

А. П. Николаенко*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 64085, Украина*E-mail: sasha@ire.kharkov.ua

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИРОВЫХ ГРОЗ ПО ЗАПИСЯМ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА (ЕЩЕ РАЗ О ТОЧЕЧНОМ ИСТОЧНИКЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА)

Применение записей глобального электромагнитного (шумановского) резонанса в исследованиях полости Земля–ионосфера вызывает постоянный интерес, поскольку они позволяют оценивать глобальные характеристики нижней ионосферы и динамику мировых гроз по наблюдениям одного или нескольких пунктов. Решение обратной задачи строится на разнообразных подходах. Мы используем простейшую модель точечного источника. Для описания вертикального профиля проводимости атмосферы использована «модель колена». Дистанция источник–приемник и ее вариации оценивались по первой пиковой частоте шумановского резонанса, наблюдаемого в горизонтальных компонентах магнитного поля, поскольку эта частота пропорциональна расстоянию до источника. Оценив дальность, можно получить сезонные изменения интенсивности источников, если использовать энергию наблюдаемых колебаний. Нами использована запись украинской антарктической станции «Академик Вернадский». Показано, что сезонный дрейф мировых гроз по широте оценивается величиной около 20° , а годовые изменения уровня мировой грозовой активности достигают 1,5 раз. Подтверждена неодинаковая продолжительность «электромагнитных» сезонов: летнее (крайнее северное) положение гроз охватывает до 120 сут, а зимнее – около 60 сут. Продолжительность весны, когда мировые грозы дрейфуют с юга на север, короче, чем продолжительность осени. Полученные оценки хорошо согласуются с данными независимых регистраций шумановского резонанса, с климатологическими данными и оптическими наблюдениями вспышек молний на околоземной орбите. Имеется альтернативное объяснение экспериментальных результатов, основанное на изменениях эффективной высоты нижней ионосферы на величину в несколько километров. Наиболее реалистичный механизм наблюдавшихся изменений должен включать как широтный дрейф мировых грозовых очагов, так и вариации высоты нижней ионосферы. Оба процесса обусловлены переменной солнечной активностью. Отмечается также, что наблюдавшиеся в Антарктиде межгодовые изменения интенсивности резонанса связаны с трендом температуры суши в тропическом поясе планеты, и приводится соответствующая оценка. Ил. 7. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: шумановский резонанс, точечный источник, расстояние источник–приемник, мировая грозовая активность.

В литературе по шумановскому резонансу неоднократно предпринимались попытки определить свойства мировой грозовой активности по записям шумановского резонанса. Соответствующие методики описаны в книгах [1, 2]. Напомним, что в работах [3, 4] была развита и использована методика, которая позволяет по размаху суточных вариаций первой пиковой частоты вертикальной электрической компоненты поля оценить эффективный размер зоны, занятой мировыми грозами.

Модель точечного источника широко используется при интерпретации резонансных данных; она описывает всплески сверхнизкочастотных (СНЧ) излучений – импульсные сигналы, приходящие от сверхмощных грозовых разрядов и в несколько раз превышающие регулярный резонансный сигнал.

Точечный источник широко применялся и при исследованиях динамики спектров непрерывных СНЧ-записей [3–7], однако такая модель признана излишне упрощенной. Для описания резонансного фона обычно используют более сложные модели: три мировых грозовых центра или модели, основанные на оптических наблюдениях вспышек молний с околоземной орбиты [1, 2].

Ниже мы продемонстрируем, что несмотря на простоту, точечный источник по-прежнему остается эффективным инструментом

для извлечения геофизической информации из непрерывных наблюдательных данных по шумановскому резонансу. В настоящей работе с разрешения авторов работы [8] мы воспользуемся записями пиковой частоты и интенсивности первого типа колебаний (мода). Энергетические спектры шумановского резонанса наблюдались в горизонтальном магнитном поле на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» ($65,25^\circ$ ю.ш., $64,25^\circ$ з.д.). Записи приведены на рис. 1, они охватывают промежуток времени с 2002 по 2012 г. [8]. Сезонные и межгодовые изменения интенсивности колебаний первого мода шумановского резонанса в процентах от максимального значения показаны на рис. 1, а (кривая 1). Кривая 2 иллюстрирует межгодовой тренд. Сезонные и межгодовые изменения первой пиковой частоты шумановского резонанса приведены на рис. 1, б: кривые 1 отвечают горизонтальной компоненте магнитного поля $H_{СЮ}$, кривые 2 – полю $H_{ЗВ}$. Штриховые линии отмечают межгодовые тренды пиковых частот. Видно, что пиковые частоты компоненты $H_{СЮ}$ оказываются систематически выше частот ортогональной компоненты $H_{ЗВ}$ и характеризуются большей амплитудой сезонных вариаций.

Изменения солнечной активности за весь период наблюдений иллюстрирует рис. 1, в. Кри-

вые 1 показывают так называемый индекс 10,7, кривые 2 изображают изменения чисел Вольфа за тот же период. Штриховые линии дают скользящее среднее этих изменений.

Из данных, показанных на рис. 1 видно, что наблюдавшиеся на антарктической станции межгодовые тренды в глобальном электромагнитном резонансе очень похожи на изменения солнечной активности.

При интерпретации наблюдений мы воспользуемся тем, что пиковая частота первого мода f_1 колебаний магнитного поля пропорциональна расстоянию до источника D [1, 2]. Благодаря большой длине волны записи шумановского резонанса несут информацию о полости Земля–ионосфера в целом. Ниже мы приведем модельные зависимости и с их помощью обработаем наблюдательные данные [8].

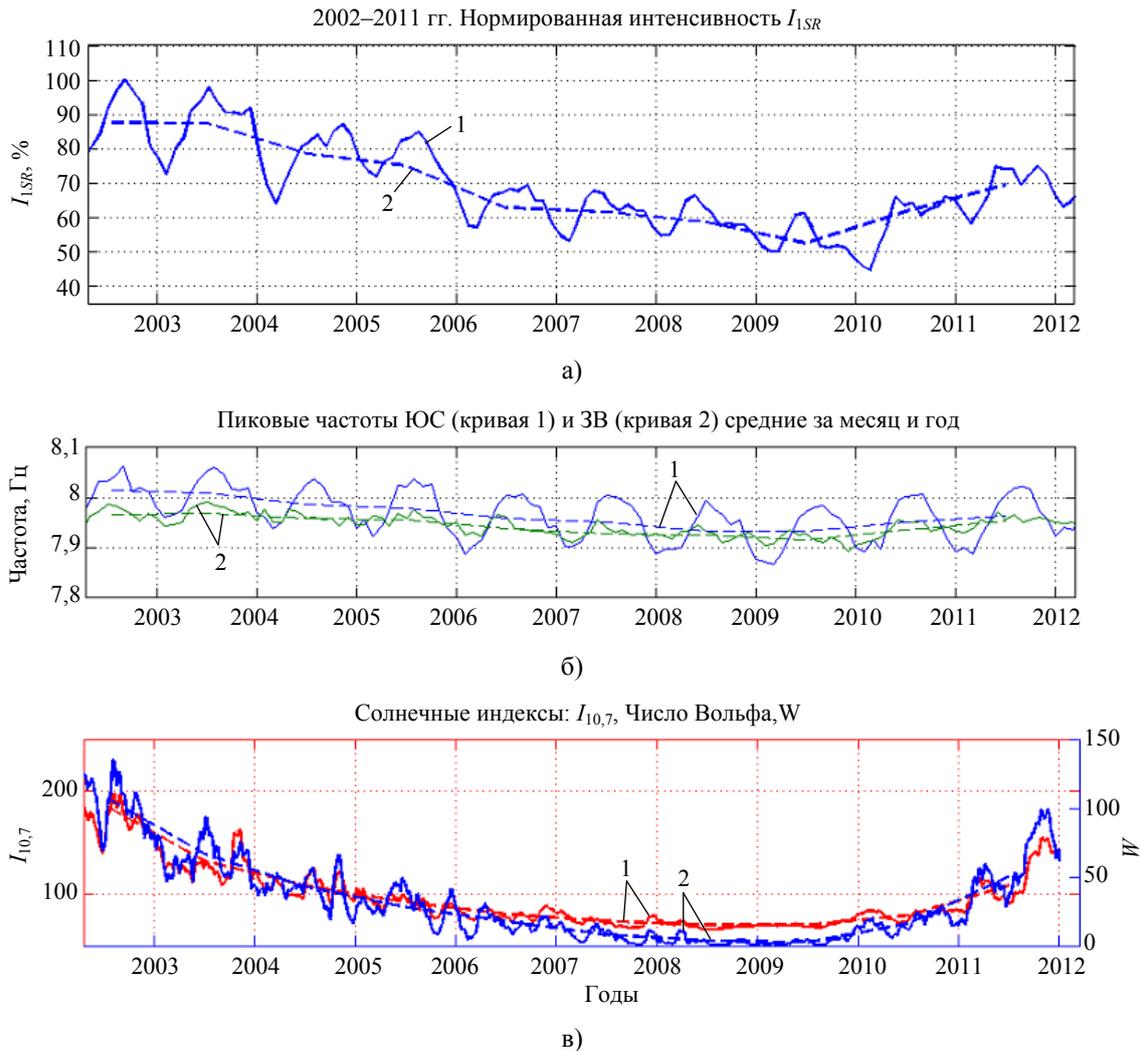


Рис. 1. Результаты многолетнего мониторинга параметров шумановского резонанса на украинской антарктической станции «Академик Вернадский»

1. Калибровочная кривая. В расчетах использовался точечный вертикальный электрический диполь, излучение которого имеет единичную амплитуду и не зависит от частоты. Резонатор Земля–ионосфера предполагается однородным по угловым координатам, а ионосфера образована изотропной плазмой. Высотный профиль проводимости нижней ионосферы описывается «моделью колена» [9].

Если рассчитать энергетические спектры горизонтального магнитного поля на разных дистанциях от точечного источника [1, 2], можно получить двумерный профиль интенсивности колебаний горизонтального магнитного поля над плоскостью частота–дистанция, показанный на рис. 2, а. Здесь по оси абсцисс отложена частота в герцах, а по оси ординат – расстояние источник–приемник в мегаметрах (1 Мм = 1 000 км). Интен-

сивность колебаний показана темной заливкой, а соответствующая шкала уровней приведена над графиком рис. 2, а.

Соответствующие дистанционные изменения первой пиковой частоты f_1 и максимума интенсивности первого мода колебаний I_1 показаны на рис. 2. По горизонтальной оси рис. 2, б отложено расстояние источник–наблюдатель в мегаметрах. Вдоль левой ординаты показаны значения первой пиковой частоты f_1 в Гц, а вдоль правой – интенсивность колебаний I_1 в процентах от максимального уровня. Гладкие кривые 1 и 2 на рис. 2, б показывают расчетные дистанционные вариации пиковой частоты и интенсивности первого мода колебаний. Линия со звездочками изображает кубическую аппроксимацию дистанционной зависимости частоты $f_1(D)$. Линия с ромбами показывает полином четвертой степени,

аппроксимирующий зависимость $I_1(D)$. Кривая 3 иллюстрирует зависимость вида $I_1(D) = \sin(\pi D/20)$.

Аппроксимирующие кривые 1 и 2 были получены по методу наименьших квадратов. Дистанционные изменения первой пиковой частоты (Гц) и относительной интенсивности колебаний (%) описывается следующими формулами:

$$f_1(D) = a_0 + a_1D + a_2D^2 + a_3D^3; \quad (1)$$

$$I_1(D) = b_0 + b_1D + b_2D^2 + b_3D^3 + b_4D^4. \quad (2)$$

Здесь D обозначает расстояние от наблюдателя до точечного источника в мегаметрах, $a_0 = 6,71336$, $a_1 = 0,181732$, $a_2 = -0,008612582$, $a_3 = 0,0001477123$, $b_0 = 115,548$, $b_1 = -30,40512$, $b_2 = 7,1121217$, $b_3 = -0,56481212$, $b_4 = 0,0133658$.

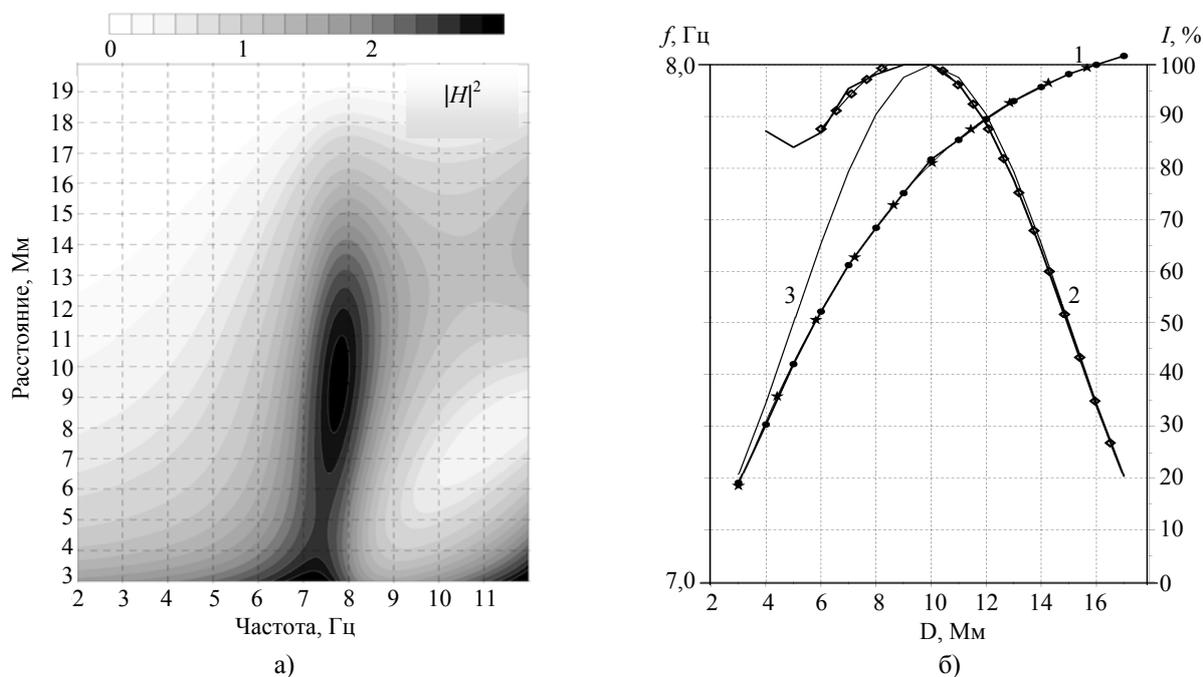


Рис. 2. Модельные характеристики первого мода шумановского резонанса: а) – профиль интенсивности колебаний магнитной компоненты поля над плоскостью частота–дистанция; б) – дистанционные зависимости первой пиковой частоты и интенсивности первого мода колебаний: 1 – пиковая частота; 2 – интенсивность; 3 – зависимость вида $I(D) = \sin(\pi D/20)$

2. Оценка расстояния источник–приемник. Используя формулу (1), легко соотнести значения первой пиковой частоты 7,7; 7,8; 7,12 и 8,0 Гц с дистанциями 8,3; 12,8; 12,2 и 16 Мм соответственно. Воспользовавшись этой связью, можно построить параллельно оси пиковых частот ось дистанций до источника. Это мы и сделали, адаптировав фрагмент антарктической записи [8], относящийся к 2006 г., см. рис. 3. Для этого пришлось оцифровать вручную график рис. 1. Полученной точности достаточно для демонстрации обсуждаемой методики.

На рис. 3 показаны сезонные изменения средней за месяц первой пиковой частоты двух ортогональных компонент горизонтального магнитного поля: $H_{ЗВ}$ – компонента запад–восток и $H_{СЮ}$ – компонента север–юг. По горизонтальной оси отложены месяцы 2006 г. По левой ординате отложены наблюдавшиеся значения пиковых частот в герцах. Кривая 1 соответствует компоненте поля север–юг, а кривая 2 – компоненте запад–восток. Вдоль правой ординаты отложены дистанции от наблюдателя до источника, соответствующие частотам, показанным на левой ординате.

Модель точечного источника позволяет интерпретировать данные наблюдений с помощью сезонного дрейфа источников. В частности, летом (в Северном полушарии) расстояние D от Антарктиды до мировых гроз увеличивается в обеих компонентах поля. Это естественно, поскольку летние грозы смещаются в Северное полушарие. Расстояние оценивается как 14 Мм для компоненты север-юг (чувствительной к африканским и азиатским грозам). Годовой дрейф этих источников достигает 2,4 Мм или чуть больше 20° , что согласуется с данными климатологии. Вариации в компоненте запад-восток (Американские грозы) выражены слабее и составляют около 1,5 Мм или 13° .

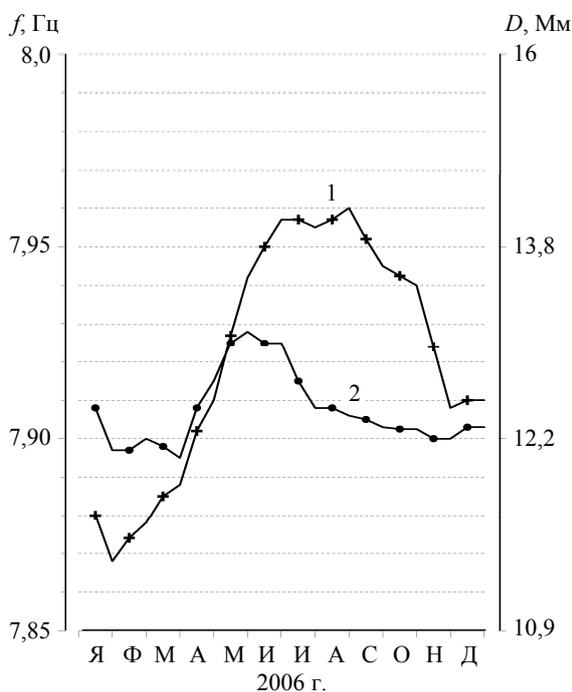


Рис. 3. Сезонные вариации пиковых частот первого мода шумановского резонанса, зарегистрированные в двух ортогональных компонентах горизонтального магнитного поля на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (адаптировано из работы [8]): 1 – компонента поля $H_{\text{СЮ}}$; 2 – компонента поля $H_{\text{ЗВ}}$

Таким образом, поведение наблюдаемых пиковых частот горизонтальной компоненты магнитного поля подтверждает перемещение мировых гроз в Северное полушарие летом (июнь – август). Мало того, из электромагнитных записей получаются разумные оценки величины годового дрейфа источников. Интерпретация антарктических данных согласуется с результатами аналогичной обработки наблюдений шумановского резонанса в Северном полушарии (см. например [10–13]), а также с климатологическими данными и оптическими орбитальными наблюдениями мировой грозовой активности [14]. Качествен-

ное и количественное согласие присутствует, несмотря на то что мы использовали простейшую модель точечного источника.

Мониторинг шумановского резонанса (см. рис. 1) обнаружил систематическое уменьшение первой пиковой частоты магнитных компонент поля в период с 2002 по 2010 г. [8]. Изменения частоты компоненты запад–восток были не столь значительными, как компоненты север–юг. Такие изменения можно связать с систематическим дрейфом мировой грозовой активности к югу. Кроме того, рис. 1 демонстрирует подобие изменений электромагнитных и солнечных данных. Мы можем развить этот вывод, утверждая, что мировые грозы в эпоху активного Солнца вероятнее всего смещаются в северные широты, а в годы спокойного Солнца – в южные.

Обратимся к дистанциям до источника. По пиковым частотам мы вычислим эффективные расстояния от наблюдателя до источника, отвечающие компонентам поля север–юг и запад–восток. Соответствующие сезонные вариации представлены на рис. 4.

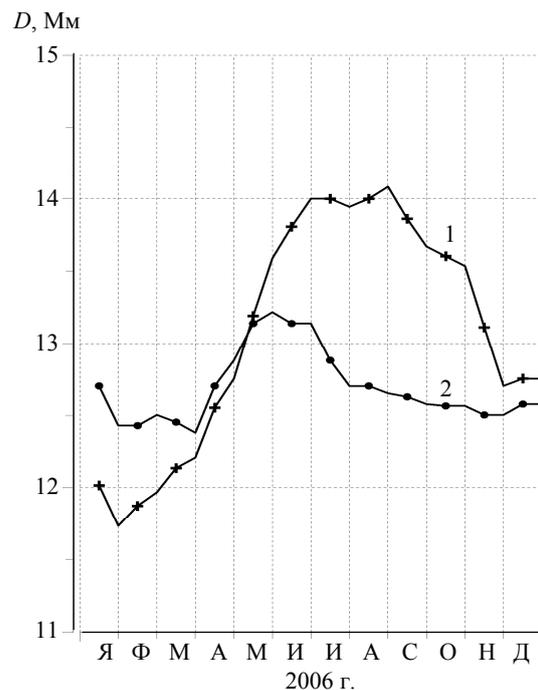


Рис. 4. Сезонные вариации эффективных расстояний до источника, найденные по годовым вариациям пиковых частот первого мода шумановского резонанса в двух ортогональных компонентах горизонтального магнитного поля: 1 – компонента поля $H_{\text{СЮ}}$; 2 – компонента поля $H_{\text{ЗВ}}$

Здесь по оси абсцисс отложены месяцы 2006 г., а вдоль ординаты показано эффективное расстояние от наблюдателя до источника в мегаметрах, найденное по пиковой частоте первого мода. Кривая 1 получена для компоненты север–юг, а кривая 2 – компоненты запад–восток. Ясно

виден сезонный дрейф мировых гроз к северу в летние месяцы Северного полушария. Следует отметить, что полученные оценки расстояния до источника всегда превосходят 10 Мм.

Такой результат удивляет, поскольку большие дистанции не всегда отвечают климатологическим данным. Возможны следующие причины отличий. Первая связана, вероятно, с разным способом определения пиковой частоты. Мы использовали абсциссу максимума резонансной кривой. Эти значения могут отличаться от полученных путем аппроксимации спектров, например, с помощью кривых Лоренца. Как именно были получены пиковые частоты в измерениях, нам неизвестно, но дистанции, превышающие 10 Мм, могли возникнуть, если эксперимент завышает значения частоты.

Вторая причина состоит в том, что использованная модель ионосферы может давать заниженные значения пиковой частоты. Справедливость такого допущения сомнительна, поскольку «модель колена» разрабатывалась для наиболее адекватного описания экспериментальных спектров. Правда, это делалось для записей Северного полушария. По нашему мнению, полученные дистанции заслуживают доверия, хотя дополнительное сопоставление наблюдений и модели, несомненно, было бы полезным.

3. Интенсивность мировых гроз. Отметим, что при дистанциях свыше 10 Мм ожидаемый сезонный ход интенсивности первого мода «выворачивается наизнанку». Действительно, как видно на рис. 2, а, интенсивность с ростом расстояния более 10 Мм убывает.

Пользуясь оценками расстояния от наблюдателя до гроз, показанными на рис. 4, легко построить ожидаемые вариации интенсивности, а затем сопоставить их с данными наблюдений. Ожидаемые или «восстановленные» вариации интенсивности показаны на рис. 5. Здесь по оси абсцисс отложены месяцы 2006 г. По ординате отложена интенсивность источника I , отн. ед. Кривая 1 получена из вариаций пиковой частоты компоненты поля север–юг, а кривая 2 – из компоненты запад–восток. Обе компоненты поля указывают на сезонное уменьшение ожидаемой интенсивности колебаний в летние месяцы Северного полушария.

С помощью графиков рис. 4 и 5 можно оценить сезонный дрейф гроз Африки, Азии, Америки. По ширине максимума и минимума дистанции до источника можно оценить продолжительность «электромагнитного лета» и «зимы» из данных шумановского резонанса. «Электромагнитное лето» длится с июня по сентябрь – это период, когда расстояние источник–приемник максимально, поскольку грозы в это время максимально смещены в северные широты. «Электро-

магнитная зима» продолжается с января по март. Остальные интервалы приходятся на «весну» и «осень». Эти данные находятся в хорошем согласии с результатами, опубликованными в работах [10–12] и полученными из вариаций первой пиковой частоты шумановского резонанса, наблюдаемой в вертикальном электрическом поле. Данные качественно согласуются и с оптически наблюдениями из космоса.

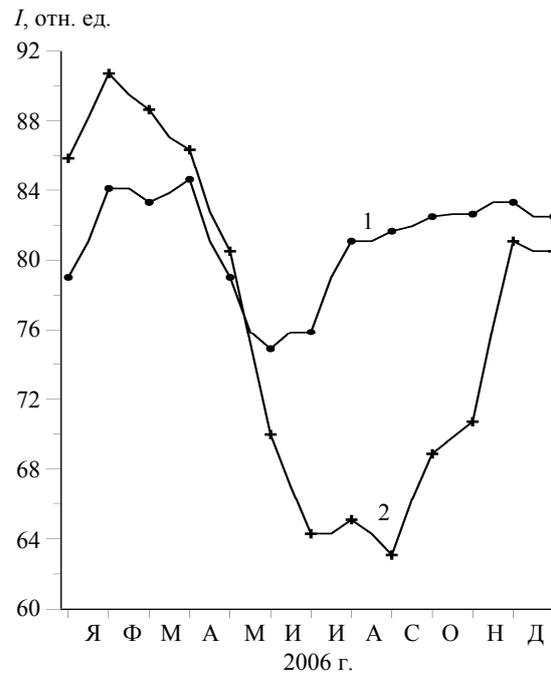


Рис. 5. Ожидаемые сезонные вариации эффективной интенсивности источника, найденные по годовым вариациям расстояний: 1 – компонента поля H_{cy} ; 2 – компонента поля H_{zv}

Из-за расстояния до источника превосходящего 10 Мм ожидаемая интенсивность резонансных колебаний выглядит парадоксально: она убывает у обеих компонент поля в летний период (июнь–август), тогда как наблюдаемая интенсивность колебаний в эти месяцы достигает максимума, а минимальна зимой. Впрочем, зависимости на рис. 5 следуют исключительно из вариаций дистанции, ведь интенсивность источника в расчетах предполагалась неизменной. Кажущееся противоречие снимается, если вспомнить о сезонных изменениях интенсивности мировых гроз. Текущий уровень грозовой активности легко оценить, разделив результаты наблюдений на ожидаемую интенсивность колебаний. Для этого мы применим среднее ожидаемых интенсивностей двух ортогональных магнитных компонент.

Другими словами, уровень мировых гроз возрастает летом настолько, чтобы превысить уменьшение интенсивности, вызванное смещением источников к северу. На рис. 6 собраны сезонные вариации интенсивности первого мода шумановского резонанса. Здесь по горизонтальной

оси отложены месяцы 2006 г., по вертикальной – интенсивность магнитной компоненты поля I , отн. ед.

Приведены три зависимости. Кривая 1 отвечает результатам наблюдений [8]. Кривая 2 показывает ожидаемые изменения интенсивности колебаний, если источник имеет постоянную амплитуду, а дистанция до него найдена по записям пиковых частот. Кривая 3 иллюстрирует результирующие сезонные вариации глобальной грозовой активности, найденные из наблюдений шумановского резонанса. Надписи обозначают «электромагнитные сезоны».

Как видно на рис. 6, обработка антарктических наблюдений дает максимум интенсивности мировых гроз, приходящийся на интервал с июня по август (лето), а минимум – на февраль-март (зима). Годовые вариации характеризуются изменениями примерно в 1,5 раза, что хорошо согласуется с независимыми оценками, полученными из обработки синхронных наблюдений в трех глобально разнесенных обсерваториях [13, 15].

Продолжительность «электромагнитного лета» по наблюдениям в Антарктиде составляет около 120 сут, тогда как «зима» длится около 60 сут. Весенний период оказывается примерно вдвое короче осеннего. Эти величины хорошо согласуются с длительностями сезонов, приведенными в работах [10–12].

4. Обсуждение. Приведенные результаты были получены при использовании простейшей модели источника, что является сильной идеализацией. Возможно, поэтому оценки дистанций наблюдатель–мировые грозы оказались непривычными. Данные наблюдений были получены с помощью ручной оцифровки опубликованных графиков, что также не улучшает точность. В этих условиях трудно ручаться за оценки абсолютных расстояний. Так, например, данные по компоненте поля $H_{ЗВ}$, характеризующие американские грозы, указывают на дистанции от 11,7 до 13,2 Мм. Это соответствует положению гроз на 40° и 54° с.ш., что, конечно, много. По данным климатологии минимальное расстояние до американских гроз, наблюдаемое зимой, примерно равно 7 Мм.

В то же время диапазон сезонных изменений дистанции, сами вариации, уровень грозовой активности находятся в хорошем согласии с литературными данными. Вероятнее всего, следует доверять полученным разностям расстояний, тогда как средние дистанции источник–приемник могут содержать некоторую погрешность. Минимальное значение пиковой частоты в зимние месяцы, отвечающее расстоянию 7 Мм, должно составлять около 7,6 Гц, тогда как записи показывают 7,87 и 7,9 Гц. Причины таких отклонений не ясны, здесь необходим дополнительный анализ.

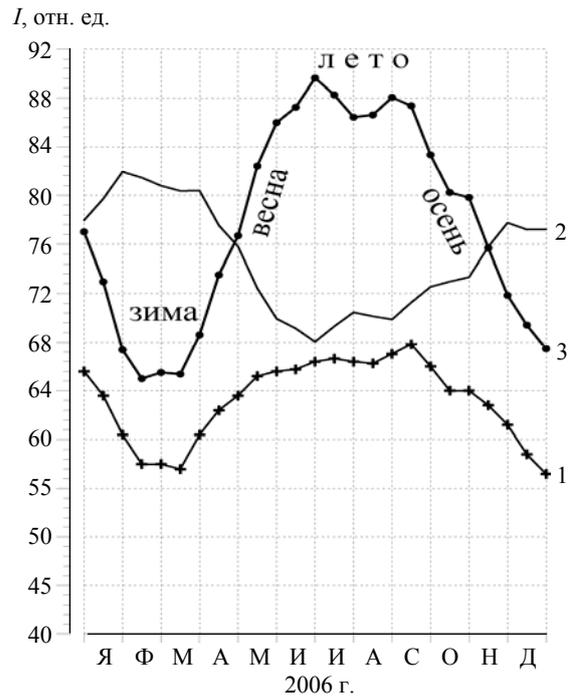


Рис. 6. Сезонные изменения полной интенсивности первого мода шумановского резонанса: 1 – данные наблюдений; 2 – вариации, ожидаемые из дистанционных изменений; 3 – интенсивность мировых гроз, найденная из экспериментальных данных

Необходимо отметить еще одну особенность. С 2003 по 2009 г. средние за год значения пиковых частот уменьшились от 8 до 7,94 Гц в компоненте $H_{СЮ}$ и от 7,97 до 7,92 Гц в компоненте $H_{ЗВ}$ [8]. Такие одновременные изменения могут означать систематическое перемещение мировых гроз к югу на расстояние в 2 Мм или на 18° по широте в течение 6 лет. Заметный межгодовой дрейф гроз приурочен к уменьшению солнечной активности. В литературе должны существовать подтверждения такого значительного дрейфа, например в данных метеорологических наблюдений. К сожалению, спутник *OTD*, наблюдавший оптические вспышки молний с околоземной орбиты, работал до 2005 г., поэтому космические наблюдения использовать невозможно.

Существует альтернативное объяснение наблюдавшегося снижения пиковой частоты. Оно предполагает уменьшение эффективной высоты ионосферы [1, 2]. Модуляции высоты ионосферы возникают при изменениях солнечного ветра, связанных с вариациями солнечной активности. Плазма нижней ионосферы поддерживается за счет так называемого галактического ионизирующего излучения. Когда активность Солнца возрастает, увеличивается скорость солнечного ветра, который «выметает» галактические лучи из Солнечной системы. Поэтому при активном Солнце нижняя ионосфера имеет большую высоту, чем в годы спокойного Солнца.

Если воспользоваться данными работ [1, 2] или публикации [16], то окажется, что снижение пиковой частоты первого мода шумановского резонанса на 0,05 Гц можно связать с уменьшением высоты нижней ионосферы на 1–2 км. Сейчас мы не будем углубляться в детали такой интерпретации. Ей, по-видимому, придется посвятить специальную публикацию, поскольку оценка снижения эффективной высоты нижней ионосферы из-за уменьшения солнечной активности заслуживает пристального внимания. Здесь же мы должны отметить фундаментальное отличие изменений частоты, вызванных вариациями высоты ионосферы, от модуляции, связанной с дрейфом источников поля. Перемещение мировых гроз приводит к взаимно противоположным изменениям первой пиковой частоты, наблюдаемой в Северном и Южном полушариях. Что же касается модификации ионосферы, то она одинаковым образом изменяет резонансные частоты на всем земном шаре одновременно [17]. Кроме того, изменения пиковых частот, связанные с ионосферой, наблюдаются на всех модах и примерно равны по величине. Эти особенности позволяют в принципе определить конкретную причину наблюдавшихся вариаций.

Межгодовой тренд интенсивности первого мода шумановского резонанса, наблюдавшийся в Антарктиде, также очень похож на изменения солнечной активности [8]. Очевидно, что изменения солнечного излучения могут вызвать вариации поверхностной температуры планеты, прежде всего температуры суши, где концентрируются мировые грозы. Связь между изменениями температуры поверхности и интегральной интенсивностью шумановского резонанса анализировалась в работах [18, 19]. Здесь была продемонстрирована высокая корреляция между периодическими сезонными изменениями резонансной интенсивности (пункт наблюдения располагался в Японии) и температурой суши в среднеширотном поясе. Что же касается межгодового тренда энергии колебаний, то он коррелирован с изменениями температуры суши в тропиках ($\pm 20^\circ$ по широте относительно экватора). Эта связь близка к линейной, если интенсивность выражена в децибелах, причем коэффициент взаимной корреляции, найденный по реализации длиной в 43 месяца непрерывных наблюдений, составил 0,68 (рис. 7).

Оценим ожидаемый температурный эффект. Если принять, что связь температуры суши в тропическом поясе Земли с интенсивностью резонансных колебаний сохраняется безотносительно к пункту наблюдения и числу наблюдаемых модов, то мы можем непосредственно воспользоваться результатами работ [17, 18].

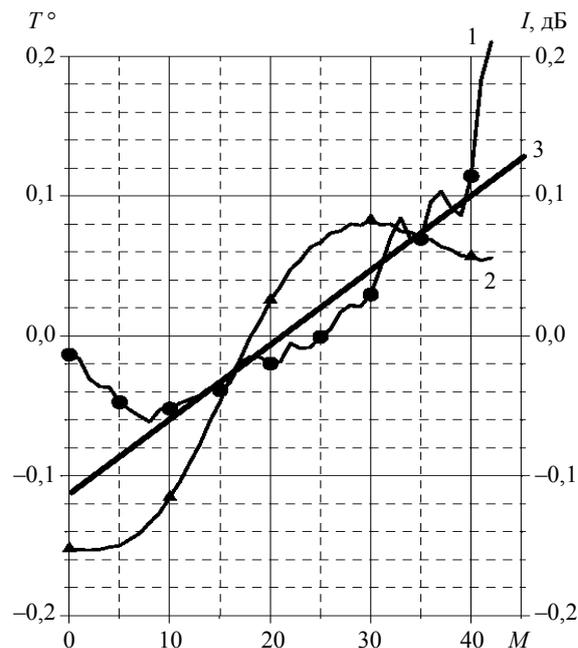


Рис. 7. Межгодовые изменения: 1 – температурная аномалия поверхности суши в тропическом поясе Земли ($\pm 20^\circ$ относительно экватора); 2 – изменения интенсивности шумановского резонанса; 3 – аппроксимирующая зависимость (3), найденная по методу регрессии

Эти данные представлены на графиках рис. 7. Кривая 1 показывает отклонения температуры ΔT , $^\circ\text{C}$ от многолетних средних значений (температурную аномалию) в тропическом поясе за 43 месяца непрерывной регистрации. Соответствующие межгодовые изменения кумулятивной интенсивности электромагнитных колебаний ΔI , дБ показаны кривой 2. Регрессионный анализ парных данных ΔT и ΔI позволил получить следующее соотношение:

$$\Delta T = 0,0177 + 0,4845 \cdot \Delta I. \quad (3)$$

Интенсивность резонансных колебаний первого мода с 2003 по 2009 г. уменьшилась с 88 до 53 условных единиц или на 2,2 дБ [8]. Тогда в соответствии с соотношением (3) уменьшение средней годовой температуры суши в тропическом поясе Земли на этом временном интервале составит 1,1 $^\circ\text{C}$. Такие межгодовые изменения вполне наблюдаемы, поскольку среднее значение температуры тропиков составляет около 26 $^\circ\text{C}$, а его регулярные годовые изменения около $\pm 2^\circ\text{C}$.

Подчеркнем, что указанный тренд не имеет отношения к глобальному потеплению или похолоданию. Это «регулярное» изменение температуры тропиков, вызванное 11-летним циклом солнечной активности, не было описано в литературе. В дальнейшем желательно выполнить более аккуратное сравнение резонансных и температурных данных длительностью в солнечный цикл,

причем необходимо использовать данные о шумановском резонансе, записанные в обоих полушариях Земли.

Надеемся, что в будущем удастся провести подобную обработку и подтвердить, что глобальный электромагнитный резонанс действительно может служить планетарным термометром.

Выводы. Таким образом, модель точечного источника еще раз подтвердила свою работоспособность. Получены разумные оценки временных изменений эффективной дистанции до источников по записям первого мода шумановского резонанса. Сезонный широтный дрейф мировых гроз оценивается величиной до 20°.

Применение этой же модели к записям интенсивности колебаний первого мода позволило оценить годовые изменения уровня мировой грозовой активности величиной в 1,5 раза. Эта оценка хорошо согласуется с данными независимых измерений и наблюдений.

Подтверждена неодинаковая продолжительность «электромагнитных» сезонов, отражающих перемещение гроз по Земле. Так, например, летнее (крайнее северное) положение гроз наблюдается в июне–сентябре, а зимнее – с февраля по март.

Экспериментальные данные допускают иное объяснение: вариации обусловлены не широтным дрейфом гроз, а изменениями эффективной высоты ионосферы; однако эта интерпретация требует отдельного более подробного рассмотрения.

Наиболее вероятный механизм сезонных и межгодовых изменений состоит в комбинации широтного дрейфа мировых гроз и вариаций высоты нижней ионосферы. Оба эффекта обусловлены влиянием Солнца.

Используя связь межгодового тренда кумулятивной интенсивности шумановского резонанса и температуры суши, полученную по регистрациям в Северном полушарии, удалось показать, что антарктические наблюдения могут свидетельствовать об уменьшении температуры суши в тропическом поясе на 1 °С в период минимальной солнечной активности.

Библиографический список

1. *Nickolaenko A. P.* Resonances in the Earth-ionosphere cavity / A. P. Nickolaenko and M. Hayakawa. – Dordrecht-Boston-L.: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 380 p.
2. *Nickolaenko A. P.* Schumann resonance for tyros (Essentials of global electromagnetic resonance in the Earth-ionosphere cavity) / A. P. Nickolaenko and M. Hayakawa. – Tokyo-Heidelberg-N. Y.-Dordrecht-L., 2014. – Springer Geophys. Ser. XI. – 348 p.
3. *Nickolaenko A. P.* Study of the annual changes of global lightning distribution and frequency variations of the first Schumann resonance mode / A. P. Nickolaenko and

- L. M. Rabinowicz // J. Atmos. Terr. Phys. – 1995. – 57, N 11. – P. 1345–1348.
4. *Parameters of global thunderstorm activity deduced from the long-term Schumann resonance records* / A. P. Nickolaenko, G. Satori, V. Ziegler et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 1998. – 60, N 3. – P. 387–399.
5. *О возможности выбора модели мировой грозовой активности по наблюдению шумановских резонансов* / В. Н. Бормотов, Б. В. Лазебный, А. П. Николаенко, В. Ф. Шульга // Геомагнетизм и аэрономия. – 1972. – 12, № 1. – P. 135–136.
6. *Результаты сравнения экспериментальных наблюдений шумановского резонанса с моделью одного мирового грозового центра* / Е. И. Яцевич, А. П. Николаенко, Л. М. Рабинович и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2005. – 48, № 4. – P. 283–298.
7. *Pechony O.* Relative importance of the day-night asymmetry in Schumann resonance amplitude records / O. Pechony, C. Price, A. P. Nickolaenko // Radio Sci. – 2007. – 42, iss. 2. – RS2S06 (12 p.).
8. *Диагностика глобальной грозовой активности на основе многолетнего мониторинга сигналов шумановского резонанса на УАС* / А. В. Колосков, Н. А. Бару, О. В. Буданов и др. // Укр. Антарктический журн. – 2013. – № 12. – С. 170–176.
9. *Mushtak V. C.* ELF propagation parameters for uniform models of the Earth-ionosphere waveguide / V. C. Mushtak, E. R. Williams // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2002. – 64, iss. 18. – P. 1989–2001.
10. *Satori G.* On the dynamics of the North–South seasonal migration of global lightning // G. Satori // Proc. 12th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity. Global Lightning and Climate. – Versailles, 2003. – P. 1–4.
11. *Satori G.* On the dynamics of the North – South seasonal migration of global lightning / G. Satori, E. R. Williams, D. J. Boccippio // AGU Fall Meeting. – San Francisco, 2003. – P. AE32A-0166.
12. *Satori G.* Schumann resonance signatures of global lightning activity / G. Satori, V. Mushtak, E. Williams // Lightning: Principles, Instruments and. – Dordrecht: Springer, 2012. – P. 347–386.
13. *Recent studies of Schumann resonance and ELF transients* / M. Hayakawa, A. V. Shvets, Y. Hobara, A. P. Nickolaenko // Lightning: Properties, Formation and Types. – N. Y.-L.-P.: Nova Science Publishers, Inc., 2010. – Chap. 3. – P. 1–33.
14. *Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector* / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio et al. // J. Geophys. Res. – 2003. – 108, iss. D1. – P. ACL 4-1–ACL 4-15.
15. *Nickolaenko A. P.* Universal and local time variations deduced from simultaneous Schumann resonance records at three widely separated observatories / A. P. Nickolaenko, E. I. Yatsevich, A. V. Shvets et al. // Radio Sci. – 2011. – 46, iss. 5. – RS5003 (12 p.).
16. *Николаенко А. П.* Спектры и волновые формы СНЧ-импульсов в резонаторе Земля–ионосфера при малых потерях / А. П. Николаенко // Радиофизика и электрон. – 2014. – 5(19), № 2. – С. 22–32.
17. *The effect of a gamma ray flare on Schumann resonances* / A. P. Nickolaenko, I. G. Kudintseva, O. Pechony et al. // Ann. Geophys. – 2012. – 30, N 9. – P. 1321–1329.
18. *Evidence on a link between the intensity of Schumann resonance and global surface temperature* / M. Sekiguchi, M. Hayakawa, A. P. Nickolaenko, Y. Hobara // Ann. Geophys. – 2006. – 24, N 7. – P. 1809–1817.
19. *Связь интенсивности шумановского резонанса со средней глобальной температурой суши* / М. Секигучи, М. Хайкава, Я. Хобара и др. // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2004. – 9, № 2. – С. 383–391.

Рукопись поступила 14.01.2014.

A. P. Nickolaenko

DEDUCING THE WORLD THUNDERSTORM
ACTIVITY FROM
THE SCHUMANN RESONANCE RECORD
(ONCE AGAIN ABOUT POINT SOURCE MODEL
IN SCHUMANN RESONANCE STUDIES)

Application of the records of global electromagnetic (Schumann) resonance in the Earth–ionosphere cavity attracts the permanent attention, as it allows the assessment of the global characteristics of the lower ionosphere and the dynamics of planetary thunderstorms by using a single or a small number of observatories. Solutions of the inverse problem are based on different approaches. We use a simple model of a point source in the present study. The vertical profile of the atmosphere conductivity is described by the “knee” model. The source–observer distance and its variations were evaluated from the first Schumann resonance peak frequency observed in the horizontal components of the magnetic field, since this frequency is proportional to the distance from the source. After estimating the source range, one can obtain the seasonal changes in their intensity by using the observed energy of oscillations. We process a fragment of the records at the Ukrainian Antarctic station “Academician Vernadsky”. We show that the seasonal latitudinal drift of global thunderstorms is estimated by 20°, and annual changes in the level of global lightning activity reach the factor of 1.5. The unequal duration of the “electromagnetic seasons” is confirmed: the summer (the farthest northern position of global thunderstorms) lasts for 120 days, while the winter is about 60 days. The duration of spring is shorter than that of the fall. The estimates obtained reasonably agree with the Schumann resonance data, with the climatology data, and optical observations of lightning flashes from the Earth’s orbit. We also note that experimental results have an alternative interpretation, which implies the changes in the effective height of the lower ionosphere by a few kilometers. The most realistic mechanism of the observed changes must comprise both the latitudinal drift of global thunderstorms and the variations of the height of the ionosphere. Both the processes are caused by variations in the solar activity. It is also noted that the inter-annual trends in the resonance intensity might be linked to the trends in the surface temperature of the planet. Relevant estimate is given.

Key words: Schumann resonance, point source model, source–observer distance, the global thunderstorm activity.

О. П. Ніколаєнко

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СВІТОВИХ ГРОЗ
ІЗ ЗАПИСІВ ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ
(ЩЕ РАЗ ПРО ТОЧКОВЕ ДЖЕРЕЛО
В ДОСЛІДЖЕННЯХ
ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ)

Застосування записів глобального електромагнітного (шуманівського) резонансу в дослідженнях порожнини Земля–іоносфера постійно викликає інтерес, оскільки вони дозволяють оцінювати глобальні характеристики нижньої іоносфери та динаміку світових гроз за спостереженнями одного або декількох пунктів. Розв’язання зворотної задачі базується на різноманітних підходах. Ми використовуємо найпростішу модель точкового джерела. Для опису вертикального профілю провідності атмосфери використано «модель коліна». Дистанція джерело–приймач та її варіації оцінювалися за першою піковою частотою шуманівського резонансу, що спостерігався в горизонтальних компонентах магнітного поля, оскільки ця частота є пропорційною відстані до джерела. Оцінивши дистанцію, можна отримати сезонні зміни інтенсивності джерел, якщо використати енергію спостережуваних коливань. Нами використано запис української антарктичної станції «Академік Вернадський». Показано, що сезонний дрейф світових гроз вздовж широти оцінюється величиною близько 20°, а річні зміни рівня світової грозової активності досягають 1,5 рази. Підтверджено неоднакову тривалість «електромагнітних» сезонів: літнє розташування (крайне північне) гроз сягає до 120 діб, а зимове – близько 60 діб. Тривалість весни, коли світові грози дрейфують з півдня на північ, коротші за тривалість осені. Отримані оцінки добре узгоджуються з даними незалежних реєстрацій шуманівського резонансу, з кліматологічними даними й оптичними спостереженнями спалахів блискавок на навколосемній орбіті. Існує альтернативне пояснення експериментальних результатів, що базується на змінах ефективної висоти нижньої іоносфери на величину в кілька кілометрів. Найбільш реалістичний механізм змін, що спостерігається, має містити як широтний дрейф світових гроз, так і варіації висоти нижньої іоносфери. Обидва процеси зумовлені змінною сонячною активністю. Відзначено також, що міжрічні зміни інтенсивності резонансу, які спостерігалися в Антарктиді, пов’язані з трендом температури суші в тропічному поясі планети, і наведено відповідну оцінку.

Ключові слова: шуманівський резонанс, точкове джерело, відстань джерело–приймач, світова грозова активність.