

УДК 551.594.21

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ АМПЛИТУДНО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШУМОВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ДИАПАЗОНЕ КРАЙНЕ НИЗКИХ ЧАСТОТ

© 2012 г. В.В. Пчелкин, М.И. Белоглазов, В.И. Кириллов

Полярный геофизический институт КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

Проанализированы результаты непрерывных измерений горизонтальной магнитной компоненты шумового поля грозовых источников в частотном диапазоне 6–10 Гц, выполненных в 2006–2009 гг. на высокоширотной магнитной обсерватории “Ловозеро” (центральная часть Кольского п-ова). Для каждого из сезонов северного полушария построены средние суточные вариации ряда амплитудных характеристик магнитного поля (среднего значения модуля горизонтальной компоненты поля, уровней амплитуд при разных заданных порогах и др.).

Проведено сопоставление систематических сезонных изменений, прослеженных по суточным кривым амплитудных характеристик, с установленными по данным наземных и спутниковых наблюдений сезонными изменениями активности и положения мировых грозовых центров. Выявлены различия суточных вариаций числа сильных и слабых шумовых сигналов. В рамках модели трех точечных источников выполнены оценки сезонных изменений активности мировых грозовых центров.

Ключевые слова: молниевая активность, электромагнитные шумы, мониторинг, суточная вариация, угловые распределения, глобальная электрическая цепь, моделирование, токовый вклад.

Введение

Наблюдения за грозовой активностью кроме практического интереса, связанного с высокой пожарной опасностью молниевых разрядов и необходимостью обеспечения устойчивой работы ряда технических устройств, представляют особый интерес как источник экспериментального материала для разработки теории глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Действительно, подобие суточного хода унитарной вариации напряженности электрического поля и площади, занимаемой грозами, стало серьезным основанием для предположения Ч. Вильсона [*Wilson*, 1925] о доминирующей роли грозового генератора в предложенной им модели глобальной электрической цепи. В дальнейшем развитии теории, как в стационарном, так и нестационарном приближениях, роль грозового генератора рассматривалась как наиболее значительная (см., например, обзоры в [*Имянитов*, 1962; *Ансен*, *Канониди*, 1988; *Кузнецов*, 2004; *Mareev et al.*, 2008; *Анисимов*, *Мареєв*, 2008; *Ruscroft et al.*, 2008; *Давыденко*, *Мареєв*, 2010]). Однако установленный в работе [*Парамонов*, 1950] факт наличия противофазы в годовом ходе напряженности электрического поля и среднего числа гроз заставил пересмотреть и уточнить эту концепцию.

Как отмечалось в докладе [*Давыденко*, *Мареєв*, 2010], “... перспективы моделирования ГЭЦ связаны с самосогласованным учетом... стационарных и нестационарных источников атмосферного электричества...”. Интенсивное развитие современных концепций глобального электрического поля обусловлено успехами экспериментальных измерений электрического поля и проводимости и новыми оценками вклада

разных источников в токовый баланс [Анисимов, Мареев, 2008; Mareev et al., 2008; Rycroft et al., 2008].

Существенным недостатком традиционных наблюдений за совокупной площадью, занятой грозами (как и числом молниевых разрядов), является то, что они предоставляют недостаточную информацию о переносимом электрическом заряде. На основании этой информации, например, сложно опровергнуть аргумент сторонников взглядов Ч. Вильсона на роль гроз о том, что сезонное увеличение числа разрядов может сопровождаться уменьшением (в среднем) тока молний.

Помимо отмеченного, сегодня спутниковые и наземные наблюдения за числом молниевых разрядов и площадью, охваченной грозами, не отличаются оперативностью и полнотой охвата территории [Christian et al., 2003; Rodger et al., 2004, 2006; Abarca et al., 2010]. Высокая дисперсия результатов, обусловленная отрывочностью наблюдений, требует усреднения за довольно длительные интервалы времени по специальным методам. В частности, количество регистрируемых в настоящее время событий (молниевых разрядов) в сети *WWLLN* (*World-Wide Lightning Location Network*) составляет в сутки около 10% от количества молниевых разрядов в глобальном масштабе. Одну и ту же точку на поверхности Земли оптический детектор-регистратор спутника “наблюдает” всего около 13 мин в году. Таким образом, “он-лайн”-контроль числа молниевых разрядов в глобальном масштабе пока остается делом будущего.

В связи со сказанным становится понятен интерес к альтернативным источникам информации о грозовых разрядах, в частности, к исследованиям амплитудных характеристик шумового магнитного поля в диапазонах крайне- и сверхнизких частот. Назовем работу [Колосков и др., 2005], в которой содержится обширный экспериментальный материал результатов поляризационных измерений полей сверхнизкой частоты, выполненных в Антарктиде в 2001–2003 гг., и описание разработанных алгоритмов решения задачи поляризационной диагностики полей шумановских резонансов, на основе которых осуществляется интерпретация результатов эксперимента. Более обстоятельное обсуждение различных методических аспектов решения обратной задачи можно найти в работах [Колосков и др., 2004; Николаенко, 2005]. К сожалению, в названных работах не обсуждаются способы отбора магнитоспокойных дней, выполнение которого чрезвычайно важно при проведении высокоширотных измерений.

Один из параметров, доступный для экспериментального наблюдения и последующего анализа, – это так называемая амплитуда первого шумановского резонанса, представляющая собой коэффициент Фурье-разложения при первой резонансной гармонике (~ 7.8 Гц). Эта характеристика может быть оперативно рассчитана и, согласно предположению, высказанному в работе [Белоглазов и др., 2009], определяется всей совокупностью молниевых токов и является показателем уровня глобальной грозовой активности. В исследованиях [Александров и др., 1972; Блюх и др., 1977; Долгополов, 1987; Marcz et al., 1997; Rossi et al., 2007; Белоглазов и др., 2009] максимумы суточной вариации амплитуды первого шумановского резонанса трактуются как следствие усиления активности мировых грозовых центров в течение суток.

Отметим, что, при всей логичности такого предположения, подтвердить его экспериментально достаточно не просто. Свой вклад в электромагнитные шумы рассматриваемого диапазона могут вносить магнитосферные, сейсмические и иные источники (см., например, обзоры в работах [Александров и др., 1972; Блюх и др., 1977]). Проведенный нами анализ имеющихся публикаций не выявил прямых систематических сопоставлений суточного и сезонного хода этой характеристики с результатами наземных и спутниковых наблюдений глобальной грозовой активности. Подобный анализ мог бы предоставить доказательства доминирующего влияния именно глобальной грозовой активности на вариации интенсивности электромагнитных шумов на первой

резонансной частоте и, возможно, в перспективе дать возможность разделить вклад различных источников. Авторами настоящей работы была предпринята попытка в какой-то мере восполнить этот пробел. Цель работы – экспериментальное установление сезонных изменений в суточных вариациях среднего уровня шумового электромагнитного поля грозовых источников в области частот первого шумановского резонанса. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

- проведены трехлетние измерения горизонтальной магнитной компоненты поля;
- выполнена тщательная сортировка материалов для исключения записей, произведенных в дни с магнитосферными и техногенными помехами;
- проведено необходимое усреднение экспериментальных кривых по сезонам;
- выполнено детальное сопоставление полученных результатов с результатами спутниковых наблюдений за молниями и наземных за грозами.

Кроме этого, в рамках модели трех точечных источников были выполнены оценки сезонной изменчивости активности мировых грозовых центров.

В качестве исследуемой характеристики поля был выбран модуль горизонтальной компоненты магнитного поля B , измеряемой в полосе частот вблизи первой шумановской моды. Как показали наблюдения, суточный ход этой характеристики весьма близок к суточному ходу амплитуды шумановского резонанса. Однако, в отличие от амплитуды первого шумановского резонанса, модуль горизонтальной компоненты обладает более прозрачным физическим смыслом (известно, что ясная физическая трактовка коэффициентов разложения при анализе Фурье возможна лишь в случае приема регулярных периодических сигналов).

Экспериментальные данные и их обработка

В работе использованы результаты измерений горизонтальной составляющей магнитного поля, выполненных при помощи двухкомпонентного индукционного магнитометра на высокоширотной обсерватории “Ловозеро”, расположенной в центральной части Кольского полуострова (67.97° с.ш., 35.08° в.д.).

Двухкомпонентный магнитометр, подробное описание которого содержится в работах [Белоглазов и др., 2009; Roldugin et al., 2003], состоит из антенной системы с предусилителями и приемной части. Две ортогональные антенны ориентированы вдоль и поперек магнитного меридиана. Каждая антенна представляет собой 10-секционный соленоид с 260 тыс. витков провода, внутри которого имеется ферритовый сердечник диаметром 45 мм и длиной 600 мм. Принятые антеннами сигналы через предусилители по кабелю поступают в двухканальный приемный блок, расположенный в здании обсерватории. Для уменьшения электромагнитных помех антенны удалены от здания на 300 м. Частоты среза полосовых фильтров четвертого порядка составляют 0.1 Гц снизу и 10 Гц сверху. Для контроля стабильности коэффициента передачи тракта предусмотрена возможность калибровки сигнала, осуществляемой на частоте 5 Гц квазимонохроматическим сигналом; при калибровке по уровню 0.5 пТл отношение сигнал/шум составляет примерно 30 дБ. Оцифровка данных проводится с помощью 12-битного АЦП при частоте 40 Гц. Экспериментальные данные подвергались цифровой фильтрации, сужающей полосу частот примерно до диапазона 6–10 Гц, соответствующего области первой шумановской резонансной моды.

С одной стороны, отсутствие в высоких широтах сигналов от ближних гроз в течение большей части года является благоприятным условием при проведении наблюдений; с другой – близость к токовым источникам магнитосферных возмущений требует аккуратной сортировки материала для исключения записей с сильными магнитосферными и техногенными шумами.

Процедура сортировки включала в себя совместный анализ динамических спектров и суточного хода коэффициента k – параметра эмпирической функции распределения амплитуд шумов:

$$P(B) = [1 + (B/B_{50})^k]^{-1}, \quad (1)$$

где P – вероятность того, что амплитуда шумового сигнала (значение модуля горизонтальной компоненты магнитного поля) превысит величину B ; B_{50} – медиана распределения значений модуля горизонтальной компоненты поля.

Данная функция впервые была выведена и применена для описания закона распределения амплитуды огибающей атмосферных радиопомех в килогерцовом диапазоне в работах [Лихтер, Терина, 1960; Лихтер, 1961а,б; Махоткин, 1963]). Как показано в работах [Белоглазов, Пчелкин, 2010, 2011], при магнитосферных помехах, характеризующихся отличной от шумов молниевое происхождения функцией распределения амплитуд, ход коэффициента k , колебания которого в обычных условиях происходят в интервале 2.5–2.9, становится резко аномальным, что и позволяет выполнять сортировку экспериментального материала по источникам.

Динамические спектры позволяли определять краткосрочные аномалии техногенного и магнитосферного происхождения длительностью не менее 10 с. Время усреднения при построении суточного хода характеристик поля составляло полчаса. Разумеется, исключение всех дней с краткосрочными возмущениями было недопустимо, так как неоправданно резко снизило бы статистическую достоверность результата. Поэтому, из рассмотрения исключались данные за период, для которого усредненный за 30 мин параметр k в проверяемом фрагменте находился вне диапазона 2.5–2.9.

Дополнительно на качественном уровне рассматривались так называемые кривые превышения, показывающие суточный ход числа измерений, для которых модуль измеряемой величины превышал заданный порог. Эти кривые могут быть названы также кривыми суточного хода уровня амплитуды горизонтальной компоненты при заданном пороге.

Применяемая методика сортировки довольно трудоемка, целесообразность ее применения, как было отмечено выше, диктовалось желанием “сохранить” для анализа те дни, в которые построенный динамический спектр выявлял краткосрочную аномалию явно не грозового происхождения, но усреднение амплитудных характеристик аномального хода не выявляло, а сглаживало его. В результате выполненной сортировки для анализа из 1096 дней наблюдений было отобрано 303. Затем по отсортированному материалу были построены суточные вариации среднего за полчаса значения модуля горизонтальной компоненты магнитного поля и чисел превышения за время накопления при разных порогах. Также было выполнено усреднение построенных суточных кодов по каждому из сезонов северного полушария.

Обсуждение результатов

О сезонных изменениях суточной вариации амплитудных характеристик поля

Графики суточных вариаций среднего значения модуля горизонтальной компоненты шумового магнитного поля для двух дней – 06.01.2007 г. и 01.07.2007 г. – показаны на рис. 1. Форма кривых (положение максимумов и минимумов, их относительные высоты и т.д.) различна; она может существенно меняться с течением времени. В литературе этот факт обычно связывается с изменением во времени активности мировых грозовых центров – африканского, азиатского, американского. В частности, на кривой для 06.01.2007 г. (рис. 1, а) пик вблизи 8 ч UT соотносится с преобладанием активности азиатского центра гроз, а пик около 14 ч UT – африканского. Пик в районе 15 ч UT на кривой для 01.07.2007 г. (рис. 1, б) связывается с преобладанием активности африканского центра.

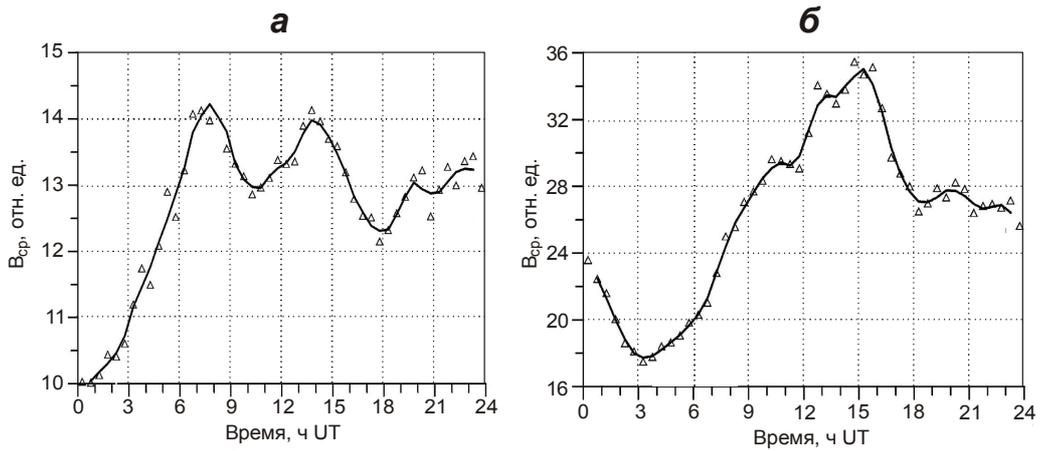
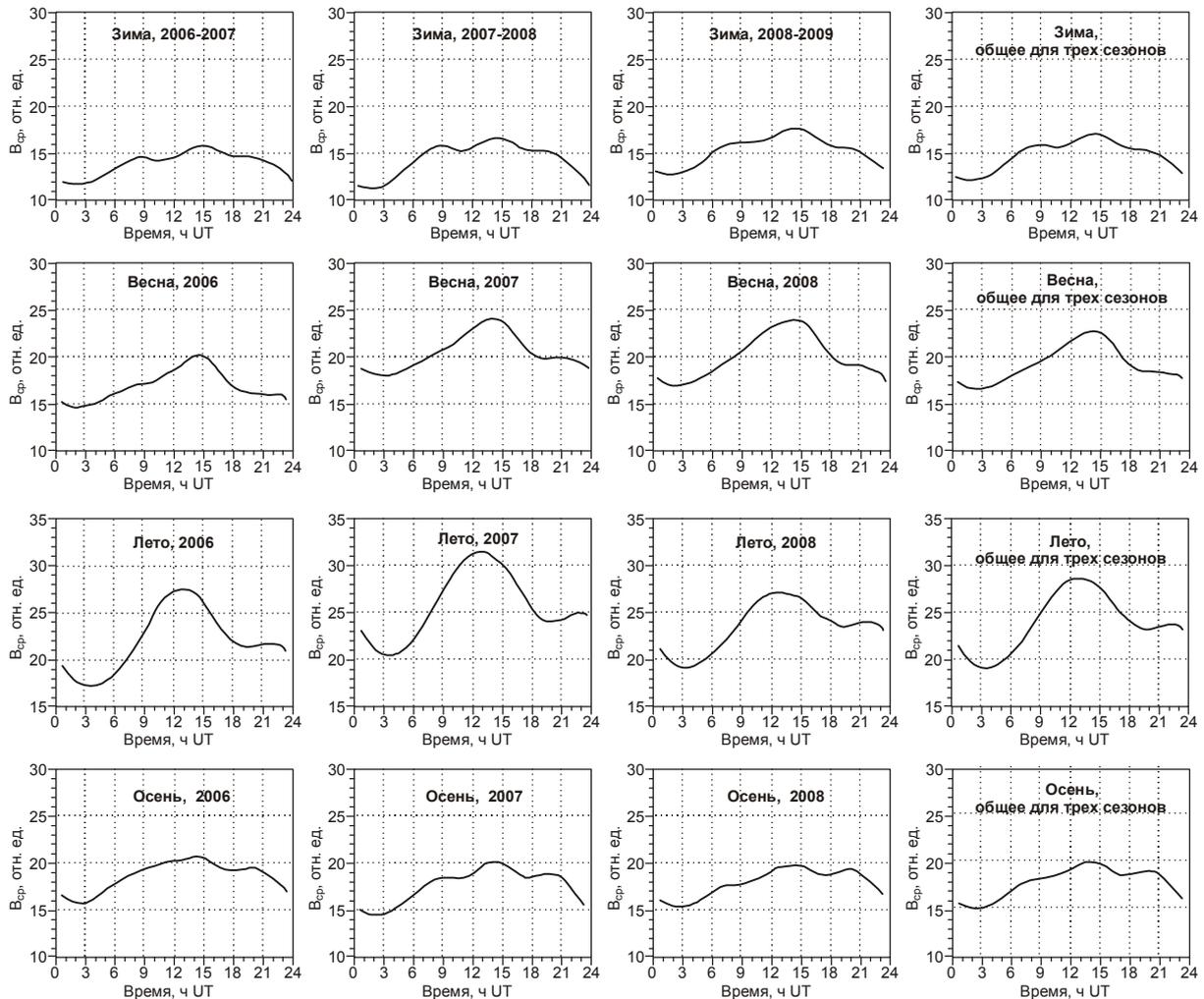


Рис. 1. Графики суточных вариаций среднего значения модуля горизонтальной компоненты шумового магнитного поля за 06.01.2007 г. (а) и 01.07.2007 г. (б). Треугольники – экспериментальные данные; осредняющая кривая построена с использованием стандартной процедуры симметричного сглаживающего окна по трем точкам

Несмотря на наблюдаемые существенные различия суточных вариаций в разные дни того или иного сезона (рассматриваются зима, весна, лето, осень северного полушария), усреднения выявляют довольно устойчивую морфологически форму кривых внутри каждого из них. Однако кривые для разных сезонов имеют свою особую форму, что хорошо видно на рис. 2.



На основании приведенных графиков можно утверждать, что сезонные изменения суточной вариации шумов от зимы к лету (весну и осень будем считать переходными сезонами) в первом приближении сводятся к следующему.

1. Наблюдается четко выраженный рост уровня измеряемых характеристик шумового магнитного поля во времени – от зимы (низкий средний уровень значений) к лету (более высокий уровень).

2. Максимум, соотносимый с усилением суточной активности американского центра гроз зимой (20 ч UT), летом появляется примерно на два часа позже (в 22 ч UT).

3. Время появления африканского максимума практически не меняется, а время усиления грозовой активности азиатского центра становится более поздним (примерно на 2 ч), что приводит к наложению пиков, соотносимых с активностью африканского и азиатского центров гроз.

Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными при наземных наблюдениях за территорией, охваченной грозами [Колоколов, 1969; Справочник..., 1965], и спутниковых наблюдениях за числом молниевых разрядов [Christian et al., 2003]. Согласно этим наблюдениям, в летний сезон происходит увеличение активности американского, азиатского и африканского центров; при этом африканский центр совершает миграцию в направлении север–юг, площадь азиатского центра значительно увеличивается за счет появления новых очагов гроз, расположенных западнее зимней локализации центра, а площадь американского центра расширяется в направлении Северной Америки. Смещение центров по долготе является, по-видимому, самой вероятной причиной сдвига пиков 20 ч UT и 10 ч UT на кривых суточных вариаций амплитудных характеристик на более поздние часы и наложения двух соседних пиков (азиатского и африканского) в летний сезон.

Наблюдения суточных вариаций доминирующих направлений прихода шумовых сигналов грозовых источников в диапазоне частот 6–11 Гц

Разумно предположить, что неоднородность распределения грозовой активности по поверхности Земли должна иметь своим следствием неоднородность в распределении регистрируемых доминирующих направлений прихода шумовых сигналов диапазона частот первого шумановского резонанса (см. например, [Александров и др., 1972; Блюх и др., 1977; Белоглазов и др., 2009]). Действительно, анализ суточных угловых распределений шумовых сигналов в диапазоне частот 6–11 Гц (углы определялись по результатам двухкомпонентной регистрации горизонтальной составляющей магнитного поля) выявляет ощутимую анизотропию поля [Пчелкин, Белоглазов, 2010].

Отметим, что извлечение полезной информации из угловых распределений – задача непростая. Во-первых, в литературе, несмотря на разумность предположения о связи активности мировых грозовых центров и соответствующих угловых характеристик регистрируемого шумового поля, отсутствуют его доказательства. Во-вторых, в целом ряде работ (см., например, [Блюх и др., 1977; Fullekrug et al., 1996; Fullekrug, Sukhorukov, 1999]) называются факторы, которые могут вносить существенную погрешность в определение истинного азимута на источники сигналов по углу прихода в пункте регистрации (влияние береговой линии, неоднородности ионосферы, раздела день–ночь, магнитного поля Земли, невертикальных разрядов и т.д.). Например, согласно оценкам, выполненным в [Fullekrug, Sukhorukov, 1999], погрешности, вносимые разделом день–ночь и береговой линией в процедуру определения азимута на сильные



Рис. 2. Графики сезонных вариаций суточной кривой модуля горизонтальной компоненты шумового магнитного поля. Наблюдения 2006–2008 гг.

молнии, ассоциированные со спрайтами, составляют до 12° . Приведенные соображения заставляют с осторожностью относиться к анализу угловых распределений регистрируемых сигналов.

Рассчитать точно поправки для определения истинных азимутов на данном этапе исследований затруднительно. Однако доказательства отклика регистрируемых направлений прихода шумовых сигналов на изменения активности мировых центров и возможности соответствующего удаленного мониторинга хода грозовой деятельности можно получить, анализируя связь сезонной изменчивости положения грозовых центров с сезонными изменениями соответствующих угловых распределений. С этой целью нами для двенадцати сезонов 2006–2009 гг. были построены средние для каждого сезона суточные распределения сигналов по углам прихода (рис. 3). При этом было установлено, что, во-первых, угловые распределения, несмотря на серьезные межсуточные изменения, при усреднении по сезонам дают довольно устойчивую морфологическую картину, индивидуальную для каждого сезона. Характерные особенности этих картин выражаются, прежде всего, в положении (по углам и времени) светлых пятен на графиках плотности.

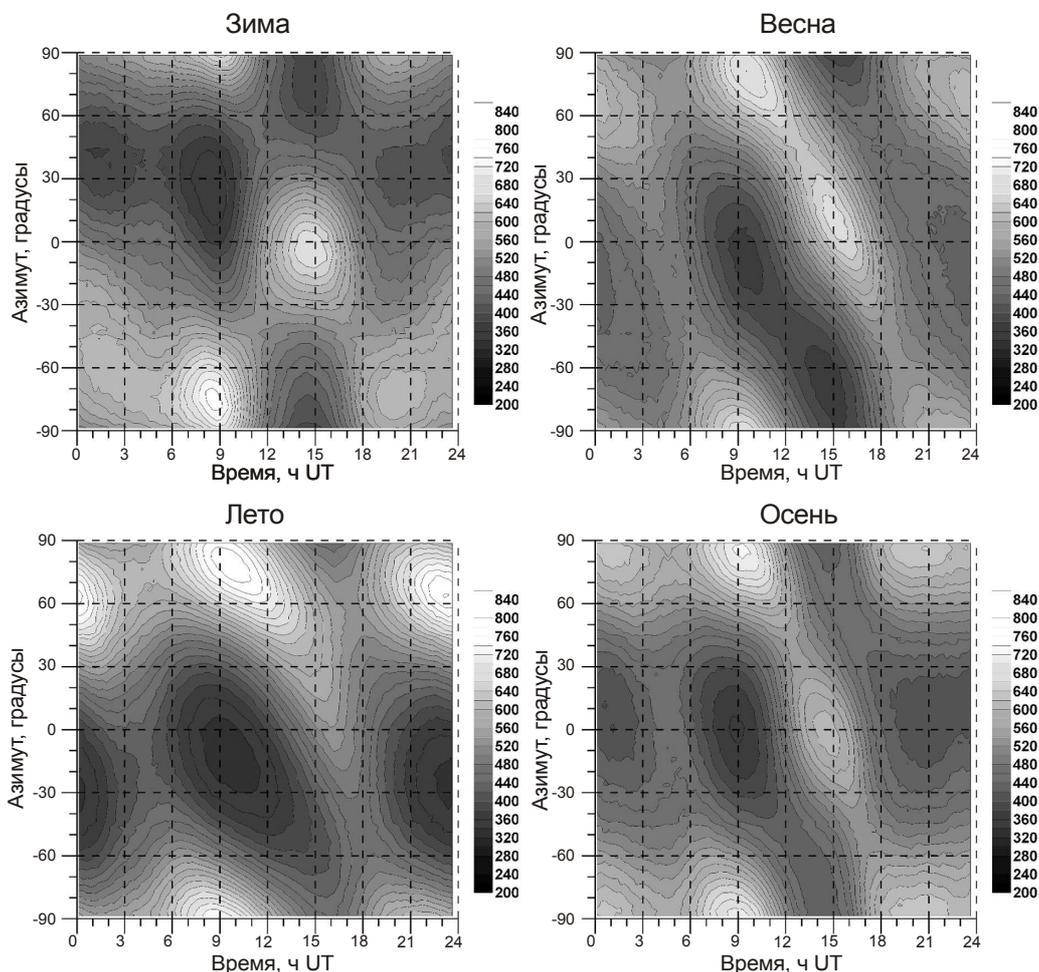


Рис. 3. Среднесуточные распределения регистрируемых сигналов по углам прихода для четырех сезонов 2006–2008 гг.

Во-вторых, наблюдения за сезонной динамикой этих пятен показали, что она хорошо согласуется с метеорологической информацией о сезонном движении мировых очагов гроз, согласно которой [Christian et al., 2003; Справочник..., 1965] в летний сезон наблюдается расширение активности (миграция) американского центра в сторону Северной Америки, а азиатского – от Австралии и Океании в сторону Евразийского континента.

Расчеты по доминирующим направлениям прихода показывают, что среднее направление на азиатский мировой центр изменяется от зимы к лету приблизительно на 25° ; направление, связанное с африканским центром, остается практически неизменным; азимут на американский центр меняется примерно на 45° (см. рис. 3). Соответствующим образом меняются и времена максимальной активности, определяемые по графикам, что связано с перемещением центров по часовым поясам. Эти серьезные аргументы подтверждают, что в сезонных изменениях угловых распределений регистрируемых шумов мы наблюдаем отклик на сезонные перемещения мировых грозовых центров – африканского, американского и азиатского.

Сказанное позволяет обоснованно использовать суточные распределения регистрируемых шумовых сигналов по углам для уточнения времен максимальной активности центров гроз. Согласно построенным угловым распределениям, времена максимумов для азиатского, африканского и американского центров составляли в зимний сезон соответственно 8.5 ч, 14.5 ч и 20 ч UT; в летний – 10, 15.5 и 23 ч UT.

Оценки сезонных изменений активности мировых грозовых центров

Показанная выше связь суточных кривых среднего уровня шумов и доминирующих направлений прихода сигналов в пункте регистрации с сезонными миграциями и расширением территории мировых грозовых центров является экспериментальным доказательством возможности укрупненного электромагнитного мониторинга активности мировых центров. В частности, по сезонным вариациям суточного хода шумов с привлечением информации об угловых распределениях можно выполнять оценки вариаций грозовой активности каждого из них.

Подобные попытки предпринимались как в рамках относительно простых, так и более сложных моделей мировой грозовой активности. Например, в модели, представленной в работе [Бормотов и др., 1972], были использовано одно- и трехцентровое приближение без точного учета геометрического фактора, возможного поглощения и усреднений параметров по соответствующим ансамблям. Более точным соответствием физическим реалиям отличается модель, рассматриваемая в [Галюк и др., 1983], которая, однако, в силу недостаточности экспериментальной базы для верификации параметров носит скорее теоретический характер. обстоятельное обсуждение различных методических аспектов решения обратной задачи можно найти в работах [Колосков и др., 2004; Николаенко, 2005].

Не претендуя на решение обратной задачи в полном объеме и получение абсолютных значений, авторы настоящей работы ставили перед собой лишь задачу оценки относительных межсезонных вариаций активности мировых центров гроз. Такая постановка, основанная на предположении о неизменности геометрических факторов ослабления, допускает проведение оценки этих вариаций достаточно простыми математическими средствами.

Для описания формы усредненных за зимние и летние сезоны кривых (см. рис. 2) была использована эмпирическая функция, представляющая собой сумму трех куполообразных функций:

$$B_{\text{cp}}(t) = A_1 \frac{1}{2^{k_1}} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{24} (t - t_1) \right) + 1 \right)^{k_1} + 0.1A_1 + A_2 \frac{1}{2^{k_2}} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{24} (t - t_2) \right) + 1 \right)^{k_2} + 0.1A_2 + A_3 \frac{1}{2^{k_3}} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{24} (t - t_3) \right) + 1 \right)^{k_3} + 0.1A_3 + C,$$

где t_1, t_2, t_3 – времена максимумов активности азиатского, африканского и американского мировых грозовых центров, составлявшие соответственно 8.5, 14.5, 20 ч UT в зимний сезон и 10, 15.5, 23 ч UT в летний; параметры k_1, k_2, k_3 , очевидно, определяли

ширину каждого из трех куполообразных функций; A_1, A_2, A_3 – амплитуды соответствующих максимумов. Параметр C можно трактовать как суммарный вклад гроз с остальной территории (включая океаны) и источников иного происхождения (магнитосферные, сейсмические и т.д.).

Параметры $A_1, A_2, A_3, k_1, k_2, k_3$ и C определялись в процессе решения оптимизационной задачи методом наименьших квадратов [Щиголов, 1969]. Токовый вклад каждого центра считался пропорциональным площади под соответствующей кривой. Результаты подбора оптимальных значений параметров для зимнего и летнего сезонов представлены на рис. 4.

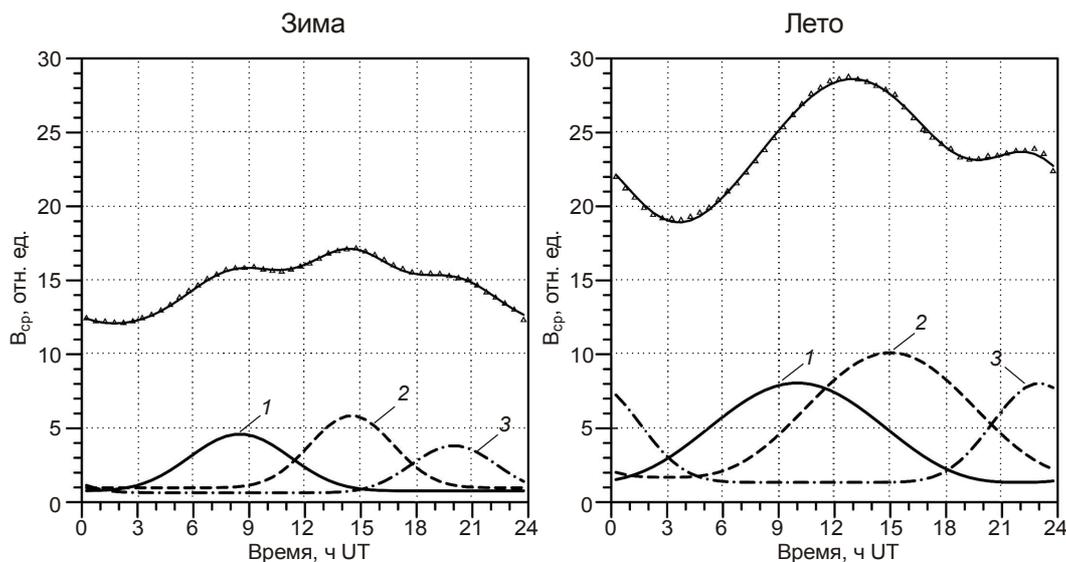


Рис. 4. Результаты моделирования суточного хода модуля горизонтальной компоненты шумового магнитного поля. Треугольники – экспериментальные точки; соединяющая их сплошная линия – результаты расчета по эмпирической формуле с оптимально подобранными параметрами. 1–3 – рассчитанные по эмпирической формуле графики активности азиатского (1), африканского (2) и американского (3) центров

Хотя такая эмпирическая аппроксимация не имеет иного физического смысла, кроме того, что она есть сумма трех куполообразных кривых, таким образом вполне возможно оценить относительные межсезонные вариации грозовой активности центров по площадям под построенными кривыми.

Выполненные оценки показали, что, во-первых, летняя суммарная токовая активность гроз примерно на 60% превышает зимнюю. Число молниевых разрядов летом (спутниковые наблюдения) больше чем зимой примерно на 40%. Это может служить аргументом в пользу того, что летом более вероятно одновременное (с увеличением числа молний) возрастание среднего по ансамблю токового момента, нежели его уменьшение. Следовательно, в частности, для объяснения летнего минимума на кривой напряженности, полученной в работе [Парамонов, 1950], необходимо искать иные обстоятельства и соображения, иные факторы баланса заряда Земли, как части глобальной электрической цепи. Ими могут быть сезонная вариация профиля проводимости, изменение высоты электросферы, летнее ослабление деятельности других генераторов (механизмов) атмосферного электричества, возможно, магнитосферных.

Во-вторых, постоянная “добавка” в формуле аппроксимирующей функции практически не меняется от сезона к сезону и не превышает 15–20%. Увеличение токовой активности трех центров составляет 150% для азиатского, 170% для африканского и

120% для американского. В силу этого удельный вклад каждого из центров в общую активность гроз возрастает от зимы к лету от 25–30% до 40–45%. Таким образом, основной вклад в сезонные вариации глобальной активности вносят три названных мировых центра гроз.

Отметим, что такие высокие сезонные возрастания – следствие не только увеличения количества молний на единицу площади, но и существенного расширения в летний сезон территории, занятой грозами.

Полученные оценки являются довольно грубыми. Совершенствование подобного электромагнитного мониторинга возможно путем увеличения количества пунктов наблюдения, что может позволить, как было отмечено в [Галюк и др., 1983], создать многоцентровую модель пространственного распределения грозовой активности, учитывающую экспериментально полученные статистические характеристики молниевых разрядов, и верифицировать ее параметры по результатам регистрации шумов на нескольких станциях.

Суточные вариации числа сигналов разного уровня

Интересный результат дают наблюдения суточной вариации числа регистрируемых сигналов за время накопления (кривые превышения) при разных порогах дискретизации. Кривые превышений (возможно, более адекватным будет термин – уровни поля) для низкого заданного порога морфологически полностью подобны вариациям среднего модуля горизонтальной компоненты магнитного поля. Кривая превышений при больших пороговых значениях может морфологически отличаться от кривой превышений при малом пороге. Пример таких отличий показан на рис. 5, где видно, что при увеличении порога, например с 40 отн. ед. (рис. 5, а) до 80 отн. ед. (рис. 5, б), в зимний сезон доминирующим становится не африканский, а азиатский центр активности.

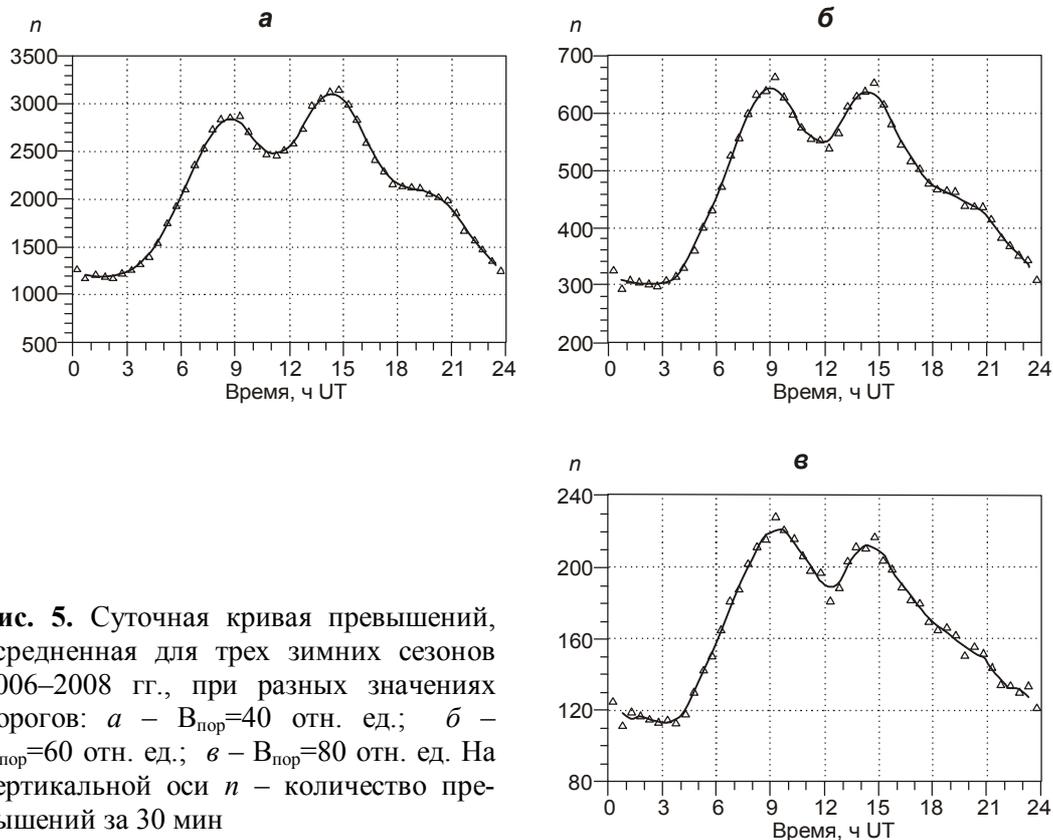


Рис. 5. Суточная кривая превышений, усредненная для трех зимних сезонов 2006–2008 гг., при разных значениях порогов: а – $V_{\text{пор}}=40$ отн. ед.; б – $V_{\text{пор}}=60$ отн. ед.; в – $V_{\text{пор}}=80$ отн. ед. На вертикальной оси n – количество превышений за 30 мин

Для привязки к среднему значению модуля горизонтальной компоненты напомним, что зимой оно составляло примерно 17 отн. ед., а летом примерно в полтора раза больше.

Преимущественная регистрация более сильных сигналов может искажать реальные характеристики общего распределения молниевых ударов во времени и по поверхности Земли. Летом число сильных сигналов увеличивается в большей степени, чем число слабых. Это увеличение зависит от заданного порога, при $V_{\text{пор}}=80$ отн.ед. можно наблюдать 7–10-кратное увеличение.

Выводы

1. Наблюдаются хорошо выраженные систематические сезонные изменения суточных вариаций амплитудных характеристик магнитного поля. Так, максимумы, обусловленные, по-нашему мнению, увеличением активности азиатского и американского грозовых центров, смещаются от зимы к лету на более позднее время (примерно на 2 часа). При этом положение африканского максимума практически не меняется. В результате, в летний сезон северного полушария происходит наложение пиков, соотносимых с активностью африканского и азиатского центров гроз.

2. Обнаруженные сезонные изменения суточных кривых и угловых распределений находятся в хорошем соответствии с данными спутниковых и наземных наблюдений о сезонных миграциях и расширении территории активности мировых центров. Это подтверждает возможность проведения высокоширотного электромагнитного мониторинга глобальной грозовой активности по наблюдениям за шумовым магнитным полем диапазона частот первого шумановского резонанса.

3. Средний уровень шумового электромагнитного поля в рассматриваемом диапазоне частот летом примерно на 60% превышает зимний. По спутниковым наблюдениям число молниевых разрядов летом больше, чем зимой примерно на 40%. Таким образом, летом происходит усиление работы грозового генератора, проявляющееся как в увеличении числа разрядов, так и в возрастании совокупной токовой активности молний.

4. Проведенные измерения и оценки подтверждают известную гипотезу о том, что в сезонных изменениях глобальной молниевой активности главную роль играют вариации активности трех основных мировых центров гроз, а не остальной территории, включающей в себя и океаны.

5. Обнаружены значительные различия в суточном ходе сигналов разного уровня. Это подтверждает, что преимущественная регистрация сильных сигналов может искажать пространственно-временные характеристики общей совокупности происходящих грозовых разрядов.

Благодарности

Авторы признательны А.Н. Васильеву, А.И. Воронину и С.П. Носкову за полезные консультации, обсуждения и подготовку аппаратуры, а также персоналу обсерватории “Ловозеро” за проведение измерений.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН № 4.11 “Электродинамика атмосферы, радиофизические методы исследований атмосферных процессов” (проект № 4.5 “Атмосферное электричество в нижней атмосфере полярных широт”).

Литература

- Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д., Озеров В.П., Потапов А.В., Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. 2008. № 10. С.8–18.
- Апсен А.Г., Канониди Х.Д., Чернышева С.П. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве. М.: Наука, 1988. 150 с.
- Белоглазов М.И., Пчелкин В.В. О распределении амплитуд естественных КНЧ-шумов по измерениям на Кольском полуострове // Труды XVI региональной конференции по распространению радиоволн. СПб., 2010. С.4–7.
- Белоглазов М.И., Пчелкин В.В. Особенности распределения уровней высокоширотного атмосферного шумового электромагнитного поля в окрестности первого шумановского резонанса // Геомагнетизм и аэрномия. 2011. Т. 51, № 5. С.677–682.
- Белоглазов М.И., Ахметов О.И., Васильев А.Н., Косолапенко В.И. Вариации глобальной грозовой активности по наблюдениям интенсивности 1-го Шумановского резонанса в Арктике // Метеорология и гидрология. 2009. Т. 60, № 12. С.18–24.
- Блюх П.В., Николаенко А.С., Филиппов Ю.В. Глобальные электромагнитные резонансы в полостях Земля–ионосфера. Киев: Наук. думка, 1977. С.146–147.
- Бормотов В.Н., Лазебный Б.В., Николаенко А.П., Шульга В.Ф. О возможности выбора модели мировой грозовой активности по наблюдениям шумановского резонанса // Геомагнетизм и аэрномия. 1972. Т. 12, № 1. С.135–136.
- Галюк Ю.П., Кириллов В.В., Копейкин В.Н., Муштак В.К. О связи СНЧ-шума с мировой грозовой активностью // Проблемы дифракции и распространения радиоволн. Л., 1983. Вып. 19. С.205–216.
- Давыденко С.С., Мареев Е.А. Современное состояние и перспективы моделирования глобальной электрической цепи // Труды XIV Всероссийской школы – конференции молодых ученых “Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты”. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010. С.26–30.
- Долгополов С.Г. О соответствии суточных вариаций уровней крайне низкочастотного поля Земли ходу мировой грозовой активности // Радиофизические исследования геофизических явлений на Востоке СССР / Под ред. В.Ф. Осинина. Магадан: СВКНИИ АН СССР, 1987. С.10–20.
- Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физических наук. 1962. Т. 76, вып. № 4. С.593–642.
- Колоколов В.П. О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности // Метеорология и гидрология. 1969. № 11. С.47–55.
- Колосков А.В., Буданов О.В., Безродный В.Г., Ямпольский Ю.М. Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 9, № 4. С.391–403.
- Колосков А.В., Безродный В.Г., Буданов О.В., Пазнухов В.Е., Ямпольский Ю.М. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10, № 1. С.11–29.
- Кузнецов В.В. Атмосферное электрическое поле: факты, наблюдения, корреляции, модели: Сб. докл. Петропаловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2004. С.165–196.
- Лихтер Я.И. Исследования атмосферников в СССР в 1957–1959 гг. // Геомагнетизм и аэрномия. 1961а. Т. 1, № 2. С.228–231.
- Лихтер Я.И. Об аппроксимационной формуле закона распределения амплитуды огибающей атмосферных радиопомех // Геомагнетизм и аэрномия. 1961б. Т. 1, № 2. С.281.
- Лихтер Я.И., Терина Г.И. Некоторые результаты исследования интенсивности атмосферных помех в Москве // Исследования ионосферы. М.: АН СССР, 1960. № 3. С.90–94.

- Махоткин Л.Г. Статистика атмосферных радиопомех // Геомагнетизм и аэрономия. 1963. Т. 3, № 2. С.284–292.
- Николаенко А.Н. Комментарий к статье А.В. Колоскова, О.В. Буданова, В.Г. Безродного и Ю.М. Ямпольского “Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских резонансов” // Радиофизика и радиоастрономия. 2005. Т. 10, № 2. С.202–210.
- Парамонов Н. А. О годовом ходе градиента атмосферно-электрического потенциала // Докл. АН СССР. 1950. Т. 71, № 1. С.39–40.
- Пчелкин В.В., Белоглазов М.И. Азимутально-временные характеристики естественных КНЧ-шумов по наблюдениям в высоких широтах // Труды 16-й региональной конференции по распространению радиоволн, СПб, 9 ноября –11 ноября 2010 г. С.33–36.
- Ремизов Л.Т. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука, 1972. С.33–35.
- Справочник по геофизике. М.: Наука, 1965. С.218–228.
- Щиголов Б.М. Математическая обработка наблюдений. М.: Наука, 1969. 344 с.
- Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarneau T.J. An evaluation of the World-Wide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D18206. 11PP. doi:10.1029/2009JD013411.
- Christian H.J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J., Boeck W.L., Buechler D.E., Driscoll K.T., Goodman S.J., Hall J.M., Koshak W.J., Mach D.M., Stewart M.F. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector // J. Geophys. Res. 2003. V. 108 (D1). 4005. doi:10.1029/2002JD002347.
- Fullekrug M., Reising S.C., Lyons W.A. On the accuracy of arrival azimuth determination of sprite – associated lightning flashes by Earth – ionosphere cavity resonances // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23, N 25. P.3691–3694.
- Fullekrug M., Sukhorukov A.I. The Contribution of Anisotropic Conductivity in the Ionosphere to Lightning Flash Bearing Deviations in the ELF/ULF Range // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26, N 8. P.1109–1112.
- Marcz F., Satori G., Zieger B. Variations in Schumann resonances and their relation to atmospheric electric parameters at Nagycenk station // Ann. Geophys. 1997. V. 15, N 12. P.1604–1614.
- Mareev E.A., Yashunin S.A., Davydenko S.S., Marshall T.C., Stolzenburg M., Maggio C.R. On the role of transient currents in the global electric circuit // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L15810. doi:10.1029/2008GL034554.
- Roldugin V.C., Malsev Y.P., Vasiljev A.N., Shvets A.V., Nikolaenko A.P. Changes of Schumann resonance parameters during the solar proton event of 14 July 2000 // J. Geophys. Res. 2003. V. 108(A3). 1103. doi: 10.1029/2002JA009495.
- Rycroft M.J., Harrison R.G., Niccoll K.A., Mareev E.A. An overview of Earth’s global electric circuit and atmospheric conductivity // Space Sci. Rev. 2008. V. 137, N 1-4. P.83–105.
- Rodger C.J., Brundell J.B., Dowden R.L., Thomson N.R. Location accuracy of long distance VLF lightning location network // Ann. Geophys. 2004. V. 22, N 3. P.747–758.
- Rodger C.J., Werner S., Brundell J.B., Lay E.H., Thomson N.R., Holzworth R.H., Dowden R.L. Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study // Ann. Geophys. 2006. V. 24, N 12. P.3197–3214.
- Rossi C., Palangio P., Rispoli F. Investigations on diurnal and seasonal variations of Schumann resonance intensities in the auroral region // Ann. Geophys. 2007. V. 50, N 3. P.301–311.
- Wilson C.T. Investigations on lightning discharges and on electric field of thunderstorms // Philos. Trans. Roy. Soc. London. A. 1925. V. 221. P.73–115.

Сведения об авторах

ПЧЕЛКИН Владимир Викторович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН. 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, Академгородок, д. 26а. Тел.: (8 950)897-90-13. E-mail: pchelkin@pgia.ru

БЕЛОГЛАЗОВ Михаил Иванович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН. 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, Академгородок, д. 26а. Тел.: (8 921)153-88-92. E-mail: blgz@pgia.ru

КИРИЛЛОВ Вячеслав Игоревич – младший научный сотрудник, Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН. Адрес автора для переписки: 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, Академгородок, д. 26а. Тел.: (8 921) 153-88-92. E-mail: kirillov_v@pgia.ru

SEASONAL VARIATIONS OF GLOBAL THUNDERSTORM ACTIVITY OBTAINED FROM OBSERVATIONS OF AMPLITUDE-ANGLE CHARACTERISTICS OF THE NOISE ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE ELF RANGE

V.V. Pchelkin, M.I. Beloglazov, V.I. Kirilov

Polar Geophysical Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract. Continuous observations of horizontal components of noises magnetic field in the 6–10 Hz frequency range for 2006–2007 years were analyzed. The measurements were performed on the high latitude magnetic observatory “Lovozero” (the central part of the Kola Peninsula). The daily curves of some field amplitude characteristics (the average value of the module horizontal component of the magnetic field, the levels amplitudes at different thresholds, etc.) were constructed for each of the seasons of the northern hemisphere. The systematic seasonal changes of the daily curve of the amplitude characteristics of the noises field were shown and compared with seasonal changes in the position of the world thunderstorm centers and their activities are known from ground-based and satellite observations. It is noted that the diurnal variations of the number strength signals differ from the weak signals. The relative variations in thunderstorm center activity from season to season were estimated by with the model of three point sources.

Keywords: lightning activity, electromagnetic noises, monitoring, diurnal variation, angular distributions, global electrical circuit, simulation, current contribution.