

Е. И. Яцевич¹, А. П. Николаенко¹, А. В. Швец¹, А. В. Колосков², О. В. Буданов²

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: yal75@mail.ru

²Радиоастрономический институт НАН Украины

4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина

СРАВНЕНИЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ АНТАРКТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТОВ НА ОСНОВЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ *OTD*-МОДЕЛИ

Организация непрерывных наблюдений шумановского резонанса (ШР) открывает широкие возможности постоянного мониторинга нижней ионосферы и мировых гроз. Методы мониторинга грозовой активности с использованием ШР детально разработаны только для точечных источников. Однако существующие модели слишком упрощенно описывают источники излучения. В связи с этим большое значение приобретает разработка полуэмпирических моделей источников, в которых распределение интенсивности задается на основе данных спутниковых наблюдений мировых гроз. В работе проводится сравнение долгосрочных экспериментальных данных ШР, накопленных на украинской антарктической станции «Академик Вернадский», с результатами расчетов ШР в двухкомпонентной *OTD*-модели, которое показало, что модель, несмотря на подробное задание распределения грозовых источников по данным оптических наблюдений из космоса, согласуется с экспериментом лишь частично. На суточном временном масштабе двухкомпонентная *OTD*-модель достаточно хорошо отображает положение основного максимума мировых гроз и их интенсивность, однако положение индивидуальных источников описывается недостаточно точно для адекватного представления суточных вариаций пиковых частот. Модель описывает годовые и межгодовые вариации пиковой частоты магнитной компоненты H_z . Показано, что межгодовые вариации пиковых частот можно объяснить изменением высоты ионосферы и дрейфом источников от года к году, а долговременный дрейф пиковой частоты связан с модификацией ионосферы в течение солнечного цикла. Ил. 11. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: шумановский резонанс, грозовая активность, модель источника мировых гроз, пиковая частота.

Шумановский резонанс (ШР) возбуждается разрядами молний в сферической полости, сформированной земной поверхностью и ионосферой, и наблюдается в энергетических спектрах естественного электромагнитного излучения в виде отдельных пиков в сверхнизкочастотном (СНЧ) диапазоне около 8, 14, 20, 26, 32... Гц [1]. Современные исследования шумановского резонанса направлены, главным образом, на изучение нижней ионосферы и естественного источника возбуждения ШР – грозовой активности.

Сигнал в диапазоне СНЧ определяется свойствами глобального резонатора, образованного поверхностью Земли и нижними слоями ионосферы. Поэтому использование ШР для мониторинга околоземного пространства вплоть до высот около 100 км является оправданным, особенно при исследовании эффектов, вызываемых изменениями космической погоды [2–4].

Методы мониторинга грозовой активности с использованием явления ШР разработаны достаточно детально только для точечных источников, т. е. для анализа СНЧ-всплесков, которые генерируются сверхмощными разрядами. Ситуация значительно усложняется, когда анализируется фоновый сигнал ШР, излучаемый совокупностью случайных взаимно независимых разрядов молний, распределенных по поверхности Земли на площадях, сопоставимых с размерами континентов. Анализ в этом случае обычно выполняется на основе моделей, где источник задается суперпозицией точечных грозовых разрядов,

интенсивность которых соответствует пространственному распределению грозовой активности по земному шару. Однако существующие модели слишком упрощенно описывают источники излучения. Поэтому важное значение приобретает разработка полуэмпирических моделей источников, в которых распределение мировых гроз задается на основе данных спутниковых наблюдений. На сегодняшний день одними из лучших данных непосредственных наблюдений грозовой активности признаны данные, полученные при помощи оптического импульсного детектора (*Optical Transient Detector – OTD*) [5].

В работе [6] было выполнено сравнение модели одного источника и усредненной *OTD*-модели, в которой был сделан вывод о необходимости разработки более совершенной модели.

В настоящей работе используется модифицированная двухкомпонентная *OTD*-модель источников, основанная на данных *OTD* с учетом равномерно распределенной по поверхности Земли фоновой грозовой активности, которая формирует «пьедестал» в суточных зависимостях интенсивности сигнала ШР.

Результаты расчетов ШР в двухкомпонентной *OTD*-модели сравниваются с экспериментальными данными долгосрочных (2002–2012 гг.) наблюдений сигналов ШР, накопленных на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» [7]. Рассматриваются суточные, годовые и межгодовые вариации пиковой частоты и интенсивности первого мода в двух горизон-

тальных ортогональных составляющих магнитного поля.

Использование долгосрочных данных позволит проанализировать причины возникновения межгодового тренда параметров ШР, который может быть связан как с меридиональным смещением источников, так и с модификацией глобальных параметров нижней ионосферы.

1. Экспериментальные данные. В работе проанализированы данные мониторинга сигналов ШР, выполненных на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (65.25°ю.ш., 64.25°з.д.) в 2002–2012 гг. Описание приемно-анализирующего комплекса приведено в работах [7, 8]. Измеряются две ортогональные составляющие горизонтального магнитного поля – H_x и H_y . Компонента H_x ориентирована вдоль направления «запад–восток». Ее интенсивность определяется преимущественно американским и азиатским грозовыми центрами. Ось антенны H_y ориентирована вдоль линии «север–юг». Основной вклад в интенсивность этой составляющей вносят грозы, происходящие в африканском грозовом центре.

В ходе стандартной обработки данных измерений рассчитываются спектральные и поляризаационные характеристики для первых трех модов ШР. В настоящей работе будут исследоваться вариации интенсивностей и пиковых частот первого резонансного мода компонент H_x и H_y , усредненные для каждого месяца из анализируемого интервала наблюдений.

2. Двухкомпонентная OTD-модель источников ШР. Для расчетов электромагнитного поля в области ШР мы используем двухкомпонентную OTD-модель источников ШР. Она является модификацией моделей, использованных в работах [9, 10].

Получение OTD-данных и их подробный анализ детально описаны в [5]. Оптический импульсный детектор был расположен на борту спутника *MicroLab-1*. Орбита спутника наклонена на 70° по отношению к экватору. Период обращения спутника вокруг Земли составлял 100 минут, его угол обзора – 100°, что эквивалентно площади ~ 1 300×1 300 км² на поверхности Земли. В течение пяти лет (с апреля 1995 г. по март 2000 г.) оптический импульсный детектор регистрировал вспышки молний в течение суток с эффективностью, изменяющейся от 40 до 65 %, в зависимости от внешних условий.

Ограничения по времени и площади обзора космического аппарата приводят к недостаточной статистике наблюдений, поэтому, для получения достоверных данных о пространственном распределении мировых гроз по космическим наблюдениям требуется интервал времени в несколько лет. Кроме того, при использовании OTD-модели в расчетах ШР, для учета суточной и

сезонной динамики мировой грозовой активности, к этим данным необходимо применять специальные методы обработки [11, 12]. В настоящей работе, для того чтобы обеспечить представление суточных и сезонных вариаций мировой грозовой активности, была использована *DMM (Diurnal Monthly Mean)* – техника обработки исходных OTD-данных, предложенная О. Печеной [11]. Этот способ обработки позволяет по первичным OTD-регистрациям получить наиболее естественное пространственно-временное распределение грозовой активности без использования дополнительных предположений о характере суточных вариаций мировых гроз. При *DMM*-обработке исходные OTD-данные, накопленные в течение пяти лет, были пересчитаны в средние за месяц суточные данные с почасовым разрешением. Данные для каждого часа были усреднены для всех дней данного месяца за пять лет. Таким образом, для каждого месяца были получены 24 карты распределения молний (одна карта для каждого часа), каждая из которых усредняет информацию примерно из 150 распределений. Карты разбиты на ячейки 3°×3°.

OTD-данные хорошо согласуются с метеорологическими наблюдениями. Так, максимальная грозовая активность наблюдается в трех мировых грозовых центрах, расположенных в экваториальных областях Азии, Африки и Америки. В данных отчетливо прослеживается суточное перемещение области максимальной активности с востока на запад и сезонный дрейф гроз: летом грозы сосредоточены, в основном, в северном полушарии, зимой – в южном.

Именно такая согласованность OTD-данных с существующими представлениями о распределении и перемещении мировых гроз позволила исследователям использовать их для моделирования ШР. Однако детальный анализ и сравнение с реальными данными по ШР выявили ряд недостатков OTD-модели [9]. Так, в упоминаемой работе были проведены расчеты электромагнитного поля в области частот ШР, создаваемого грозовыми разрядами, распределение которых задается OTD-картами. Модельные данные были сопоставлены с экспериментальными записями ШР, полученными в обсерватории пос. Лехта (Карелия) в период с августа 1999 г. по март 2005 г. Сравнение экспериментальных и расчетных суточных вариаций интенсивностей трех компонент электромагнитного поля (двух горизонтальных магнитных и вертикальной электрической) показало, что суточные вариации согласуются качественно (вариации имеют сходный с OTD-моделью характер), однако относительные изменения модельных интенсивностей существенно превышают наблюдаемые. За сутки модельные зависимости изменяются примерно в 8–10 раз, в то вре-

мя как экспериментальные – не более чем в 3 раза. В указанной работе было показано, что *OTD*-модель достаточно хорошо описывает суточный и сезонный дрейф максимума мировой грозовой активности, но не описывает грозы, составляющие фон.

Для того чтобы частично избавиться от отмеченного недостатка *OTD*-модели, в настоящей работе будем использовать двухкомпонентную *OTD*-модель. Такая модель получается из *OTD DMM*-данных добавлением фоновой составляющей (или «пьедестала» [10]). Предполагается, что фоновое распределение источника постоянно для каждого месяца и соответствует среднесуточному распределению, полученному при усреднении 24-х карт для каждого часа. Таким образом, источник грозовой активности задается суперпозицией фонового распределения грозовых центров и изменяющихся каждый час исходных *OTD DMM*-карт.

Высотный профиль проводимости ионосферы описывается моделью «колена» [6, 13]. Эта модель характеризуется двумя интервалами с экспоненциальным нарастанием проводимости в нижней ионосфере для разных высотных масшта-

бов. Единственный параметр, характеризующий изменение высоты ионосферы, который нас будет здесь интересовать – это высота колена K , на которой стыкуются две экспоненты в высотном профиле проводимости.

3. Сравнительный анализ результатов.

Сравним экспериментальные данные с результатами расчетов ШР в рамках описанной модели.

3.1. *Суточные вариации.* Суточные вариации параметров ШР связаны, главным образом, с суточным перераспределением активности между мировыми грозовыми центрами. В некоторых работах, в частности в [14], отмечается также связь с суточными изменениями условий распространения в глобальном резонаторе.

Сопоставляя результаты эксперимента и расчетные данные, можно уточнить информацию о перемещении и расположении мировых гроз, размерах грозовых центров, а также о динамике глобальной интенсивности мировой грозовой активности.

На рис. 1 экспериментальные данные, полученные в январе 2006 г., сопоставляются с результатами расчетов. При расчетах модельных кривых использовалась высота колена $K = 58$ км.

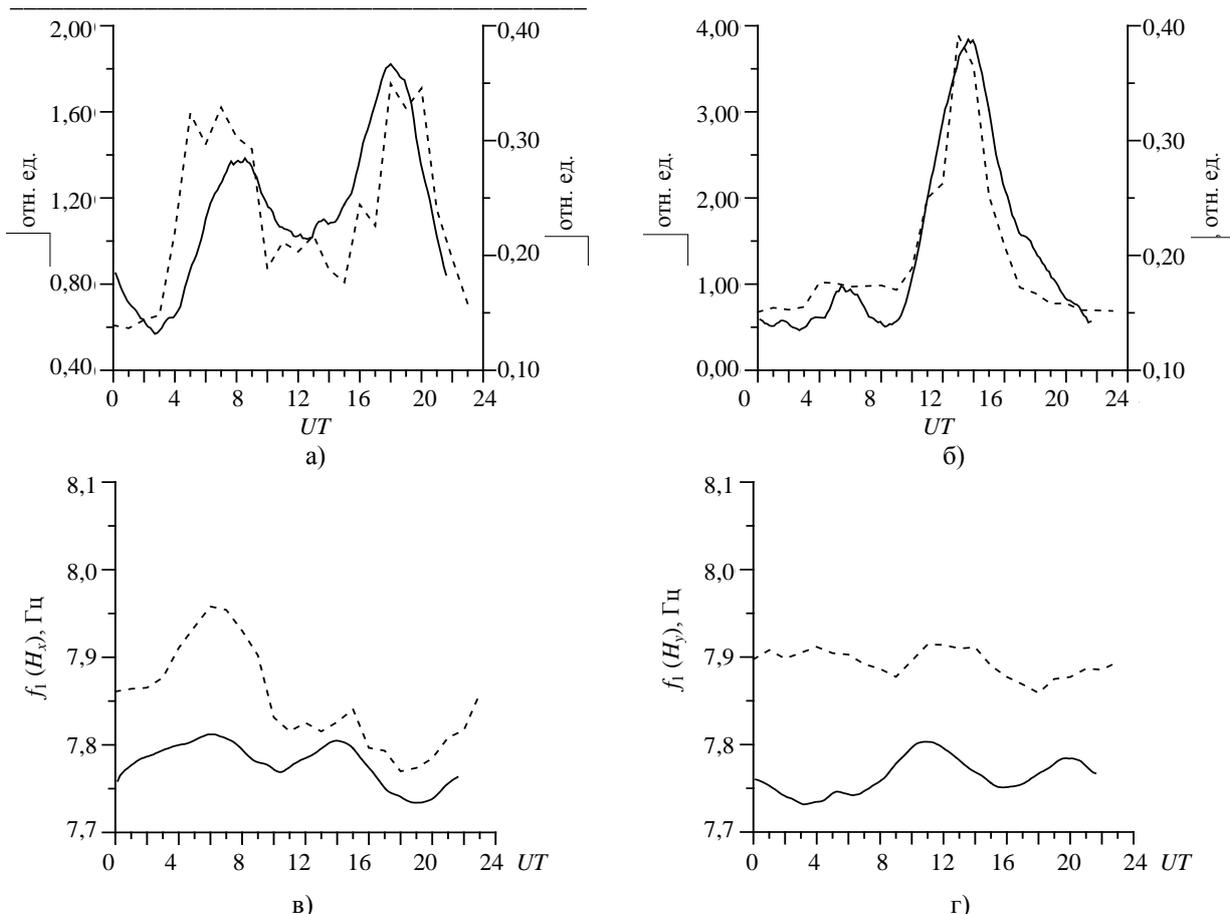


Рис. 1. Экспериментальные данные за январь 2006 г. (сплошная кривая) и расчетные данные (пунктирная кривая): а) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_x ; б) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_y ; в) вариации первой пиковой частоты H_x ; г) вариации первой пиковой частоты H_y .

На рис. 1, а построены экспериментальные и модельные суточные вариации интенсивности первого мода магнитной компоненты H_x . Расчетные значения интенсивности (I_x^M) отмечены на левой оси ординат, экспериментальные значения интенсивности ($I_x^Э$) отмечены на правой оси ординат. Значения интенсивностей даны в относительных единицах. На оси абсцисс отмечено мировое время (UT).

Аналогичные данные по компоненте H_y представлены на рис. 1, б. На рис. 1, в и г построены экспериментальные и расчетные суточные вариации первой пиковой частоты компонент H_x и H_y , соответственно.

На рис. 2–4 представлены результаты сравнения модели и эксперимента для апреля, июля и октября 2006 г., соответственно.

Рассмотрим результаты эксперимента и расчетные интенсивности. Очевидно, что для маг-

нитных компонент наблюдается неплохое качественное соответствие между моделью и экспериментом.

Как и в эксперименте, модельная интенсивность компоненты H_y имеет один максимум в течение дня, который наблюдается приблизительно в 13.00–14.00 часов UT . Этот максимум связан с максимальной грозовой активностью африканского грозового центра. Суточные зависимости интенсивности компоненты H_x в большинстве случаев имеют два максимума, которые приходятся примерно на 07.00–08.00 (Азия) и на 18.00–20.00 (Америка) часов UT . Заметим, что положения максимумов, характеризующих активность трех мировых грозовых центров, у расчетных кривых с точностью до 2 часов совпадают с экспериментальными. Относительные изменения модельных интенсивностей несколько отличаются от наблюдаемых, несмотря на введение в модель фоновой составляющей.

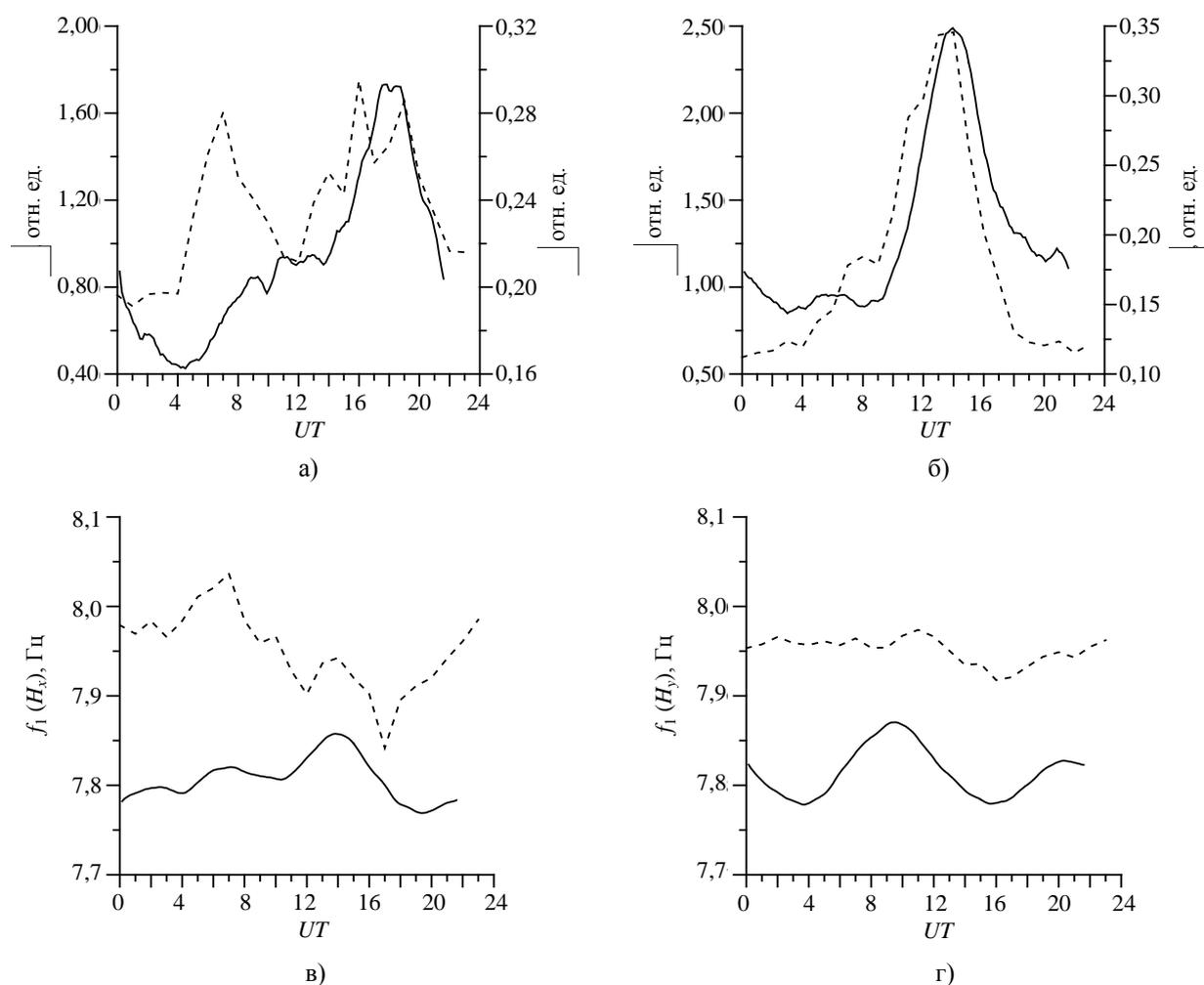


Рис. 2. Экспериментальные данные за апрель 2006 г. (сплошная кривая) и расчетные данные (пунктирная кривая): а) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_x ; б) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_y ; в) вариации первой пиковой частоты H_x ; г) вариации первой пиковой частоты H_y

О соответствии экспериментальных и расчетных пиковых частот можно сказать следующее. В некоторых случаях наблюдается достаточное хорошее соответствие между результатами расчетов и экспериментом. Пример этому – представленные здесь данные по компоненте H_y за октябрь. В большинстве же случаев модельные зависимости отличаются от экспериментальных.

Как известно, интенсивности магнитных компонент определяются интенсивностью мировых гроз и азимутом максимума грозовой активности. Пиковые частоты слабо зависят от интен-

сивности грозовых источников, но наиболее чувствительны к геометрии «приемник–источники» и к размерам областей, занятых источниками [14]. Поэтому результаты сравнения эксперимента и модели можно объяснить так. На суточном временном масштабе двухкомпонентная *OTD*-модель достаточно хорошо отображает положение основного максимума мировых гроз и их интенсивность, однако положение индивидуальных источников описывается недостаточно точно для адекватного представления суточных вариаций пиковых частот.

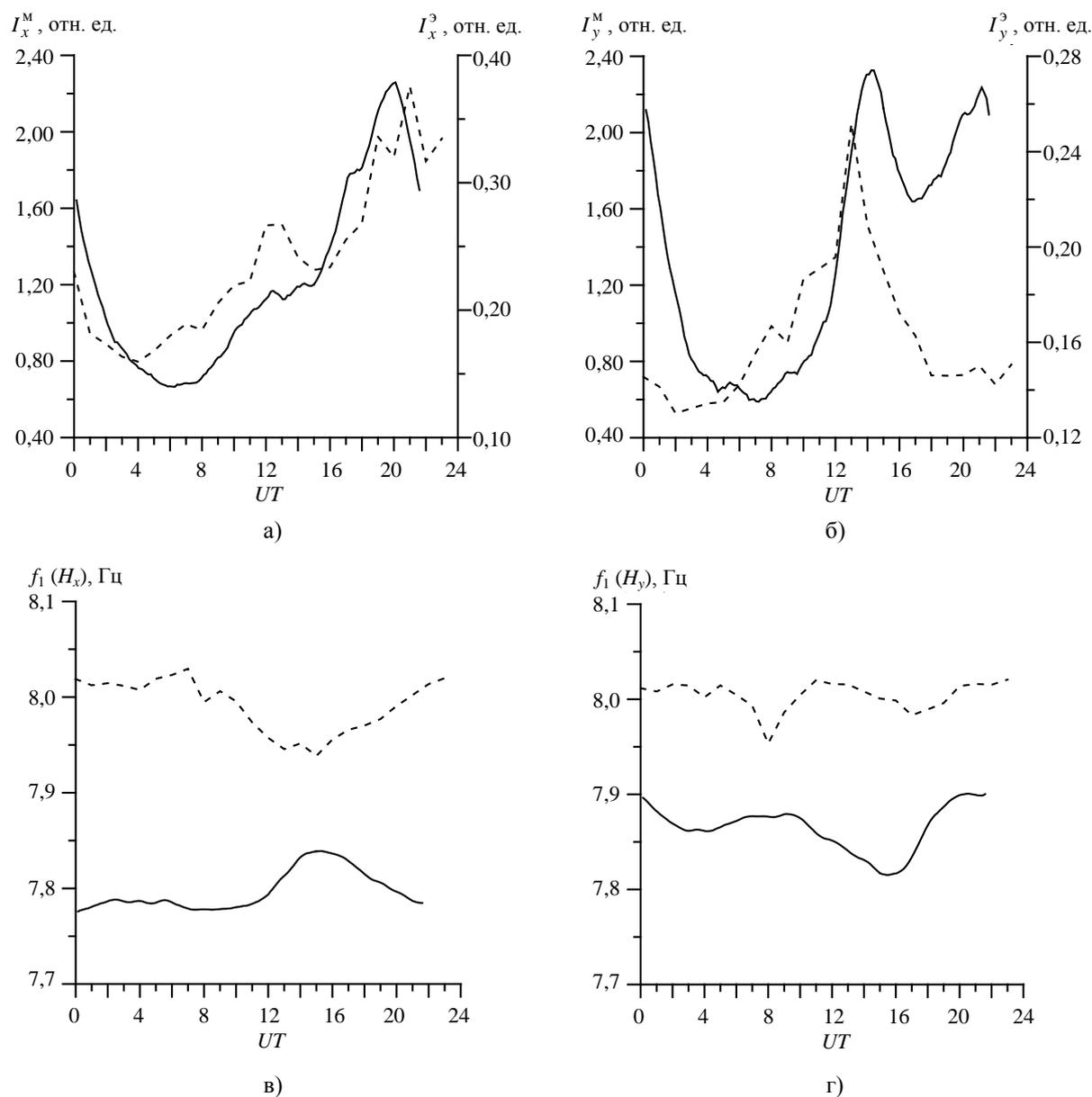


Рис. 3. Экспериментальные данные за июль 2006 г. (сплошная кривая) и расчетные данные (пунктирная кривая): а) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_x ; б) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_y ; в) вариации первой пиковой частоты H_x ; г) вариации первой пиковой частоты H_y .

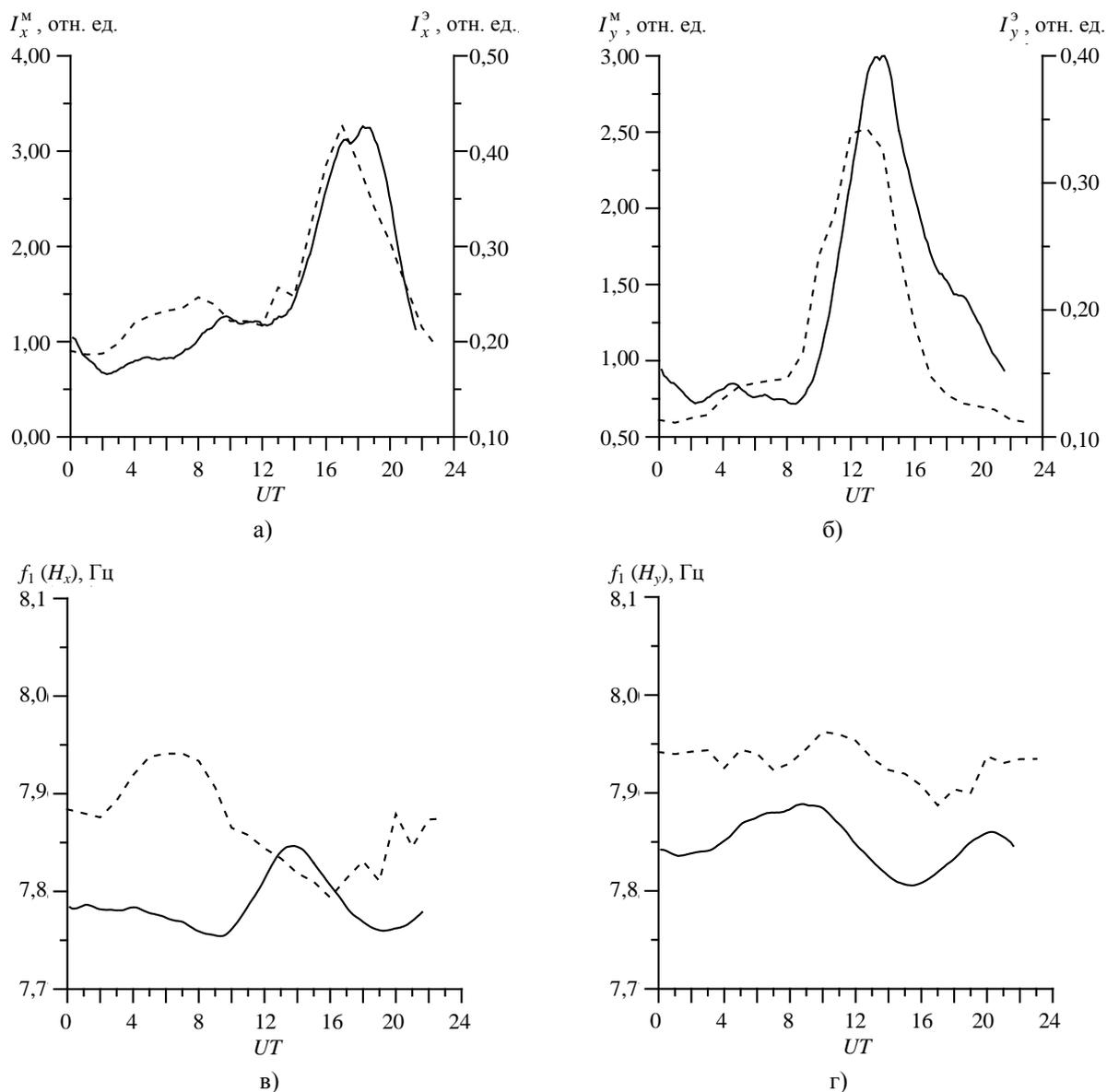


Рис. 4. Экспериментальные данные за октябрь 2006 г. (сплошная кривая) и расчетные данные (пунктирная кривая): а) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_x ; б) суточные вариации интенсивности первого мода компоненты H_y ; в) вариации первой пиковой частоты H_x ; г) вариации первой пиковой частоты H_y

3.2. *Сезонные вариации.* Как известно, сезонные и межгодовые вариации параметров ШР могут быть связаны как с дрейфом источников, так и с изменением условий распространения в полости «Земля–ионосфера».

На рис. 5 показаны экспериментальные и модельные сезонные (межгодовые) вариации первой пиковой частоты магнитного поля. На рис. 5, а изображены вариации пиковой частоты компоненты H_x , на рис. 5, б приведены вариации первой пиковой частоты компоненты H_y . При расчетах модельных кривых использовалась высота колена $K = 58$ км.

Рассмотрим вначале данные для H_y (рис. 5, б). Очевидно, что модельная зависимость

достаточно хорошо описывает экспериментальные данные за 2002 и 2003 гг. Причем сходство количественное (изменения примерно одинаковы) и качественное (положения минимумов-максимумов экспериментальных и расчетных зависимостей практически совпадают). Характер изменений первой пиковой частоты компоненты H_y в течение одного года естественно объяснить следующим образом. Максимальные значения первой пиковой частоты приходятся на летние месяцы, когда источники находятся на максимальном расстоянии от обсерватории. Минимальные значения первая пиковая частота принимает в зимние месяцы, когда грозы смещаются в южное полушарие, т. е. приближаются к об-

серватории. Как известно [14], в случае одного источника первая пиковая частота пропорциональна дистанции «источник–наблюдатель».

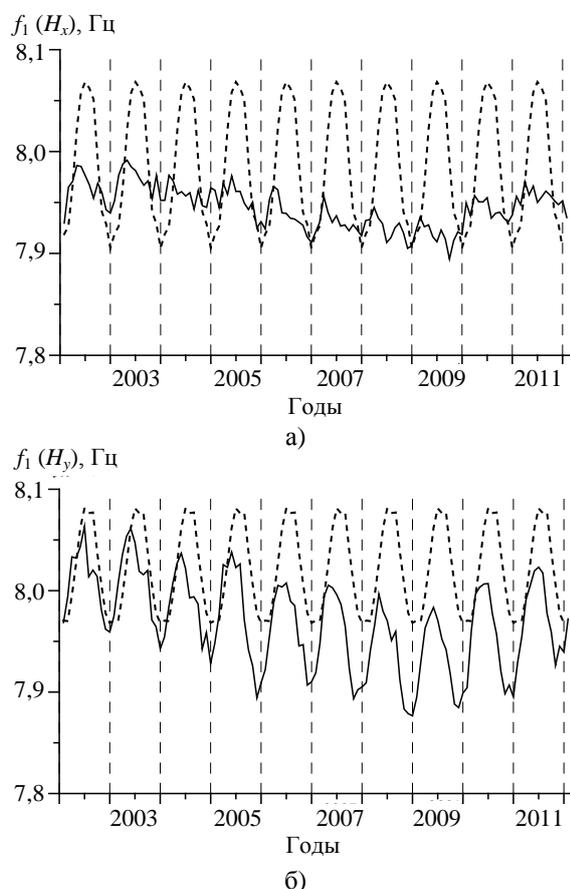


Рис. 5. Экспериментальные (сплошная кривая) и расчетные (пунктирная кривая) межгодовые вариации первой пиковой частоты компоненты H_x (а) и компоненты H_y (б)

Рассмотрим сезонные вариации первой пиковой частоты компоненты H_x . Можно заметить, что хотя экспериментальные данные попадают в диапазон значений, предсказываемых моделью, реальные изменения пиковой частоты в течение года оказываются существенно меньше, чем в модели. Причины такого существенного расхождения амплитуды вариаций частоты, возможно связанные с несовершенством *OTD*-модели, обсуждались в работе [9].

Обсудим межгодовые изменения пиковых частот магнитных компонент. На рис. 5, б можно видеть, что экспериментальные данные по пиковым частотам в период 2003–2009 гг. сдвигаются вниз как целое, а начиная с 2010 г. – начинается подъем. Как было показано в работе [7], межгодовые вариации пиковых частот происходят синхронно с изменением солнечной активности. Минимальные среднегодовые значения пиковые частоты принимают в годы минимальной (за рассматриваемый период) активности Солнца. Максимальные значения пиковых частот наблюдают-

ся, соответственно, в годы максимальной солнечной активности. Можно предположить, что вариации пиковых частот могут быть связаны как с дрейфом источников (от года к году), так и с межгодовыми изменениями ионосферы, так как обе указанные глобальные характеристики зависят от активности Солнца. Проверим оба эти предположения с использованием модели.

Проверим предположение о том, что межгодовые вариации пиковых частот могут быть связаны с изменением высоты ионосферы. В рамках используемой модели удастся достаточно хорошо описать годовые и межгодовые вариации первой пиковой частоты H_y (рис. 6), если для каждого года наблюдений выбирать соответствующую высоту колена.

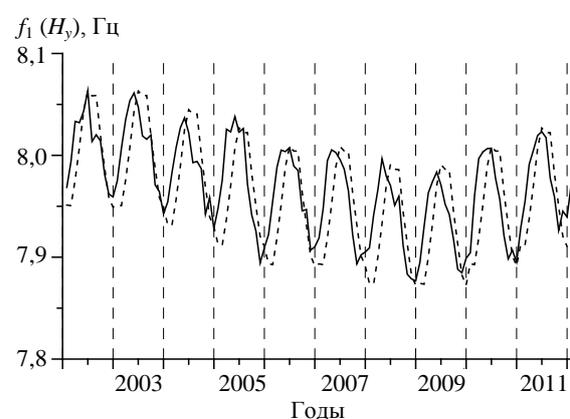


Рис. 6. Экспериментальные (сплошная кривая) и расчетные (пунктирная кривая) межгодовые вариации первой пиковой частоты компоненты H_y . При расчетах модельной кривой высота колена K подбиралась для каждого года

На рис. 7 показано, как высота колена K зависит от года.

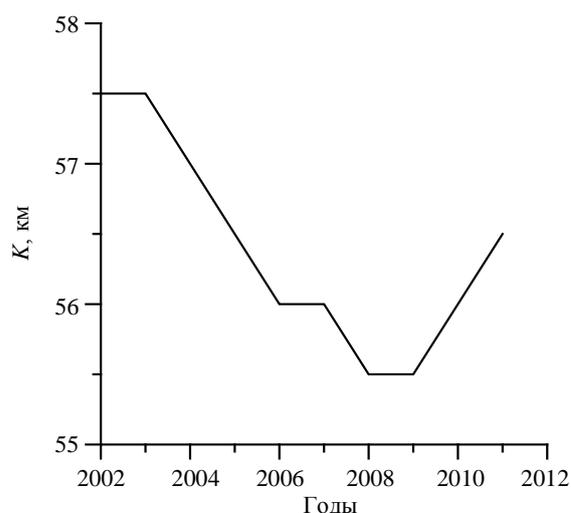


Рис. 7. Изменение высоты колена K от года к году

На рис. 8 показаны вариации пиковой частоты H_x , рассчитанные для данной межгодо-

вой зависимости высоты колена, полученной путем минимизации функционала невязок экспериментальных и модельных вариаций пиковой частоты компоненты H_y .

Таким образом, межгодовые вариации пиковых частот можно объяснить изменением высоты ионосферы от года к году. Как видно из рисунка, высота колена в профиле проводимости менялась в пределах от 57 до 55 км, причем максимальные значения высоты ионосферы соответствуют по времени максимуму солнечной активности, а минимальные – минимуму солнечной активности.

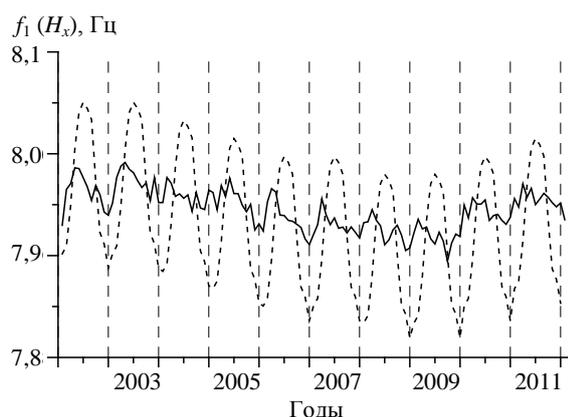


Рис. 8. Экспериментальные (сплошная кривая) и расчетные (пунктирная кривая) межгодовые вариации первой пиковой частоты компоненты H_x . При расчетах модельной кривой высота колена K подбиралась для каждого года по компоненте H_y .

Проверим теперь, можно ли объяснить наблюдаемые вариации межгодовым дрейфом источников. При расчетах фиксируем высоту ионосферы (высота колена $K = 56$ км), а источники сдвигаем как целое относительно экватора. Как видно из рис. 9, в рамках используемой модели удается достаточно хорошо описать годовые и межгодовые вариации первой пиковой частоты H_y , если для каждого года наблюдений выбирать подходящий сдвиг источников относительно экватора.

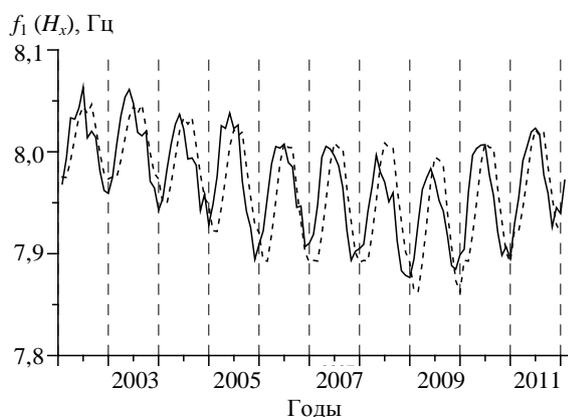


Рис. 9. Экспериментальные (сплошная кривая) и расчетные (пунктирная кривая) межгодовые вариации первой пиковой частоты компоненты H_y . При расчетах модельных данных положение источников выбирается в зависимости от года

На рис. 10 показано, как сдвиг источников зависит от года, а на рис. 11 показаны вариации пиковой частоты H_x , полученные в результате «подгонки» модели по компоненте H_y .

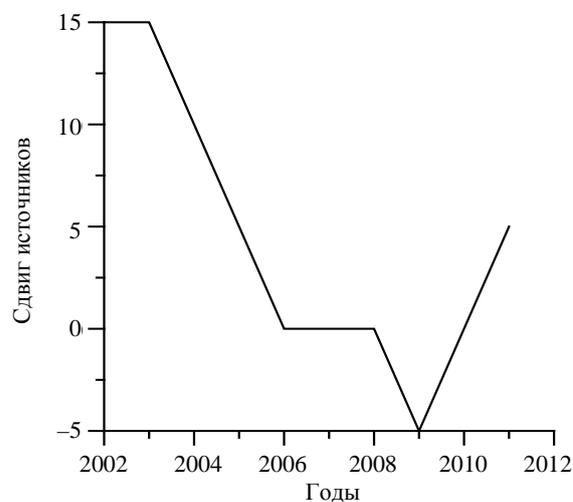


Рис. 10. Сдвиг источников от года к году

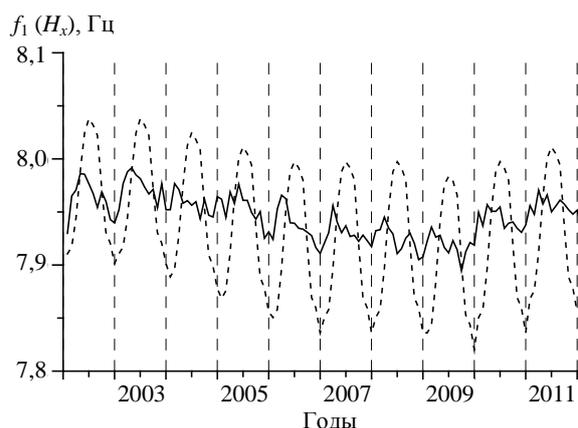


Рис. 11. Экспериментальные (сплошная кривая) и расчетные (пунктирная кривая) межгодовые вариации первой пиковой частоты компоненты H_x . В расчетной кривой положение источников выбирается в зависимости от года

Таким образом, межгодовые вариации пиковых частот можно объяснить также и межгодовым дрейфом источников. Как видно из рисунка, пределы смещения источников составили от 15° в северное полушарие до 5° в южное полушарие. Крайние отклонения в южном направлении соответствуют минимуму солнечной активности, крайние отклонения в северном направлении – максимуму солнечной активности.

Выводы. Сравнение результатов эксперимента с двухкомпонентной *OTD*-моделью показало, что эта модель, несмотря на подробное задание распределения грозовых источников, по данным оптических наблюдений из космоса, согласуется с экспериментом лишь частично.

На суточном временном масштабе двухкомпонентная *OTD*-модель достаточно хорошо

отображает положение основного максимума мировых гроз и их интенсивность, однако положение индивидуальных источников описывается недостаточно точно для адекватного представления суточных вариаций пиковых частот. Модель достаточно хорошо описывает годовые и межгодовые вариации пиковой частоты магнитной компоненты H_y .

В работе были проверены предположения о том, что вариации пиковых частот могут быть связаны как с дрейфом источников (от года к году), так и с межгодовыми изменениями ионосферы. Показано, что межгодовые вариации пиковых частот можно объяснить как изменением высоты ионосферы, так и дрейфом источников от года к году. В первом случае высота колена в профиле проводимости меняется от 55 до 57 км, причем максимальные значения высоты ионосферы совпадают по времени с максимумом солнечной активности, а минимальные – с минимумом солнечной активности. Во втором случае дрейф источников составляет от 15° в северное полушарие до 5° в южное полушарие. Максимальные отклонения в южном направлении соответствуют минимуму солнечной активности, максимальные отклонения на север – пику солнечной активности.

Поскольку величина межгодового дрейфа пиковой частоты первого мода ШР (и соответствующее смещение источников) приблизительно равна размаху ее вариаций от летнего к зимнему периоду в течение года, очевидно, можно сделать вывод о том, что долговременный дрейф пиковой частоты связан с модификацией ионосферы в течение солнечного цикла. Иначе пришлось бы предположить существование «глобального похолодания» с отсутствием грозовой активности в северном полушарии в летнее время на протяжении нескольких лет (2006–2010 гг., рис. 5, б), что не подтверждается метеорологическими наблюдениями.

Библиографический список

1. *Balsler M.* Observation of Earth – Ionosphere Cavity Resonances / M. Balsler, C. A. Wagner // *Nature*. – 1960. – 188, N 4731. – P. 638–641.
2. *Nelson P. H.* Ionospheric Perturbations and Schumann Resonance Data: Ph. D. Diss. MIT / P. H. Nelson. – Cambridge: Mass., 1967. – 127 p.
3. *Decrease of the first Schumann resonance frequency during solar proton events* / V. C. Roldugin, Ye. P. Maltsev, G. A. Petrova, A. N. Vasiljev // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106, N 18. – P. 555–562.
4. *Обнаружение* расщепления собственных частот шумановских резонансов / А. П. Николаенко, Л. М. Рабинович, А. В. Швец, А. Ю. Щекотов // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2002. – 7, № 3. – С. 498–508.
5. *Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector* / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Vocioppio et al. // *J. Geophys. Res.* – 2003. – 108, Iss. D1. – P. ACL 4-1– ACL 4-15.

6. *11-year solar cycle in Schumann resonance data as observed in Antarctica* / A. P. Nickolaenko, A. V. Koloskov, M. Hayakawa et al. // *Sun and Geosphere*. – 2015. – 10, N 1. – P. 39–49.
7. *Monitoring of low frequency fields at the Ukrainian Antarctic station* / A. V. Koloskov, V. G. Bezrodny, O. V. Budanov, Yu. M. Yampolsky // Report at the 1st Ukrainian Conf. “Electromagnetic Methods of Environmental Studies” (EMES’12). – Kharkov, 2012.
8. *Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности* / А. В. Колосков, В. Г. Безродный, О. В. Буданов и др. // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2005. – 10, № 1. – С. 11–30.
9. *Яцевич Е. И.* Суточные и сезонные вариации интенсивностей и пиковых частот трех первых модов шумановского резонанса / Е. И. Яцевич, А. П. Николаенко, О. Б. Печеная // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2008. – 51, № 7. – С. 585–596.
10. *Двухкомпонентная модель шумановского резонансного сигнала* / Е. И. Яцевич, А. П. Николаенко, А. В. Швец, Л. М. Рабинович // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – X., 2005. – 10, № 2. – С. 224–232.
11. *Pechony O.* Schumann Resonances: interpretation of local diurnal intensity modulations / O. Pechony, C. Price // *Radio Sci.* – 2007. – 41, Iss. 2. – RS2S05 (8 p.).
12. *Nickolaenko A. P.* Model variations of Schumann resonance based on OTD maps of the global lightning activity / A. P. Nickolaenko, O. Pechony, C. Price // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. – 2006. – 111, N D23102. – 9 p.
13. *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.
14. *Nickolaenko A. P.* Universal and local time components in Schumann resonance intensity / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa // *Ann. Geophys.* – 2008. – 26. – P. 813–822.

Рукопись поступила 31.08.2016.

Ye. I. Yatsevich, A. P. Nickolaenko, A. V. Shvets,
A. V. Koloskov, O. V. Budanov

COMPARISON OF LONG-TERM ANTARCTIC OBSERVATIONS OF SCHUMANN RESONANCE WITH CALCULATIONS ON THE BASIS OF A TWO-COMPONENT OTD-MODEL

Organization of continuous observations of Schumann resonance (SR) opens up the possibility of permanent monitoring the lower ionosphere and global storms. The existing methods for monitoring thunderstorm activity with SR are developed in detail only for point sources. However, the current models of radiation sources are too simplistic. In this connection, the development of semi-empirical source models, in which the intensity distribution is determined by the data from satellite observations of global storms, becomes very important. The paper compares the long-term experimental SR data accumulated in the Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky” with the results of calculations of SR in the two-component OTD-model. It is shown that the model, despite the detailed distribution of lightning sources according to optical observations from space, is consistent with the experiment only partially. On the daily time scale, the two-component OTD-model quite well reflects the position of the main maximum of the global storms and their intensity, but the position of individual sources is described not precisely enough for an adequate representation of the diurnal variations in peak frequencies. The model describes quite well the annual and interannual variations in peak frequency of the magnetic components H_y . It is shown that the inter-annual variations of peak frequencies can be attributed to a change in height of the ionosphere and drift sources from year to

year, and the long-term drift of the peak frequency is associated with the modification of the ionosphere during solar cycle.

Key words: Schumann resonance, thunderstorm activity, worldwide lightning models, peak frequencies.

О. І. Яцевич, О. П. Ніколаєнко, О. В. Швець,
О. В. Колосков, О. В. Буданов

ПОРІВНЯННЯ ДОВГОТРИВАЛИХ
АНТАРКТИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ
ШУМАНІВСЬКОГО РЕЗОНАНСУ
З РЕЗУЛЬТАТАМИ РОЗРАХУНКІВ НА ОСНОВІ
ДВОКОМПОНЕНТНОЇ *OTD*-МОДЕЛІ

Організація безперервних спостережень шуманівського резонансу (ШР) відкриває широкі можливості постійного моніторингу нижньої іоносфери і світових гроз. Методи моніторингу грозової активності з використанням ШР розроблено детально тільки для точкових джерел. Однак існуючі моделі занадто спрощено описують джерела випромінювання.

У зв'язку з цим великого значення набуває розробка напівемпіричних моделей джерел, в яких розподіл інтенсивності задається на основі даних супутникових спостережень світових гроз. У роботі проводиться порівняння довгострокових експериментальних даних ШР, накопичених на українській антарктичній станції «Академік Вернадський», з результатами розрахунків ШР у двокомпонентній *OTD*-моделі, яке показало, що модель, незважаючи на докладне задання розподілу грозових джерел за даними оптичних спостережень з космосу, узгоджується з експериментом лише частково. На добовому часовому масштабі двокомпонентна *OTD*-модель досить добре відображає положення основного максимуму світових гроз і їх інтенсивність, проте положення індивідуальних джерел описується недостатньо точно для адекватного подання добових варіацій пікових частот. Модель досить добре описує річні і міжрічні варіації пікової частоти магнітної компоненти. Показано, що міжрічні варіації пікових частот можна пояснити зміною висоти іоносфери і дрейфом джерел від року до року, а довготривалий дрейф пікової частоти пов'язаний з модифікацією іоносфери протягом сонячного циклу.

Ключові слова: шуманівський резонанс, грозова активність, модель джерела світових гроз, пікова частота.