2), их недостаточно для доказательства статистической достоверности существования импульсной 15-минутной модуляции колебаний Pc1. Для убедительного доказательства необходимо радикально увеличить объем выборки n (см. формулу (2)).

Сделаем это, используя длинный ряд наблюдения волн $Pc1$ на Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН (58.03°с.ш., 38.97°в.д.). По результатам непрерывных наблюдений с 1958 по 1992 г. Э.Т. Матвеева составила каталог волн $Pc1$ и опубликовала его в Интернете (http://www.wdcb.ru/stp/data/catal_pc; см. также [Матвеева, 1996]). Начало серии колебаний $Pc1$ указано в каталоге с точностью до минуты. Как и выше, далее будем называть событием начало серии колебаний. Всего за 35 лет зарегистрировано около 17500 событий. Согласно данным каталога, примерно 2000 событий происходило в нулевую, пятнадцатую, тридцатую и сорок пятую минуту некоторого часа. Такие события были исключены из анализа, чтобы не допустить ошибок округления. В результате была отобрана совокупность из 15592 событий. Для наглядности на рис. 3 представлена гистограмма распределения событий в четырех 15-минутных интервалах в пределах часа. Серым цветом отмечены первые половины 15-минутных интервалов. Видно, что в первой половине каждого из четырех интервалов событий больше, чем во второй.

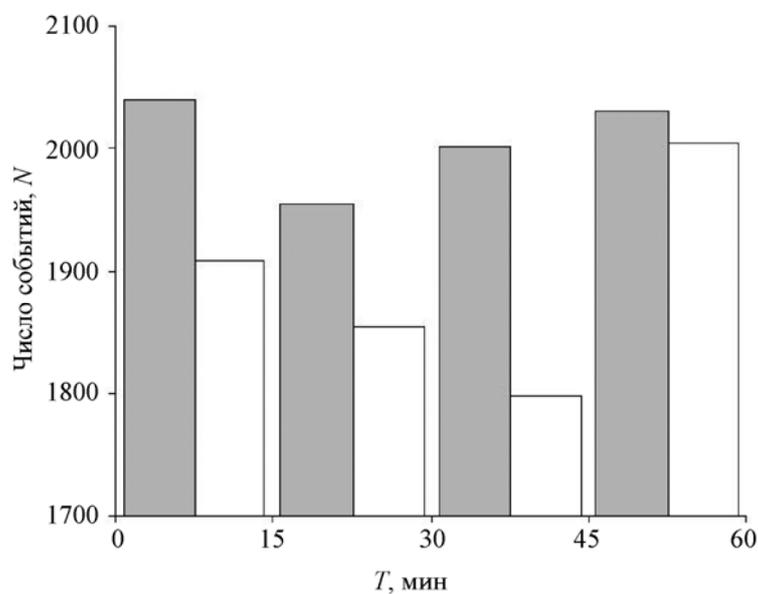


Рис. 3. Распределение событий по времени начала серии колебаний $Pc1$ в пределах часа. Данные наблюдений на обсерватории “Борок” с 1958 по 1992 гг. Событие – начало серии колебаний $Pc1$, указанное в каталоге Э.Т. Матвеевой (http://www.wdcb.ru/stp/data/catal_pc). Из рассмотрения исключены все события, происходившие точно в 0-ю, 15-ю, 30-ю и 45-ю минуту каждого часа. Серым цветом отмечены первые половины 15-минутных интервалов

По-видимому, мы использовали максимально большую однородную выборку, доступную в настоящее время. Статистически наиболее надежный результат может быть получен, если выполнить суммирование данных всех 15-минутных интервалов, выбрать подходящий уровень значимости α , найти границу критической области p_1 и сделать проверку начальной гипотезы H_0 в сопоставлении с альтернативной H_1 . Результат выполненного суммирования показан на рис. 4.

Теперь выберем значение $\alpha = 0.01$. Тогда $z_\alpha = 2.35$, и при $n = 15592$ по формуле (2) находим $p_1 = 0.509$. При подсчете по каталогу волн $Pc1$ получаем $m = 8027$. В таком случае отношение m/n , равное 0.514, выходит за пределы допустимой области принятия гипотезы H_0 , поскольку $m/n > p_1$. Это дает основание отклонить нулевую гипотезу с уровнем значимости $\alpha = 0.01$. Другими словами, существует не более одного шанса из ста, что обнаруженная 15-минутная модуляция, а именно, небольшое превышение

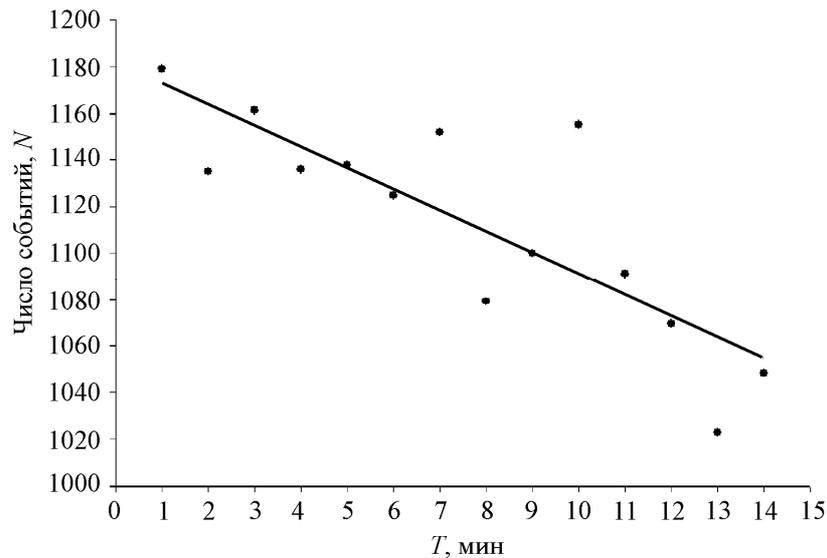


Рис. 4. Зависимость числа событий от времени в пределах 15-минутного интервала по наблюдениям на обсерватории “Борок” в период с 1958 по 1992 гг. Коэффициент корреляции равен -0.82

числа событий в первую половину 15-минутного интервала по сравнению с числом событий во вторую половину, есть просто игра случая.

Полученный результат свидетельствует о том, что начало серии колебаний *Pc1* действительно более вероятно в первую половину 15-минутного интервала, чем во вторую. Различие невелико (относительная частота появления событий – 0.514 против 0.486), однако статистически оно совершенно достоверно.

Заключение

Результат статистического исследования свидетельствует, что гипотеза о существовании антропогенного эффекта 15-минутной модуляции магнитосферных волн *Pc1* вполне правдоподобна. Однако остается неясным, что конкретно выступает в роли модулирующего фактора и в результате каких процессов воздействие этого фактора на околоземную среду приводит к появлению волн *Pc1*.

По первому вопросу пока можно высказать лишь самые общие суждения. Во Введении упоминалась мировая сеть АИС, каждые 15 мин синхронно воздействующих на ионосферу импульсным радиоизлучением. Несомненно, существуют и другие факторы. Например, вполне правдоподобным выглядит предположение о глобальном возбуждении мощных электромагнитных импульсов при синхронном переключении режима энергетических систем в нулевую минуту каждого часа. Более сильное предположение об импульсной 15-минутной модуляции работы мировой энергетической системы требует, вообще говоря, специального дополнительного исследования.

Что же касается второго вопроса, то здесь наша гипотеза состоит в том, что радиационный пояс, в котором возникают волны *Pc1*, находится в метастабильном состоянии и при наложении достаточно сильного затравочного импульса переходит в режим самовозбуждения [Гульельми, 1979; Guglielmi, Pokhotelov, 1996].

Во Введении было сказано, что обнаруженный эффект представляет интерес с физической точки зрения. Существует, однако, и другая, не менее важная причина, определяющая актуальность дальнейшего исследования эффекта. Речь идет о том, что в перспективе контроль за глубиной 15-минутной модуляции волн *Pc1* может найти применение в системе мониторинга геофизической обстановки, давая качественную ин-

формацию о долговременных вариациях интенсивности техногенного воздействия на околоземную среду.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Э.Т. Матвеевой за каталог волн $Pc1$, составленный ею по данным наблюдений в период 1958–1992 гг. на Геофизической обсерватории “Борок”, а также искренне благодарят Б.В. Довбню за сонограмму, представленную в настоящей статье на рис. 2 и за многократное обсуждение всех аспектов проблемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-00048).

Литература

- Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 139 с.
- Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // УФН. 2007. Т. 177, № 12. С.1257–1276.
- Гульельми А.В., Довбня Б.В., Клайн Б.И., Пархомов В.А. Стимулированное возбуждение альвеновских волн импульсным радиоизлучением // Геомагнетизм и аэрономия. 1978. Т. 18, № 1. С.179–181.
- Гульельми А.В., Зотов О.Д. О геомагнитном эффекте “Мировых дней” // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 5. С.870–872.
- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Довбня Б.В., Зотов О.Д., Щепетнов Р.В. Связь УНЧ электромагнитных волн с землетрясениями и с антропогенными воздействиями // Геофизические исследования. 2008. Вып. 9. С.3–23.
- Зотов О.Д., Гульельми А.В. Совместный анализ электромагнитных колебаний $Pc1$ и землетрясений // Электромагнитные исследования Земли: Материалы IV Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли. Москва, 1–4 сентября 2009 г. / Под ред. В.В. Спичак. М.: ИФЗ РАН, 2009. С.162.
- Зотов О.Д., Калишер А.Л. Статистический анализ эффектов искусственного воздействия на ионосферу // Воздействие мощными радиоволнами на ионосферу. Апатиты: КО АН СССР, 1979. С.150.
- Матвеева Э.Т. Каталог геомагнитных пульсаций типа $Pc1$ (“жемчужин”) по данным наблюдений на геофизической обсерватории “Борок” ОИФЗ РАН за 1957–1992 гг. М.: ОИФЗ РАН, 1996. http://www.wdcb.rssi.ru/WDCB/wdcb_stp.shtm1.
- Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Наука, 1980. 299 с.
- Потапов А.С., Довбня Б.В., Цэгмед Б. О воздействии землетрясений на ионосферные резонансы Альвена // Физика Земли. 2008. № 4. С. 93–96.
- Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. М.: Финансы и статистика, 1982. 319 с.
- Bortnik J., Cutler J.W., Dunson C., Bleier T.E. The possible statistical relation of $Pc1$ pulsations to Earthquake occurrence at low latitudes // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P.2825–2836.
- Fraser-Smith A.C. Weekend increase in geomagnetic activity // J. Geophys. Res. 1979. V. 84(A5). P.2089–2096.
- Fraser-Smith A.C. Effect of man on the geomagnetic activity and pulsations // Adv. Space Res. 1981. V. 1. P.455–466.
- Guglielmi A., Pokhotelov O. Geoelectromagnetic waves. IOP Publ. Ltd.: Bristol and Philadelphia, 1996. 402 p.
- Guglielmi A., Zotov O. Human impact on the natural geophysical phenomena: $Pc1$ electromagnetic activity // Geophys. Res. Abst. 2006. V. 8. Abstract number EGU06-A-01013. EGU General Assembly 2006.
- Guglielmi A., Zotov O. The human impact on the $Pc1$ wave activity // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. P.1753–1758.

- Guglielmi A., Zotov O.* Long-term trend in Pc1 weekend effect according to geomagnetic data collected by the Borok Geophysical Observatory // *Geophys. Res. Abstr.* 2008. V. 10. EGU2008-A-04807. EGU General Assembly 2008.
- Kangas J., Guglielmi A., Pokhotelov O.* Morphology and physics of short-period magnetic pulsations: *Space Sci. Rev.* 1998. V. 83. P.435–512.
- Menk F.M.* Stimulation of Pc1 pulsations by HF radio transmissions // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1985. V. 47. P.713–718.
- Troitskaya V.A., Guglielmi A.V.* Geomagnetic micropulsations and diagnostics of the magnetosphere // *Space Sci. Rev.* 1967. V. 7, N 5/6. P.689–769.

Сведения об авторах

ГУЛЬЕЛЬМИ Анатолий Владимирович – профессор, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ИФЗ РАН, 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 582-99-71. E-mail: guglielmi@mail.ru

ЗОТОВ Олег Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок. Тел.: (485) 472-47-61. E-mail: ozotov@inbox.ru

15-MINUTES MODULATION OF THE Pc1 GEOELECTROMAGNETIC WAVES

A.V. Guglielmi¹, O.D. Zotov²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

² *Borok Geophysical Observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Science, Borok (Yaroslavl region)*

Abstract. This paper deals with the problem of human impact on the electromagnetic oscillations of the Earth's magnetosphere in the frequency range of Pc1 (0.2–5 Hz) which are spontaneously excited due to the ion-cyclotron instability of space plasma. We focus our attention on the analysis of the long-term ground-based observations to study the effect of specific 15-minutes modulation of the Pc1 wave activity. It is supposed that such effect is evidently of the human origin. For the present statistical study we have used the data which has been collected by the continuous recording of the Pc1 at the Borok Geophysical Observatory ($\Phi=54.05^\circ$, $\Lambda=119.44^\circ$, $L=2.9$) for the period from 1958 to 1992. The database contains 15592 series of Pc1 oscillations. The superposition epoch analysis shows clearly the modulation of the Pc1 wave activity with the period of 15 minutes. The modulation factor, i.e. relative depth of the 15-minutes cycle, is about 7%. The statistical reliability of our result is very high. The main conclusion is that the anthropogenic 15-minutes cycle in the Pc1 wave activity is a real geophysical phenomenon. The possible sources of anthropogenic signals which influence on the space plasma results in a weak 15-minute modulation Pc1 are specified.

Keywords: electromagnetic waves, magnetosphere, technosphere.