

Литература

1. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра. 1981. 207 с.
2. Бердичевский М.Н., Нгуен Тхань Ван. Магнитовариационный вектор// Физика Земли. 1991. № 3. С. 52-62.
3. Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiodelisi A. and Rieven S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions // Geophysical Journal International. 1996. V. 124. P. 801-819.
4. Larsen I.C. Noise reduction in electromagnetic time series to improve detection of seismic-induced signals// Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 1997. V. 49. P. 1257-1265.
5. Schmucker U.. Anomalous of geomagnetic variations in the South wester United States. University of Colifornia Press, Berkelylos Angels-London, 1970. 165 с.

ПРОЯВЛЕНИЕ ГРОЗОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОЧАСТОТНОМ РАДИОИЗЛУЧЕНИИ MANIFESTATION OF THUNDERSTORM PROCESSES IN A LOW-FREQUENCY RADIO EMISSION

В.А. Муллаяров, В.И. Козлов, А.А. Торопов, Р.Р. Каримов
Институт космофизических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН
mullayarov@ikfia.ysn.ru

In this work we consider the some features of characteristics of electromagnetic signals in the ELF range, accompanying thunderstorm VLF signals (atmospherics) and with one the red transient luminous glows (sprites) at mesosphere heights and the bottom ionosphere are connected. Signals were recorded at a high latitude in very favorable conditions from the point of view of absence of any electric power and industrial radio noise. The emission is observed on frequencies below 1 kHz usually in the form of two half-period fluctuations (ELF impulse) and delay relative to the corresponding atmospheric within the range of 0-7 ms. In the recorded signals ELF fluctuations in most cases were observed later 1 and 3 ms, and in 14 % of events delay was absent.

Events of quasi-periodic ELF fluctuations with the period of fluctuations nearby 7 ms (frequency of 143 Hz), corresponding to the quasiperiod of ELF impulses accompanying atmospheric are found out. In each period of the wave form of fluctuations there can be an additional smaller peak. Fluctuations in short ($dt < 100$ ms) events actually carry out a atmospheric's role, which follow pulse of 2 half-cycles at a lower-frequency (in comparison with 7 ms). Characteristics of long ELF fluctuations testify to resonant character of the phenomenon and an opportunity of long "feed" the probable resonator during thunderstorm activity.

В настоящее время электромагнитное излучение грозových разрядов (атмосферики) широко используется для инструментального изучения грозовой активности. Импульсное излучение грозových разрядов занимает широкую полосу частот, однако максимум излучения приходится на низкочастотный (ОНЧ) диапазон. Для исследования открытых в 90-х годах грозových процессов в мезосфере и нижней ионосфере, отражением которых является оптическое свечение ("спрайты" и "джеты"), также могут быть использованы импульсные электромагнитные излучения, только на более низких частотах (в КНЧ диапазоне). КНЧ излучение обычно следует за основным ОНЧ атмосфериком (разрядом "облако-земля"), в связи с чем получило название "КНЧ-хвост" (КНЧ атмосферик), и отражает процесс более медленного (длительного) протекания токов после основного разряда [1]. В большинстве случаев КНЧ атмосферики сопровождают положительные наземные разряды, переносящие к земной поверхности положительный грозовой заряд облаков. В этой связи представляют интерес записи электромагнитных сигналов, произведенные в Якутии в одной из высокоширотных областей с повышенной вероятностью наблюдения положительных разрядов. Ниже приведены результаты анализа особенностей спектрально-временных характеристик КНЧ излучений, зарегистрированных в данном эксперименте, и в Якутске.

Эпизодическая запись электромагнитных сигналов грозových разрядов осуществлялась 21-23.08.08 в Верхоянье, недалеко от п. Батагай в точке с координатами ($\varphi = 67.95^\circ$, $\lambda = 134.95^\circ$) в основном в часы максимальной грозовой активности (15-18 час местного времени). Запись производилась с электрической антенны высотой 10 м, через усилитель на компьютер с частотой оцифровки 62,5 кГц. Условия записи были очень благоприятны с точки зрения отсутствия каких-либо сетевых и промышленных помех. Наблюдения проводились на высотах ~ 450 м над уровнем моря.

Картина грозовой активности по данным грозопеленгатора-дальномера в Якутске в период двухчасовой записи сигналов 21.08.08 вблизи п. Батагай представлена на рис. 1а. Наиболее высокая активность наблюдалась к западу от Якутска, второй, высокоширотный, очаг существовал вдоль р. Лена,

т.е. западнее места, где осуществлялась запись сигналов, причем его высокоширотная часть достигала побережья Северного ледовитого океана, т.е. широт 73° N. В указанные дни регистрировалась большая интенсивность ОНЧ сигналов с КНЧ хвостом. Пример сигнала приведен на рис. 1б, в котором КНЧ атмосферик начинается спустя ~ 1 мс после начала ОНЧ атмосферика.

На рис. 1б первая полуволна КНЧ сигнала положительная, а может быть и отрицательной. Распределение ОНЧ и КНЧ сигналов по знаку первого квазиполупериода в проанализированных случаях показало, что большинство КНЧ атмосфериков (64 %) были связаны с положительными

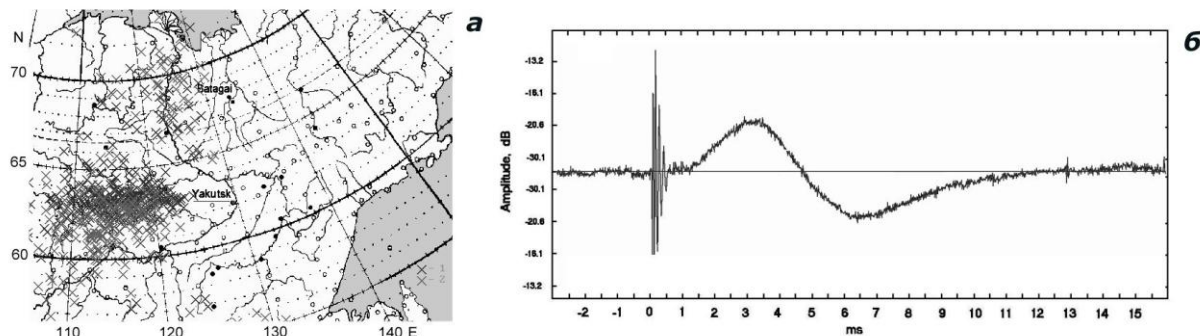


Рис. 1.

ОНЧ атмосфериками. Наименьшее число событий (только 14 %) представляют случаи отрицательных КНЧ атмосфериков после отрицательных ОНЧ атмосфериков. В целом, большинство КНЧ атмосфериков имели положительный знак первого квазиполупериода (71 %), при этом положительные КНЧ сигналы связаны, в основном, с положительными атмосфериками. Амплитуды КНЧ хвостов составляли, в среднем, $\approx 0,45$ от амплитуд соответствующих атмосфериков.

На рис. 2а приведено процентное распределение времени задержки КНЧ хвостов относительно ОНЧ атмосфериков. В трети событий (32 %) задержка составила 1 мс (из-за низкой частоты КНЧ сигналов точность измерения начала принята равной 1 мс). Второй пик пришелся на 3 мс, а события с задержкой более 4 мс составили только 5 %. Обращает внимание достаточно большой процент событий (14 %) с нулевой задержкой, когда КНЧ сигнал начинался на фоне атмосфериков. Зависимость задержек от амплитуды ОНЧ атмосфериков (от дальности до грозового источника) не видна (рис. 2б).

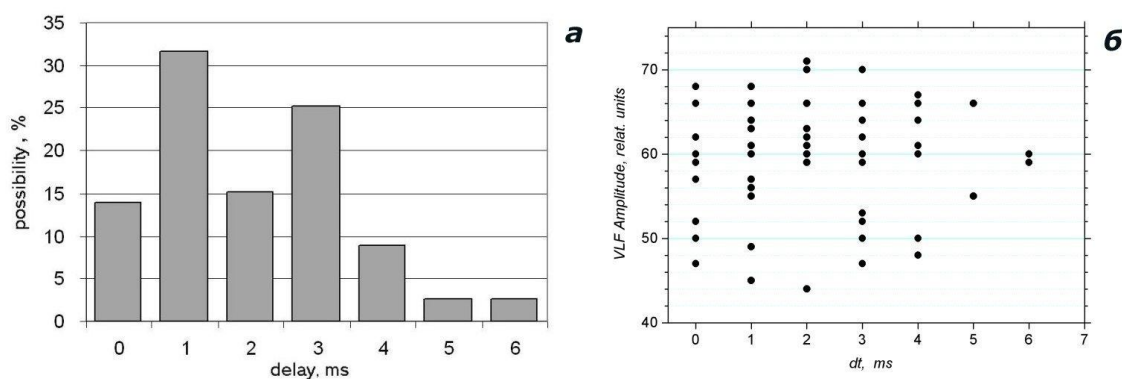


Рис. 2.

Анализ позволил выявить еще один тип КНЧ сигналов, в которых КНЧ цугу в виде 1-2 полувольт, но еще более низкочастотному, чем КНЧ атмосферик, могли предшествовать квазипериодические колебания электромагнитного поля в этом же диапазоне частот. Пример такого сигнала, зарегистрированного в одном из сеансов записи 22.08.2008 с 23:27:00 UT (утро по местному времени в Батагае) приведен на рис. 3а, где событие в виде усиливающихся квазипериодических колебаний развивалось с 12 мс от начала представленной записи. Как следует из динамической спектрограммы (сонограммы, рис. 3б), это узкополосные колебания, однако в спектре содержится до 4 гармоник. Основная частота квазипериодических колебаний в рассматриваемом сеансе записи составляла 143 Гц (см. спектр на рис. 3в). Всего зарегистрировано 4 коротких события ($dt \sim 100$ мс) и 4 длинных ($dt > 100$ мс). В свою очередь среди коротких событий в 2 случаях колебания наблюдались после КНЧ цугов и в 2

случаях колебания начинались до КНЧ цугов. Отметим, что по спектрограммам хорошо видно отсутствие сетевых и промышленных помех. Интересная последовательность сигналов представлена на рис. 3г, когда узкополосные колебания не только предшествуют КНЧ цугу (второе событие на рис. 3г), но и как бы начинаются с него в первом событии. На рис. 3г видно, что из первого импульсного широкополосного сигнала начинается несколько узкополосных ветвей, которые можно поставить в соответствие узкополосным колебаниям (с гармониками) во втором событии с цугом, ограничивающим колебания.

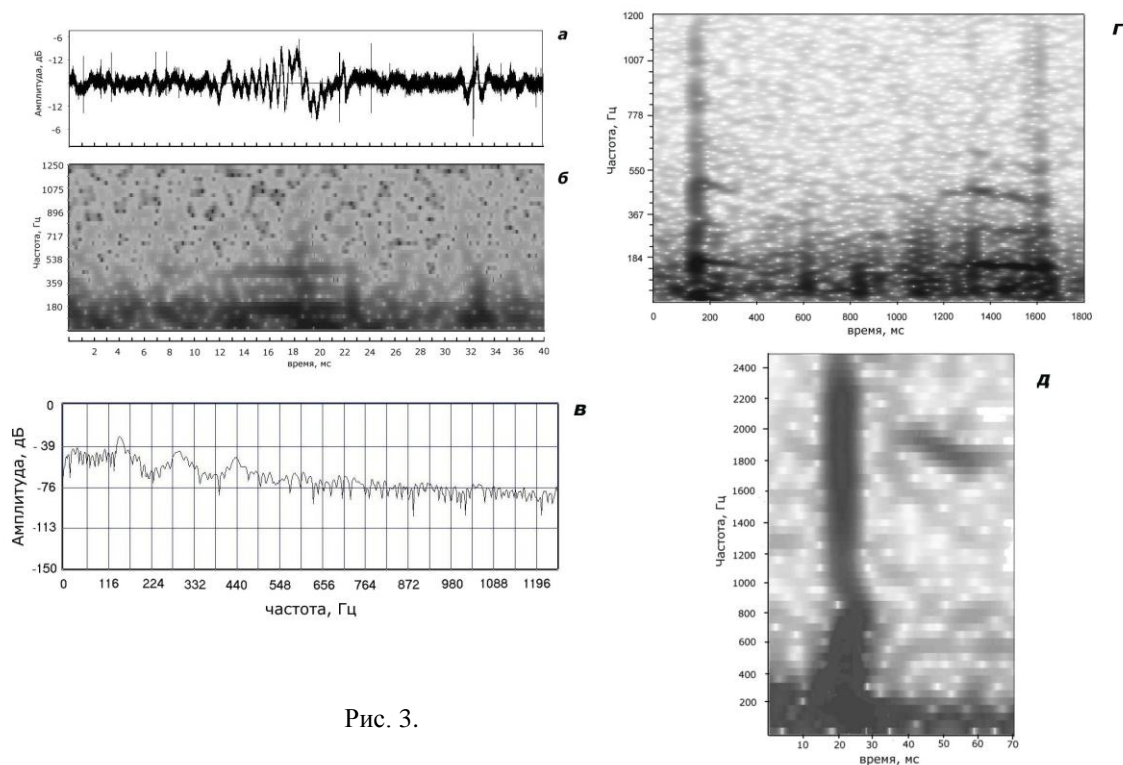


Рис. 3.

События с длительными колебаниями свидетельствуют о достаточно высокой добротности какого-то резонатора и наличие источника его подпитки. Из спектрального анализа (использовано окно Ханнинга при исходной частоте записи сигналов 62500 Гц) следует, что добротность резонансных колебаний на основной гармонике составляла около 7-8. Развернутая временная форма сигнала показывает, что в каждом периоде колебаний имеется дополнительный максимум, сдвинутый относительно основного приблизительно на 2 мс. Дополнительный максимум составлял, в среднем, около 0,45-0,5 от основного (отсчет от нулевого уровня), при этом степень выраженности второго максимума меняется в ходе явления и от события к событию.

Если рассматривать только один период колебаний, то амплитудная картина соответствует форме сигналов, рассмотренных в работах [2, 3], в которых второй пик в КНЧ сигналах обусловлен наличием волны, возбуждающейся токами в теле спрайта.

Зарегистрированный в эксперименте 21-23.08.08 в Верхоянье достаточно большой поток КНЧ атмосфериков, по-видимому, можно связать с высокой относительной долей положительных грозных разрядов, свойственных для этого региона. В некоторые интервалы частота положительных разрядов с КНЧ хвостами, которые в соответствии с результатами [1] обусловлены длительными токами после грозного разряда на землю и после которых часто регистрируется оптическое свечение (спрайты) на больших высотах, достигала не менее 30-40 разрядов в секунду.

Запаздывание КНЧ излучения относительно начала соответствующих ОНЧ атмосфериков лежит в пределах 0-7 мс с максимальными значениями в 1 и 3 мс. Нельзя не отметить достаточно большую вероятность (14 %) событий, в которых запаздывание отсутствовало (КНЧ сигнал начинался в ходе развития ОНЧ атмосферика или, даже одновременно с ним). Анализ не показал какой-либо зависимости величины запаздывания КНЧ сигнала от амплитуды атмосферика (рис. 2б). Следовательно, кроме разной скорости распространения сигналов в ОНЧ и КНЧ диапазонах, вероятно, существует еще какая-то причина, обуславливающая величину запаздывания КНЧ хвостов относительно ОНЧ атмосфериков.

При дальности до грозовой области в 400-600 км (рис. 1а) запаздывание в 4-6 мс трудно объяснить распространением (скорость ОНЧ атмосферика около 1 с, а КНЧ сигнала - около 0,9 с, где с - скорость света).

Неожиданным явилось обнаружение резонансных КНЧ колебаний, начало и окончание которых в большинстве случаев оказалось связанным с КНЧ цугами. Квазиполупериод колебаний (около 3,5 мс) приблизительно совпадает с первым квазиполупериодом цугов. Тесная связь длительных колебаний и КНЧ цугов (в том числе отмеченное совпадение значений квазиполупериодов колебаний и КНЧ атмосфериков), могло бы свидетельствовать о модулировании продолжительных разрядных токах, однако это трудно допустить. Если вторые максимумы в каждом периоде длительных колебаний связать с излучением КНЧ сигнала телом спрайта на высотах 50-90 км [3, 4], то это могло бы свидетельствовать о квазипериодическом характере и спрайтов, что также маловероятно.

Большая продолжительность колебаний в части событий (до 50 периодов), наличие гармоник в спектре, достаточно высокая добротность свидетельствуют о наблюдении какого-то резонанса. Известными типами резонансов (поперечный резонанс волновода "земля-ионосфера", "шумановские" резонансы, альфвеновский (ионосферный) резонатор) рассмотренное явление не объясняется.

Если обратиться к рис. 3б, то можно видеть, что в местах "ответвления" полос от цуга наблюдалась частичная дисперсия сигнала КНЧ атмосферика, что также свидетельствует о наличии некоторого резонанса, которому подвержен и КНЧ цуг. Для проверки таких спектральных особенностей были проведены дополнительные многокомпонентные измерения в Якутске 26.11.09 г. Один из примеров спектральной картины КНЧ сигналов приведен на рис. 3д. В этом событии явно выраженная дисперсия КНЧ сигнала наблюдалась в окрестности частоты 850 Гц. В общем же, дисперсионная область частот может лежать в диапазоне 300-900 Гц.

На некоторых спектрограммах обращает внимание, что у КНЧ атмосферика может быть диспергированной не только нижняя часть, аналогично диспергированной части ОНЧ атмосферика (сигнал в этом случае носит название "твик", на рис. 3д виден его след на частотах выше 1,6 кГц), но и верхняя часть (частоты 300-400 Гц). Принимая во внимание такую особенность, можно говорить, что в характеристиках КНЧ атмосфериков, а также в наличии длительных колебаний проявляется специфический резонанс. В дисперсионной области частот амплитуда сигнала падает (рис. 4б) и такое падение в спектре КНЧ атмосфериков часто регистрируется. Для объяснения такого ослабления амплитуды в [5] предложен механизм, основанный на интерференции волн, отражающихся от разных уровней нижней ионосферы. Однако, дисперсия сигнала (тем более, "двусторонняя") не может быть объяснена с помощью данного механизма.

Таким образом, представленные результаты свидетельствуют, что в спектральных характеристиках КНЧ сигналов, тесно связанных с грозовой активностью, возможно проявление некоторого резонанса, связать который с известными типами затруднительно. Для выяснения природы данного резонанса требуются дальнейшие исследования.

Работа поддержана грантами РФФИ 08-02-00348-а, 09-05-98540-р_восток_а и программами Президиума РАН №16, РНП 2.1.1/2555.

Литература

1. Reising S.C., Inan U.S., Bell T.F., and Lyons W.A. Evidence for continuing current in sprite-producing cloud-to-ground lightning // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23. No. 24. P. 3639-3642.
2. Cummer S.A., Inan U.S., Bell T.F., Barrington-Leigh C.P. ELF radiation produced by electrical currents in sprites // *Geophysical Research Letters*. 1998. Vol. 25. No. 8. P. 1281-1284.
3. Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F. and Reising S.C. Mechanism of ELF radiation from sprites // *Geophysical Research Letters*. 1998. Vol. 25. No. 18. P. 3493-3496.
4. Reising S.C., Inan U.S. and Bell T.F. ELF sferic energy as a proxy indicator for sprite occurrence // *Geophysical Research Letters*. 1999. Vol. 26. No. 7. P. 987-990.
5. Cummer S.A., Inan U.S. Ionospheric E region remote sensing with ELF radio atmospherics // *Radio Science*. 2000. Vol. 35. P. 1437.