

УДК 537.877:550.388.2:551.594.2

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГАММА-ВСПЛЕСКА НА ШУМАНОВСКИЙ РЕЗОНАНС

*А. П. Николаенко*¹, *И. Г. Кудинцева*², *О. Печёная*³, *М. Хайакава*⁴, *Т. Накамура*⁴,
*Я. Хобара*⁴, *Я. Танака*⁵

¹ Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, г. Харьков, Украина;

² Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина;

³ NASA Goddard Institute for Space Studies and Columbia University, New York, USA;

⁴ The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan;

⁵ Institute of Space and Astronautical Science, Kanagawa, Japan

Сравниваются экспериментальные и модельные данные о воздействии всплеска внегалактических гамма-лучей 27 декабря 2004 года на глобальный электромагнитный резонанс. По измерениям сигналов сверхдлинноволновых радиостанций известно, что ионизирующее излучение снизило ионосферу над дневным полушарием на 20 км. Такое возмущение должно изменить собственные частоты полости Земля–ионосфера и сказаться на форме наблюдаемого спектра сверхнизкочастотного земного радиошума. В работе сравниваются результаты наблюдений и моделирования изменений шумановского резонанса под воздействием гамма-всплеска. Используются две модели: в более простой из них ионосферное возмущение усреднено по всему Земному шару; вторая модель учитывает неоднородность день–ночь. Показано, что обе модели дают похожие предсказания и эффект мало зависит от неоднородности день–ночь. Поскольку ионосфера несёт положительный электрический заряд, её вертикальное смещение вызывает ток, выступающий в роли «параметрического» импульсного источника электромагнитного поля. Глобальный размер источника приводит к тому, что импульс содержит только низшую частоту шумановского резонанса. Сверхнизкочастотный импульс совпадает во времени с приходом гамма-всплеска. Представлены результаты наблюдений в обсерватории Мошири (Япония) в момент гамма-всплеска, которые сравниваются с расчётом для этой обсерватории. Показано, что в записи удаётся обнаружить как модификацию сонограммы шумановского резонанса, так и параметрический сверхнизкочастотный радиоимпульс.

ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг глобального электромагнитного (шумановского) резонанса позволяет исследовать полость Земля–ионосфера и естественные источники радиоизлучения — грозовые разряды. Ниже обсуждаются модельные и экспериментальные данные, связанные с модификацией ионосферы мощным всплеском гамма-излучения 27 декабря 2004 года. В расчётах используются модели [1, 2], связывающие параметры шумановского резонанса с регулярными свойствами нижней ионосферы.

С 1998 года зарегистрированы два мощных всплеска космического гамма-излучения [3–7]. В работе [3] описана безуспешная попытка обнаружить изменения шумановского резонанса, приуроченные к гамма-всплеску 27 августа 1998 года, пришедшему из Большого Магелланового облака от источника SGR 1900+14. Записи сигналов далёких сверхдлинноволновых радиостанций [4–7] позволили показать, что гамма-всплеск снижает ионосферу над освещённым полушарием Земли. Что же касается записей глобального электромагнитного резонанса, то здесь эффект найти не удалось [3].

Мы приводим результаты моделирования изменений спектра шумановского резонанса, вызванных гамма-всплеском, пришедшим на Землю 27 декабря 2004 года из созвездия Стрельца от источника SGR 1806–20. Затем мы рассмотрим параметрический сверхнизкочастотный импульс, возбуждаемый снижением заряженной ионосферы. Модельные данные сравниваются с результатами наблюдений в обсерватории Мошири (Япония).

Подробные данные о гамма-всплеске можно найти в работах [5–8]. Мы упомянем только самые необходимые сведения. Всплеск был записан в 21 час 30 минут и 26,5 секунд мирового времени (UT). Вспышка пришла от галактики, удалённой на расстояние в $30 \div 40$ тысяч световых лет и осветила дневную сторону Земли. Излучённая энергия вспышки составила около 10^{48} эрг. Пиковый поток превышал самые мощные солнечные гамма-вспышки в сто тысяч раз и был на два порядка выше, чем у события 1998 года. Центр возмущения ионосферы располагался в середине Тихого океана в точке с координатами $20,4^\circ$ ю. ш. и $146,2^\circ$ з. д., т. е. на расстоянии около 450 км от центра дневной полусферы.

Мониторинг сверхдлинноволновых радиопередач на различных транстихоокеанских трассах распространения выполнялся на антарктической станции США «Палмер». Он позволил определить, что гамма-всплеск снизил высоту ионосферы на 20 км, а само возмущение существовало в течение часа [5]. Снижение высоты ионосферы произошло быстрее, чем за 1 с. Мы аппроксимируем временные изменения высоты ионосферы степенной функцией [9]:

$$\Delta H = -19 \times (9,6441t)^{-0,1501}, \quad (1)$$

и используем в вычислениях ступенчатые изменения высоты с шагом по времени 10 с.

1. ПРОФИЛЬ ПРОВОДИМОСТИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

При расчётах параметров шумановского резонанса используется ионосферная модель, в рамках которой высотный профиль проводимости нижней ионосферы описывается двумя экспоненциальными функциями — модель «колена», развитая для однородного резонатора Земля—ионосфера [1] и для резонатора с неоднородностью день—ночь [2]. Обе модели основаны на работе [10], где при получении радиофизических характеристик волновода Земля—ионосфера на сверхнизких частотах (СНЧ) предложено использовать экспоненциальный профиль проводимости ионосферы. Численные эксперименты [10] позволили ввести в рассмотрение две эффективные высоты. Первая из них, «электрическая», высота находится из условия равенства токов проводимости ионосферной плазмы и токов смещения монохроматической радиоволны; выше неё амплитуда электрического поля резко убывает. Магнитное поле достигает больших высот в неоднородной ионосфере, что обуславливает появление «магнитной» высоты, выше которой затухает и магнитное поле. «Магнитная» высота лежит выше «электрической» на пространственный масштаб диффузии магнитного поля в плазму [10].

Постоянная распространения монохроматической СНЧ волны определяется по четырём параметрам профиля: «электрической» и «магнитной» высотам и соответствующим масштабам проводимости. Эти результаты, сформулированные для монохроматических волн, удалось обобщить на случай широкополосных сигналов шумановского резонанса [11], и с тех пор экспоненциальный профиль широко используется в моделировании и интерпретации данных.

В рамках модели «колена» (knee model) высотный профиль проводимости нижней ионосферы описывается двумя экспоненциальными функциями, которые, пересекаясь на некоторой высоте, образуют «колена». Высотный масштаб проводимости ζ выше «колена» мал, а ниже него — велик, что обеспечивает излом профиля. Мы полагаем для простоты, что изменяется только нижняя часть ионосферы: модифицируется «электрическая» высота полости Земля—ионосфера, тогда как верхняя, «магнитная» высота остаётся неизменной (см. ниже). Важно, что согласно сверхдлинноволновым наблюдениям [5] ионосфера снижалась над всей акваторией Тихого океана, вплоть до угловых расстояний $\psi = 60^\circ$ от центра возмущения. Поэтому говорят, что ионосфера снизилась над всем дневным полушарием.

В вычислениях СНЧ полей лучше всего использовать модель промежутка Земля—ионосфера с неоднородностью день—ночь, в которой ионосфера на дневной стороне планеты опускается на 20 км. С учётом глобального характера шумановского резонанса, можно использовать среднее по планете снижение ионосферы на 10 км, как это сделано в работе [9]. Сравнение данных обеих моделей (см. ниже) показывает, что учёт неоднородности день—ночь не приводит к существенным отличиям в величине расчётного воздействия гамма-всплеска на параметры глобального резонанса.

Физически эффект гамма-вспышки объясняется тем, что снижение ионосферы изменяет собственные частоты полости Земля—ионосфера, т. е. фазовую скорость и затухание СНЧ радиоволн. Следовательно, должен измениться наблюдаемый спектр мощности резонансных колебаний. Расчёт показал, что пиковые частоты, амплитуды и добротности всех типов колебаний снижаются в момент прихода гамма-излучения.

В расчётах поля используются параметры возмущённого и невозмущённого резонатора Земля—ионосфера из работы [9]. Перечислим основные физические параметры моделей. Высотный профиль проводимости атмосферы описывается с помощью модели «колена»: $\sigma(h) = \sigma_0 \exp[(h - H_{\text{КНЕЕ}})/\zeta]$. В однородном невозмущённом резонаторе высота «колена» равна $H_{\text{КНЕЕ}} = 55$ км, а проводимость σ_0 соответствует частоте $F_{\text{КНЕЕ}} = \sigma_0/(2\pi\epsilon_0) = 10$ Гц. Это означает, что на высоте 55 км токи смещения частоты 10 Гц становятся равными токам проводимости ионосферы [1, 10–17], т. е. на высоте 55 км выполняется условие $2\pi\epsilon_0 F_{\text{КНЕЕ}} = \sigma_0$. Отсюда $\sigma_0 = 20\pi\epsilon_0$, где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Проводимость ионосферы в модели колена имеет разный высотный масштаб ζ выше и ниже $H_{\text{КНЕЕ}}$. Выше высоты колена $\zeta = \zeta_a = 2,9$ км, а ниже этой высоты $\zeta = \zeta_b = 8,3$ км. Значительно выше «колена» располагается «магнитная» высота $H_{\text{мп}}$, куда за счёт диффузии проникает магнитное поле волны [10]. В используемой нами модели эта высота $H_{\text{мп}} = 96,5$ км, если частота сигнала равна $F_{\text{мп}} = 8$ Гц. Постулируется, что «магнитная» высота и высотный масштаб проводимости в окрестности этой высоты логарифмически зависят от частоты радиосигнала. Соответствующие формулы можно найти в работах [1, 2, 17], мы их используем в расчётах, но не приводим из-за громоздкости.

В однородной по угловым координатам модели гамма-всплеск снижает единственный параметр модели $H_{\text{КНЕЕ}}$ до 45 км. Данные такого профиля используются нами для расчёта постоянной распространения СНЧ радиоволн и СНЧ спектров.

Во второй, более сложной модели учитывается неоднородность ионосферы день—ночь. Здесь используется частично однородная модель «колена» [2, 17], в которой $F_{\text{КНЕЕ}} = 13$ Гц и $F_{\text{мп}} = 6$ Гц как для дневных, так и для ночных условий. На дневной полусфере невозмущённые значения равны $H_{\text{КНЕЕ}} = 54$ км, $\zeta_a = 2,7$ км, $\zeta_b = 7,5$ км и $H_{\text{мп}} = 97,5$ км. На ночной полусфере $H_{\text{КНЕЕ}} = 60$ км, $\zeta_a = 3,8$ км, $\zeta_b = 9,1$ км и $H_{\text{мп}} = 99$ км. Гамма-вспышка снижает высоту «колена» только над дневным полушарием, но уже до 34 км. Все перечисленные параметры применяются в решении двумерных телеграфных уравнений, описывающих шумановский резонанс (см. [2, 17]).

2. ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ГЛОБАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО (ШУМАНОВСКОГО) РЕЗОНАНСА

Использовались также две модели распределения грозových источников СНЧ колебаний в момент прихода гамма-всплеска. В первой из них разряды равномерно распределены по поверхности Земного шара. Вторая, более реалистичная модель использует распределение молний, следующее из наблюдений космического аппарата OTD (optical transient detector), который регистрировал вспышки молний в течение пяти с половиной лет. Окончательные данные представлены в виде карт мировых распределений грозовой активности для каждого часа суток и для каждого ме-

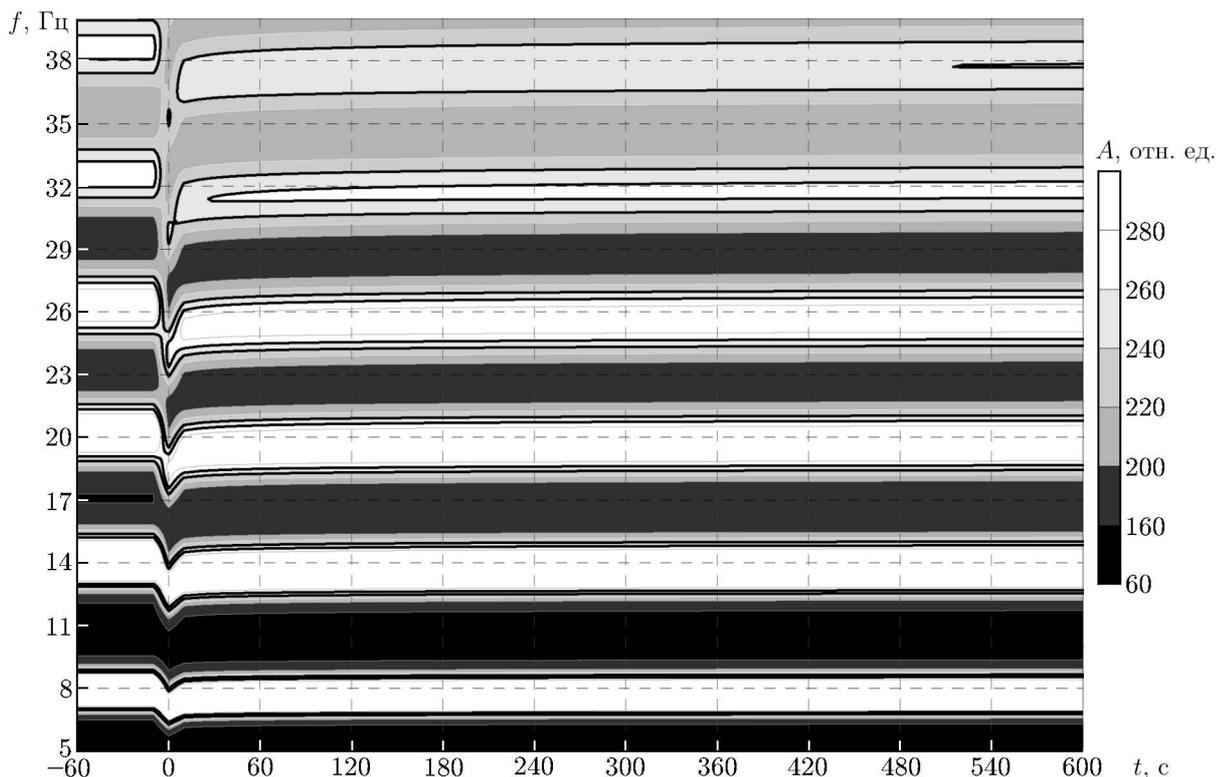


Рис. 1. Изменение спектра глобального электромагнитного резонанса в момент внегалактического всплеска гамма-излучения 27 декабря 2004 года (время t отсчитывается от момента гамма-всплеска)

сяца. Поскольку гамма-всплеск пришёл в 21:30 UT, нам пришлось усреднить карты для 21 и 22 часов. Более детальное описание модели источников содержится в [9].

На рис. 1 показана ожидаемая сонограмма шумановского резонанса в окрестности гамма-всплеска [9]. Предполагается, что высота «колена» снизилась на 10 км по всей Земле, а грозы распределены в соответствии с данными OTD. Спектры глобального резонанса, составляющие сонограмму, рассчитывались с шагом 10 секунд, а временные изменения высоты описываются формулой (1) с той разницей, что глобальная модификация высоты равна половине её изменения над дневной полусферой $\Delta H/2$.

Рисунок 1 показывает, что все резонансы в момент гамма-всплеска одновременно сдвигаются по оси частот вниз. Затем спектр постепенно восстанавливается. Очевидно, что в данных наблюдений следует искать резкое снижение спектров как целого, приуроченное к приходу гамма-всплеска. Чтобы подчеркнуть характер ожидаемых изменений, мы выделили жирными линиями уровни 240 и 260 отн. ед. Эти линии используются при сравнении с экспериментальными данными.

На рис. 2 сравниваются изменения динамических спектров шумановского резонанса, полученные с помощью решения телеграфных уравнений [2, 17], в модели резонатора с неоднородностью день—ночь (панель *a*) и однородного резонатора Земля—ионосфера (панель *b*). Рисунок 2*a* практически повторяет сонограммы, рассчитанные для однородного резонатора. Подчёркнём, что данные рис. 1 получены с помощью разложений поля в ряды зональных гармоник [16], тогда как спектры вертикального электрического поля на рис. 2 рассчитаны с помощью двумерных телеграфных уравнений [17].

В обеих моделях резонатора на рис. 2 используется пространственное распределение источни-

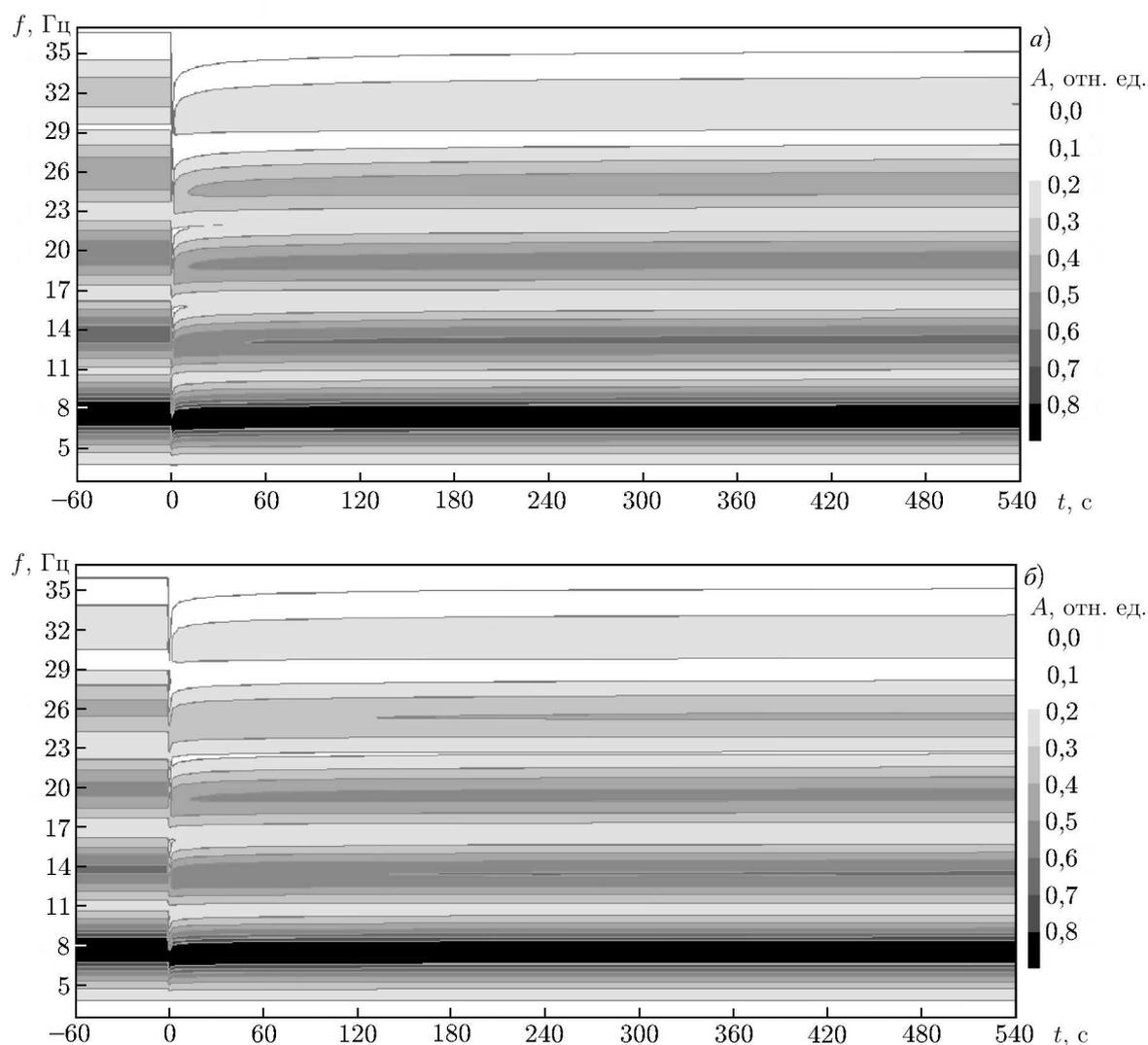


Рис. 2. Изменения в сонограммах шумановского резонанса в момент гамма-всплеска в модели резонатора с неоднородностью день–ночь (а) и однородного резонатора (б). Время отсчитывается от момента гамма-всплеска

ков из данных ОТД. Как видно, спектры шумановского резонанса варьируют похожим образом — наблюдается резкий сдвиг спектра как целого в область низких частот. Расчёт показывает, что наиболее перспективным способом обнаружения влияния гамма-всплеска является использование сонограмм.

На рис. 3 с помощью двумерных телеграфных уравнений проводится дополнительное сопоставление ожидаемых изменений. Здесь сравниваются вариации амплитуды резонанса в однородном резонаторе и резонаторе с неоднородностью день–ночь. Наблюдатель помещён на антарктическую станцию США «Палмер», где по записям сигналов сверхдлинноволновых радиостанций было обнаружено влияние гамма-всплеска на ионосферу. Используются равномерное распределение гроз по Земному шару и распределение, полученное на основе данных спутника ОТД.

Вставка на рис. 3 подробно показывает падение амплитуды во времени. Все кривые ведут себя похожим образом, хотя для более реалистической модели источников поля, построенной на

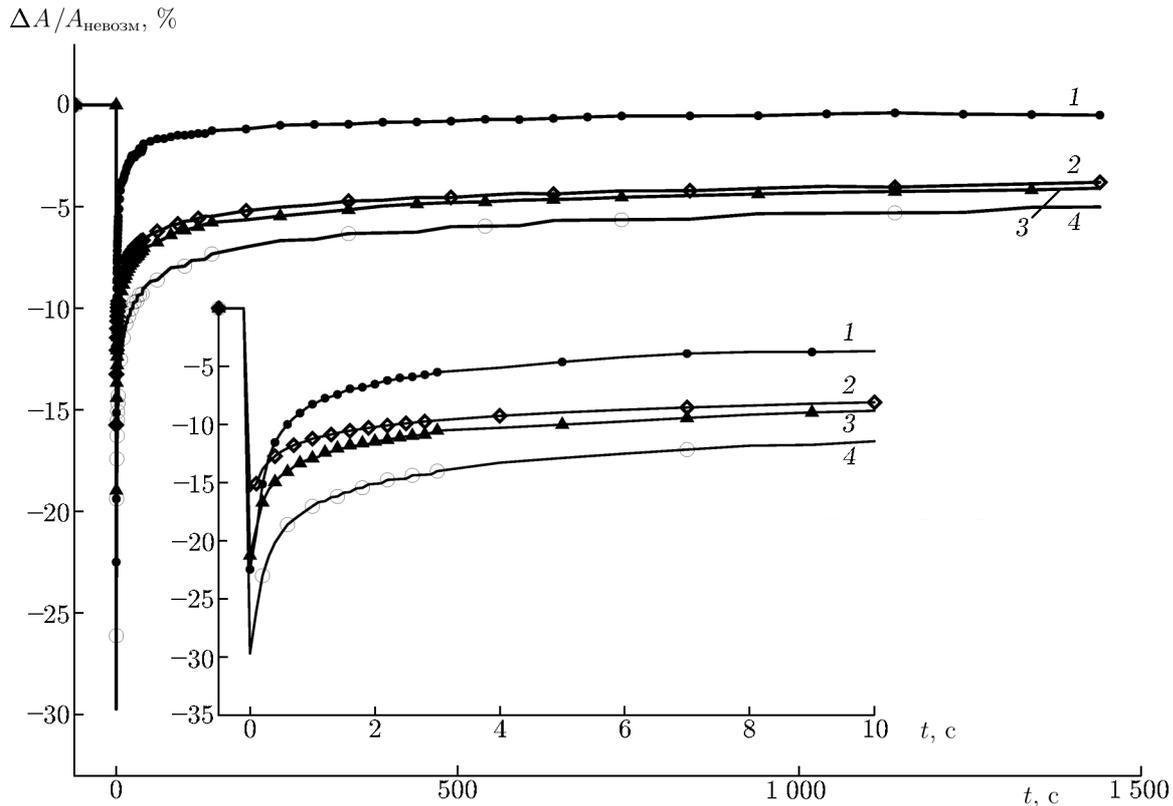


Рис. 3. Изменения амплитуды шумановского резонанса на станции «Палмир», Антарктика, во время всплеска гамма-излучения в однородном и неоднородном резонаторах при равномерном распределении гроз по планете и распределении, полученном на основе данных спутника ОТД (время отсчитывается от момента гамма-всплеска). Кривая 1 соответствует модели резонатора день–ночь и однородному распределению гроз, кривая 2 — однородному резонатору и однородному распределению гроз, кривая 3 — модели резонатора день–ночь и модели распределения гроз по данным спутника ОТД, кривая 4 — однородному резонатору и модели ОТД

основе данных ОТД, наблюдаются систематические отличия в единицы процентов, тогда как в момент гамма-всплеска амплитуда колебаний резко уменьшается на десятки процентов, а затем плавно восстанавливается.

Расчёт в однородной и неоднородной моделях при равномерном или более реалистичном распределении источников даёт похожие результаты — резкое снижение всех резонансных параметров. Изменение происходит на всех модах одновременно, и сонограмма приобретает характерный скачок, который следует искать в экспериментальных записях.

3. НАБЛЮДЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СИГНАЛА ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА

Прежде чем приступить к обсуждению экспериментальных данных, напомним, что спектральные оценки шумановского резонанса коротких реализаций очень нестабильны [17]. Общеизвестные гладкие резонансные линии получают за счёт усреднения элементарных спектров по ансамблю. Обычно используют интервалы в 5 или 10 минут (30 или 60 элементарных спектров). Поэтому трудно ожидать, чтобы используемые нами экспериментальные спектры коротких реализаций оказались похожими на гладкие картины, приведённые на рис. 2 и 3. Изрезанность как

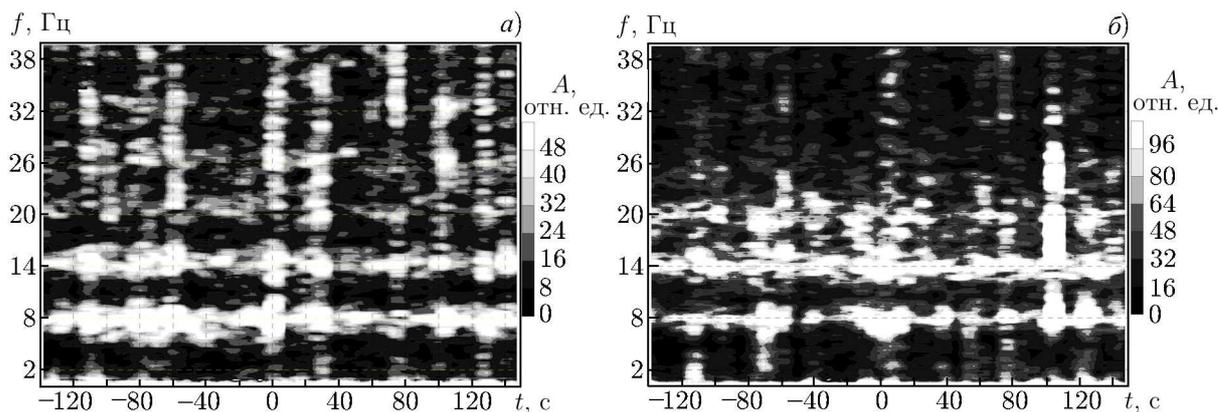


Рис. 4. Сонограммы записей шумановского резонанса в обсерватории Мошири в окрестности всплеска гамма-излучения для компоненты $H_{СЮ}$ (а) и $H_{ЗВ}$ (б) (время отсчитывается от момента гамма-всплеска)

во времени, так и по частотам отражает случайную природу грозовых источников [16].

Обработка данных должна удовлетворить двум противоречивым условиям. С одной стороны, расчёты показывают, что максимальный частотный сдвиг сонограммы немного превышает 1 Гц. Отсюда следует, что частотное разрешение в спектре экспериментальных данных должно быть не хуже 0,1 Гц. Поэтому в спектральной обработке должны использоваться сегменты записи с длиной не менее 10 секунд. С другой стороны, возмущение ионосферы, вызванное гамма-всплеском, продолжается очень короткое время, и за 10 секунд оно существенно ослабевает. Поэтому при обработке данных пришлось поступить следующим образом. Индивидуальные амплитудные спектры сигнала, из которых составляется сонограмма, вычисляются для фрагментов записи с длиной 10 с, что обеспечивает необходимое разрешение по частоте. Но сами фрагменты следуют друг за другом с шагом 1 с. Как будет показано ниже, такой подход позволил выявить искомое возмущение.

Непрерывная регистрация шумановского резонанса ведётся на станции Мошири (Япония), географические координаты $44,365^\circ$ с. ш. и $142,24^\circ$ в. д. Здесь с частотой квантования 4 кГц записываются вертикальное электрическое поле и горизонтальные компоненты магнитного поля в проекции на линии запад–восток и север–юг ($H_{ЗВ}$ и $H_{СЮ}$). Мы обработали запись в окрестности прихода гамма-всплеска и получили динамические спектры, показанные на рис. 4. Сигнал электрической антенны не использовался, поскольку он был искажён локальной помехой. Сонограмма на рис. 4 базируется на амплитудных спектрах, рассчитанных для фрагментов с длиной записи 10 с, что обеспечило стандартное спектральное разрешение 0,1 Гц. Сами же спектры были получены друг за другом с шагом 1 с. Это означает, что для момента времени $t = 0$, показанного на оси абсцисс на рис. 4, использовался сегмент записи от -5 до $+5$ с. Для момента $t = 1$ с вычислялся спектр сигнала на временном интервале от -4 до $+6$ с и т. д. Таким образом, время, показанное на оси абсцисс, отвечает середине временного сегмента, на котором проводилась спектральная обработка.

На рис. 4 приведены сонограммы, отвечающие компонентам поля $H_{СЮ}$ и $H_{ЗВ}$. Вдоль оси абсцисс показано время в секундах от момента гамма-всплеска, а вдоль оси ординат с шагом 6 Гц отложена частота. Как и ожидалось, сонограммы сильно изрезаны, что оказывается главным препятствием при обнаружении синхронной модуляции резонансного сигнала гамма-всплеском.

Чтобы обнаружить возмущение, приходится вырезать фрагменты сонограмм, приведённых на рис. 4, и комбинировать их с ожидаемыми изменениями, показанными жирными линиями на рис. 1. На рис. 5 мы объединили экспериментальные цифровые сонограммы компонент поля,

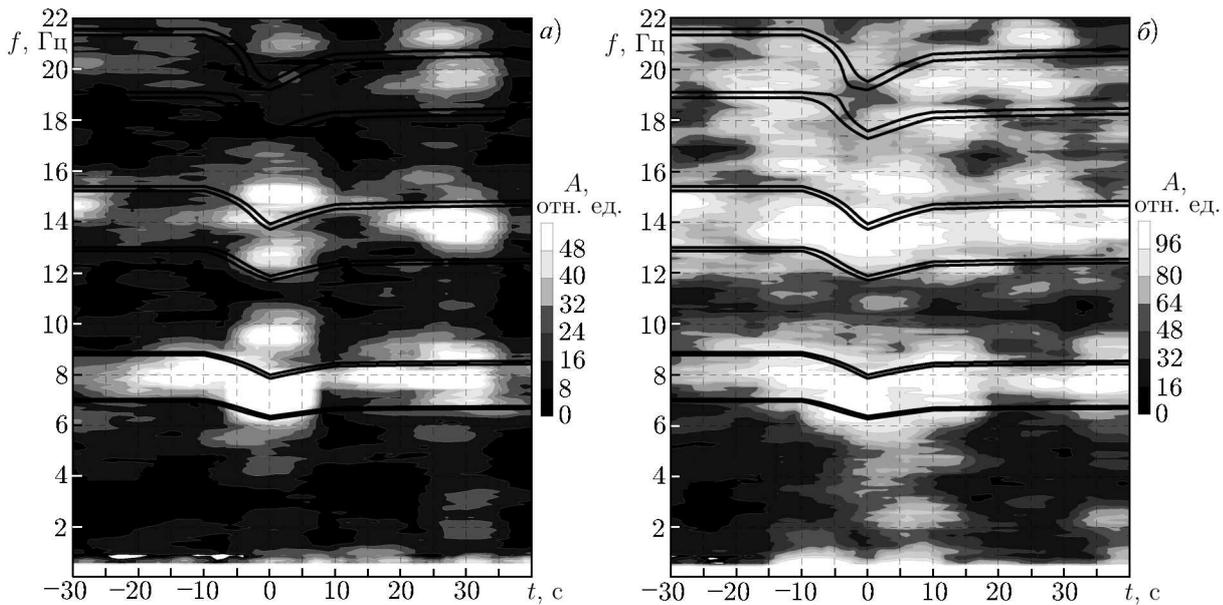


Рис. 5. Сравнение данных наблюдений с модельными спектрами в окрестности гамма-всплеска, которое выявляет модификацию шумановского резонанса

показанные полутонной заливкой, и сонограммы модельных изменений, показанные жирными линиями постоянного уровня. Видно, что, несмотря на изрезанность экспериментального спектра на обоих графиках рис. 5, только в окрестности события просматривается одновременное смещение резонансной структуры вниз по оси частот в обеих компонентах. Положение скачка в резонансном спектре согласуется с моментом прихода гамма-всплеска на Землю. На графиках видна также тенденция к восстановлению регулярного спектра.

Мы можем сделать заключение о том, что прямое сопоставление расчётных и экспериментальных данных по фоновому сигналу шумановского резонанса позволило обнаружить кратковременное одновременное изменение структуры спектра. Экспериментальные данные в отрыве от модельных расчётов вряд ли позволили бы уверенно обнаружить искомый эффект. Главные трудности обнаружения связаны с нестационарностью коротких записей, обусловленной стохастической природой грозных источников, когда импульсы от разрядов комбинируются с ионосферным возмущением, длительность максимальной фазы которого не превышает 0,1 с по данным сигналов сверхдлинноволновых радиостанций [5].

4. СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНЫЙ ИМПУЛЬС, ВЫЗВАННЫЙ СНИЖЕНИЕМ ЗАРЯЖЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ

В работе [18] рассмотрено возбуждение всплеска СНЧ радиоизлучения за счёт резкого опускания заряженной ионосферы, вызванного всплеском внегалактического гамма-излучения 27 декабря 2004 года. Поскольку ионосфера заряжена и несёт потенциал в +250 кВ относительно Земли [19], её «механическое» смещение эквивалентно появлению электрического тока. Заряд, накопленный на дневной стороне ионосферы, составляет примерно 10^4 Кл. Резкое смещение границы плазмы вызывает импульсный ток той же полярности, что у положительных грозных пробоев, а токовый момент такого источника примерно равен $2 \cdot 10^9$ А · м. Источник такой амплитуды способен обеспечить дискретный СНЧ радиосигнал, хорошо различимый в фоновом излучении мировых гроз. В расчётах [18] предполагалось, что нижняя ионосфера имеет резкую границу,

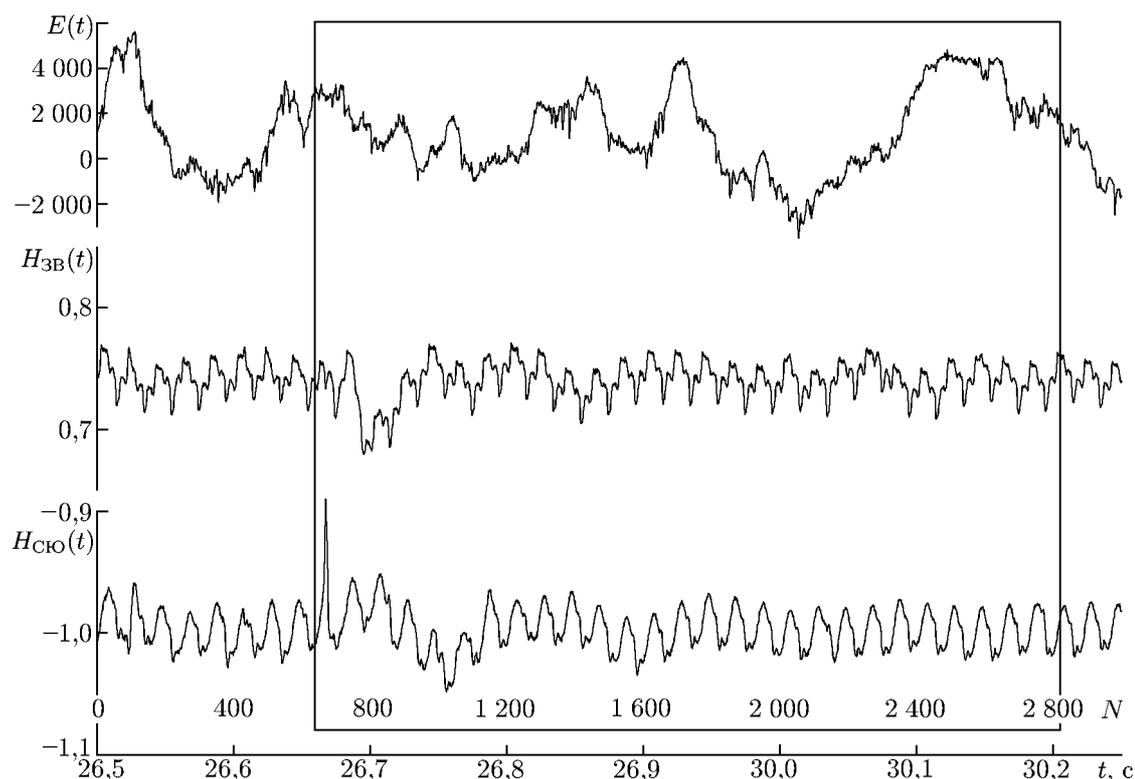


Рис. 6. Фрагмент исходной записи СНЧ радиосигнала в Мошири в окрестности прихода гамма-всплеска (время отсчитывается от 21:30 UT)

проводимость воздуха под нею пренебрежимо мала, смещение на 20 км происходит за 10^{-2} с, а токовый момент распределён по всей дневной полусфере и убывает с угловым расстоянием ψ от её центра как $\cos \psi$.

Для описанного выше «параметрического» импульса тока характерны две особенности.

1) Импульс вызван снижением ионосферы, поэтому он совпадает по времени с приходом гамма-всплеска или немного запаздывает относительно него.

2) Размер параметрического источника велик, поэтому он возбуждает только низшие моды шумановского резонанса. Модельные вычисления показали, что параметрический источник возбуждает также широкий спектральный пик в окрестности частоты 60 Гц, обусловленный интерференцией волн, приходящих от элементарных токов. В разных обсерваториях мира «высокочастотный» пик появляется при неодинаковой ширине источника, что, в принципе, позволяет оценить размер возмущения.

Ниже проводится сравнение расчётных данных с результатами наблюдений на станции Мошири (Япония) с координатами $44,365^\circ$ с. ш. и $142,24^\circ$ в. д. На рис. 6 приведён фрагмент записи СНЧ радиосигнала на этой обсерватории. Внегалактический гамма-всплеск, пришедший от источника в созвездии Стрельца, был зарегистрирован спутником «Ulysses» в 21:30:26,5 UT. Рамкой на рисунке отмечено временное окно, в котором, в соответствии с задержкой на распространение гамма-всплеска от спутника к Земле, ожидается приход параметрического радиоимпульса. Под осью абсцисс приведено время после момента 21:30 UT, а над осью приведены номера отсчётов в записи, выполнявшейся с частотой квантования 4 кГц.

На рис. 6 приведены три зависимости: верхняя из них иллюстрирует запись вертикального

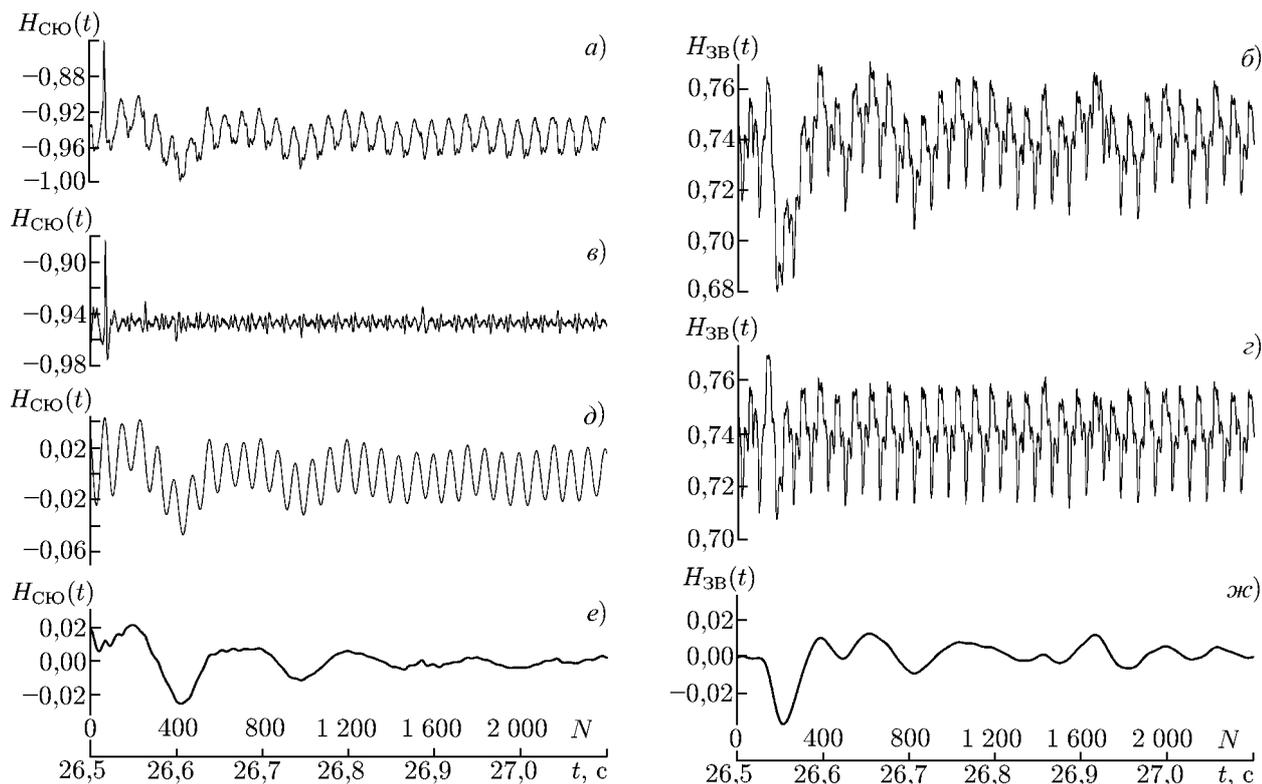


Рис. 7. Подготовка экспериментальной записи Мошири к спектральной обработке

электрического поля, а две другие — компоненты запад—восток и север—юг горизонтального магнитного поля. Как видно, электрическое поле искажено помехой, поэтому мы в дальнейшем его не рассматриваем. Что же касается записей горизонтального магнитного поля, то, несмотря на наличие сильной индустриальной помехи с частотой 50 Гц, в них заметен импульсный сигнал, близкий по времени к моменту гамма-всплеска, что соответствует ожиданиям [18].

В записи компоненты поля $H_{CЮ}$, кроме индустриальной помехи на частоте 50 Гц и её гармоник, присутствует короткий всплеск. В записи компоненты $H_{ЗВ}$ всплеск отсутствует и видна только помеха с промышленной частотой и её гармоники. Желательно устранить эти помехи, что было сделано с помощью алгоритма «Гусеница». Этот алгоритм реализует сингулярный спектральный анализ [20, 21], а последовательные результаты его применения показаны на рис. 7.

На рис. 7а, в, д, е показаны результаты применения алгоритма «Гусеница» к записи компоненты $H_{CЮ}(t)$. На нижней оси приведены номера отсчётов (над осью) и время в секундах от момента 21:30 UT (под осью). Рисунок 7а показывает исходную запись, подвергнутую обработке. Рисунок 7б показывает импульсную помеху, выделенную алгоритмом и скомбинированную с «высокочастотным» шумом — это главные компоненты сигнала с номерами 1, 2 и 3. Если вычистить помеху из исходной реализации, то получается запись, представленная на рис. 7д (однократная процедура «Гусеница»). Импульсная помеха успешно устранена, но в сигнале всё ещё присутствует помеха с частотой 50 Гц. Её легко устранить повторным применением алгоритма, в результате чего мы получаем график на рис. 7е, представляющий собой явно выраженный импульс с частотой около 7 Гц.

При обработке компоненты поля $H_{ЗВ}$, индустриальная помеха выделяется сразу несмотря на её сложную временную форму (рис. 7б). После её вычитания из исходного сигнала, мы получаем

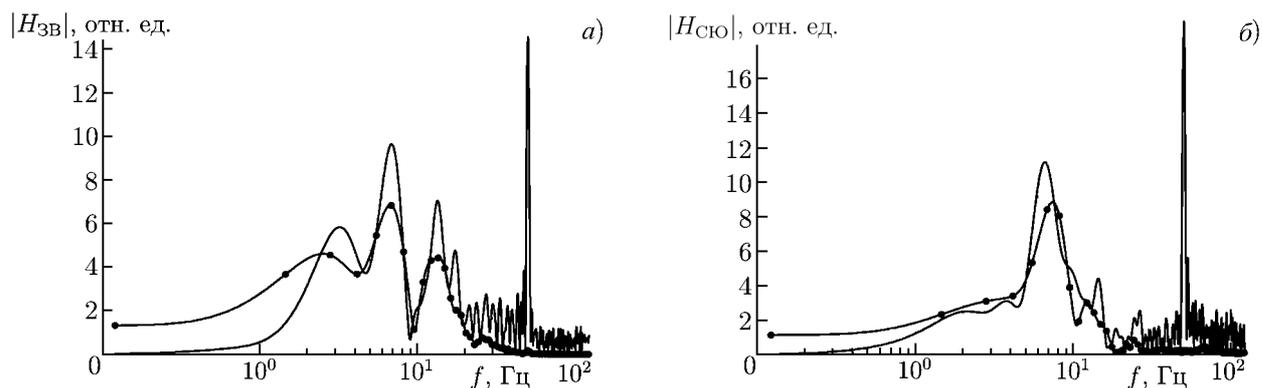


Рис. 8. Амплитудные спектры исходных и отфильтрованных записей СНЧ радиосигнала в Мошири, приуроченных к моменту прихода гамма-всплеска (сплошные линии соответствуют исходным данным, линии с точками — отфильтрованным данным)

искомый СНЧ импульс. Сравнивая между собой нижние графики рис. 7, можно заключить, что импульсы, выделенные алгоритмом «Гусеница», оказываются весьма похожими. При этом надо отметить, что в отфильтрованных записях виден ещё один, более слабый импульс, пришедший в 21:30:26,9 УТ.

Исходные и отфильтрованные записи были подвергнуты спектральной обработке с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье, а соответствующие спектры показаны на рис. 8. Здесь по горизонтальной оси в логарифмическом масштабе показана частота сигнала, а вдоль вертикальной оси отложена спектральная амплитуда. Перед применением быстрого преобразования Фурье мы отцентрировали каждую из записей, т. е. вычли из реализации её среднее значение, а затем дописали сигнал нулями до длительности в 32 768 отсчётов, или 8,162 с. Такая процедура повышает частоту следования спектральных оценок, которые отстоят друг от друга на величину $1/(8,162) \text{ с} = 0,1225189 \text{ Гц}$. Поскольку длительность исходной реализации составляет около 0,5 с, то спектральные отсчёты без процедуры дописывания нулей следовали бы с шагом около 2 Гц.

Мы ограничиваемся частотами ниже 120 Гц, поскольку моделирование показало, что параметрический СНЧ всплеск кроме пика на первом моде шумановского резонанса может иметь только широкий максимум в окрестности 60 Гц. На рис. 8а показан спектр компоненты поля $H_{зв}$, а на рис. 8б — компоненты $H_{сью}$. Видно, что фильтрация сигнала с помощью алгоритма «Гусеница» полностью подавила помехи на промышленной частоте 50 Гц и ослабила интерференцию импульса с выбросами исходной реализации. Рисунок 8 демонстрирует чёткий резонансный пик вблизи 7 Гц в обеих компонентах поля, как и предсказывало моделирование.

Очевидно, что зарегистрированный СНЧ всплеск во многом согласуется с предсказаниями, но в то же время обладает рядом отличий. Укажем сначала свойства импульса, предсказанные теоретически и подтверждаемые измерениями.

1) Время прихода параметрического СНЧ импульса согласуется с моментом снижения нижней ионосферы, вызванным всплеском гамма-излучения. Справедливость этого утверждения иллюстрируется рис. 6–8: всплеск обнаружен в заранее обозначенном временном окне. Дальнейшее уточнение времени прихода не в одной, а в нескольких обсерваториях могло бы уточнить представления о взаимодействии гамма-лучей и атмосферы.

2) Спектры импульса содержат предсказанный максимум в области первого шумановского резонанса.

Экспериментальные сигналы отличаются от предсказаний работы [18]. Главное отличие состоит в отсутствии широкого пика на частоте 60 Гц. Второе отличие состоит в том, что временные

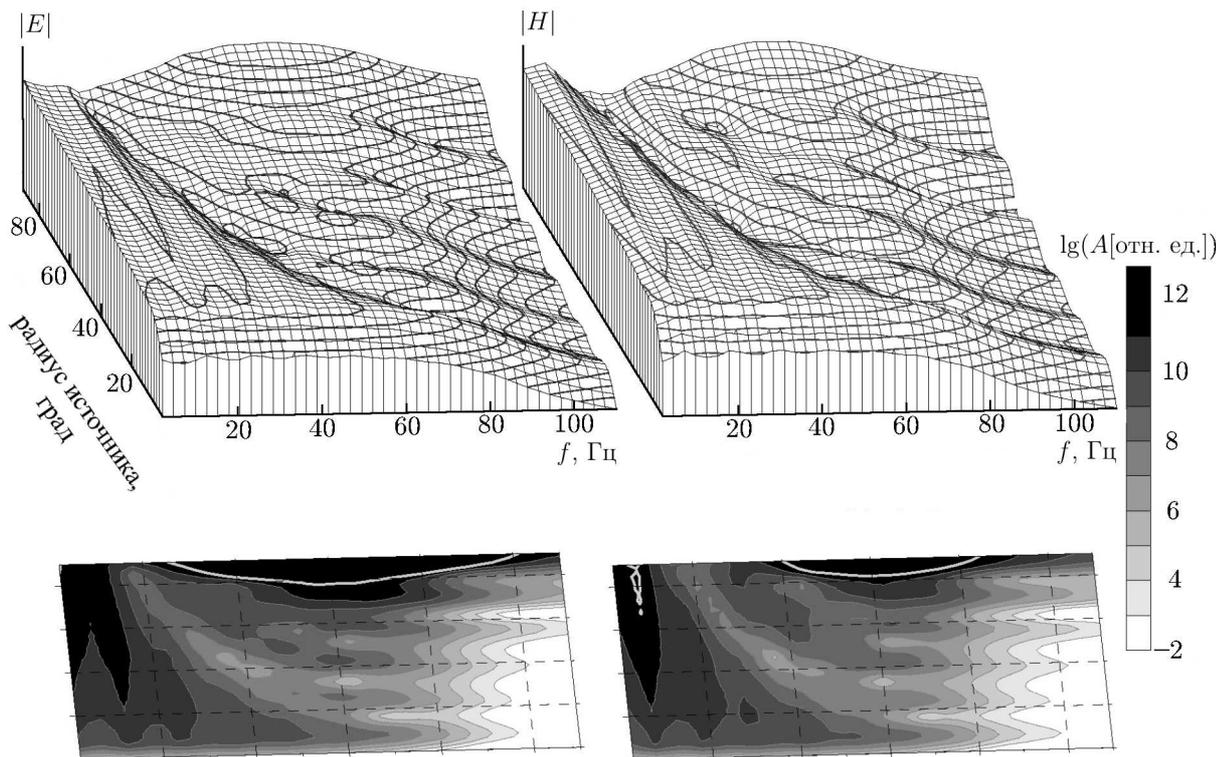


Рис. 9. Измерения спектра параметрического импульса в обсерватории Мошири при различной ширине параметрического источника

вариации зарегистрированного СНЧ всплеска в компонентах поля север–юг и запад–восток имеют разные знаки, тогда как модель предсказывает импульсы одинакового знака, правда, отличающиеся по амплитуде. Такое расхождение показывает, что импульс пришёл не из центра модификации высоты ионосферы, обнаруженного по данным сверхдлинноволновых радиостанций, а из некоторой другой точки.

Такие отклонения нельзя не признать существенными. Отсутствие максимума в окрестности 60 Гц можно связать с несколькими причинами. Прежде всего, размеры параметрического источника могли оказаться меньше, чем полушарие. Расчёты показывают, что широкий пик в окрестности 60 Гц ожидается во всех без исключения обсерваториях, если ширина параметрического источника равна половине Земного шара. Расчёты для источников различной ширины (см. рис. 9) указывают, что «высокочастотный» пик в данных обсерватории Мошири исчезнет, если точки в ионосфере занимают сегмент с радиусом меньшим $60^\circ \div 70^\circ$. В верхней части рис. 9 показаны трёхмерные распределения спектральной амплитуды поля над плоскостью частота–полуширина источника. Ниже приведены те же самые распределения в виде двумерных контурных карт, где логарифм спектральной плотности обозначен тоном заливки. Соответствующая шкала показана справа. Видно, что спектральный пик в окрестности 60 Гц появляется только при большой ширине возмущения ионосферы. Тот же расчёт для других обсерваторий показывает, что пик в окрестности 60 Гц появляется в каждой из них при своём значении ширины источника. Поэтому одновременное наблюдение СНЧ импульса в нескольких обсерваториях позволило бы оценить ширину области, занятой «параметрическими» токами. Данные обсерватории Мошири говорят о том, что размер параметрического источника не превышает $60^\circ \div 70^\circ$.

Второй причиной отсутствия спектрального пика в окрестности 60 Гц могла быть просто-

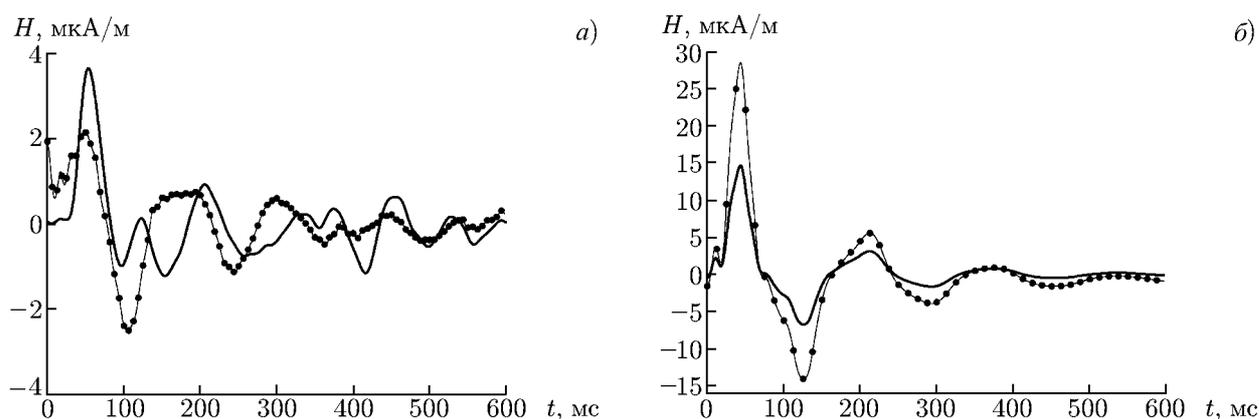


Рис. 10. Сопоставление экспериментальных (а) и расчётных (б) волновых форм импульсов при ширине источника 60° (сплошные линии — компонента поля $H_{ЗВ}$, линии с точками — компонента поля $H_{СЮ}$)

та модели, использованной в работе [18]. Предполагалось, что понижение ионосферы не только охватывает всё дневное полушарие, но и происходит одновременно во всех точках. Поэтому токи элементарных источников оказываются «синфазными». На самом деле сначала снижается «подзенитная» точка, расположенная в центре возмущения, куда гамма-лучи приходят прежде всего. Понижение ионосферы в остальных точках запаздывает, оставаясь постоянным на окружностях, равноудалённых от центра. Задержка τ зависит от углового расстояния ψ от центра неоднородности по закону $\tau = a(1 - \cos \psi)/c$, где a — радиус Земли, а c — скорость света в вакууме.

Если в расчётах учесть фактор запаздывания излучения источника $\exp(-i\omega\tau)$, то форма спектра параметрического СНЧ всплеска действительно изменится. Но в обсерватории Мошири высокочастотный пик не исчезнет. Он уменьшится, а на 60 Гц появится локальный минимум. При этом высокочастотный пик по величине не уступает спектральному максимуму на первом моде шумановского резонанса.

Наконец, самой простой причиной отсутствия пика на 60 Гц может быть слишком медленное снижение ионосферы. Если оно происходит за времена 0,02 с и более, то на частоте 60 Гц излучение параметрического источника будет просто отсутствовать.

На рис. 10 сравниваются экспериментальные и расчётные волновые формы поля при радиусе области, занятой токами, равном 60° . По горизонтальной оси отложено время от начала вспышки в миллисекундах, а по вертикальным осям показана амплитуда всплеска в мкА/м. Сплошные линии показывают вариации компоненты поля $H_{ЗВ}$, а линии с кружками — компоненты поля $H_{СЮ}$. Рисунок 10а приводит экспериментальные волновые формы, выделенные с помощью алгоритма «Гусеница» (знак компоненты $H_{ЗВ}$ изменён на противоположный), а рис. 10б — расчётные. Как видно, модельные и измеренные временные реализации очень похожи по форме, но в то же время почти в десять раз отличаются по амплитуде. На наш взгляд, такое отличие вполне приемлемо. В расчётах принималось, что заряженная стенка полости Земля—ионосфера мгновенно опускается на 20 км на дневном полушарии. Экспериментальные данные говорят, что эффективная амплитуда перемещения была около 2 км. Такое отличие выглядит естественным, если принять во внимание размытость нижней границы ионосферы и конечную проводимость всей толщи атмосферы.

Таким образом, снижение дневной ионосферы кратковременно изменило параметры шумановского резонанса. Область, занятая ионосферным возмущением, по данным обсерватории Мошири

имела радиус не более $60\div 70$ градусов. Гамма-всплеск вызвал токи в атмосфере, ответственные за параметрический СНЧ радиоимпульс. Очевидно, что сопоставление описанных наблюдений с экспериментальными данными других обсерваторий подтвердило бы изменения параметров шумановского резонанса, регистрацию параметрического импульса и позволило бы уточнить параметры возмущения. Можно надеяться, что записи шумановского резонанса позволят получить новую информацию о взаимодействии жёсткого космического излучения с атмосферой Земли.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Модельные и экспериментальные данные указывают на аномалию в сонограмме шумановского резонанса, связанную со всплеском гамма-излучения 27 декабря 2004 года. Для обнаружения изменений пришлось применить специальную спектральную обработку, когда сегменты с длительностью в 10 с используются в процедуре быстрого преобразования Фурье, а спектры, из которых составляется сонограмма, вычисляются с шагом в 1 с. Отдельные спектры сильно изрезаны по частоте и нестабильны во времени, поэтому в сонограмме пришлось применить матричное сглаживание данных 2×3 (по осям частоты и времени). Это означает, что элементарные спектры усреднялись по двум соседним частотам и трём временным сегментам. Только прямое сравнение опытных и расчётных данных позволило обнаружить скачок формы спектра.

Полученные результаты во многом согласуются с выводами работы [3]: случайная природа источников поля приводит к стохастическим динамическим спектрам, что затрудняет обнаружение кратковременного эффекта гамма-вспышки. Спектры шумановского резонанса становятся стабильными при временах накопления $5\div 10$ минут, тогда как воздействие гамма-всплеска ослабевает уже через несколько секунд после события. Для подчёркивания спектральных изменений необходимо применять сонограммы. Возможно, отрицательный результат [3] отчасти объясняется применением усреднённых спектров. К тому же, интенсивность внегалактических гамма-лучей в 2004 году на два порядка превышала поток 1998 года, что могло увеличить продолжительность ионосферного возмущения и тем самым способствовать обнаружению изменений в шумановском резонансе.

Вспышки ионизирующего космического излучения приводят к ионосферным возмущениям разных типов. Если лучи не несут электрического заряда, например, ультрафиолетовое или рентгеновское излучение, то они модифицируют плазму на «освещённом» полушарии. Такое возмущение подобно неоднородности ионосферы день—ночь, оно нарушает сферическую симметрию резонатора Земля—ионосфера и называется асимметричным. Если же дополнительная ионизация вызвана потоком заряженных частиц, например, протонами, электронами или α -частицами, то возмущение ионосферы происходит в полярных широтах северного и южного полушарий. Дело в том, что из-за влияния геомагнитного поля заряженные частицы вторгаются в атмосферу в полярных шапках, и производимые ими возмущения располагаются симметрично относительно магнитных полюсов. Такие возмущения называются симметричными [16]. С помощью теории возмущений можно показать [16], что параметры глобального электромагнитного резонанса изменяются под влиянием симметричных возмущений сильнее, чем под воздействием асимметричных. Поэтому в шумановском резонансе хорошо обнаруживаются вариации, связанные с солнечными протонными событиями, тогда как влияние модификаций ионосферы, вызванных ультрафиолетовыми и рентгеновскими вспышками на Солнце, обнаруживают с большим трудом, если их обнаруживают вообще. Поэтому даже гигантский гамма-всплеск 27 декабря 2004 года не привёл к продолжительным и контрастным изменениям шумановского резонанса, сравнимым с влиянием солнечных протонных событий.

Изменения амплитуды сверхдлинноволновых сигналов отчётливо видны в записях 27 декабря

2004 года [4, 5]. Возможно, аналогичные изменения были бы видны и в записях радиосигналов от СНЧ передатчиков. Что же касается естественного радиосигнала, то ожидаемый эффект маскируется случайной природой импульсных грозовых источников. Поэтому желательно провести аналогичную обработку всех доступных записей и сравнить экспериментальные сонограммы с соответствующими вычислениями.

Для успешного обнаружения аномалий шумановского резонанса, связанных с гамма-всплеском, пришлось преодолеть серьёзные препятствия. Глобальные по своим масштабам асимметричные изменения ионосферы слишком кратковременны, чтобы заметным образом и надолго изменить структуру резонанса. Это заключение подтверждено выводами работы [3] об устойчивости глобального электромагнитного резонанса к быстрым вариациям среды распространения. Только специальное сравнение модельных и экспериментальных данных позволило выявить влияние гигантской гамма-вспышки 27 декабря 2004 года. Справедливы следующие выводы.

а) В момент гамма-всплеска произошло снижение всех параметров резонанса (пиковых частот, амплитуды и добротности). Начало изменений совпадает с приходом гамма-лучей. Впоследствии наблюдается тенденция к восстановлению обычной структуры резонанса.

б) Кратковременность события совместно с нестационарностью СНЧ радишума затрудняет обнаружение эффекта. Стандартные интегральные спектры шумановского резонанса маскируют изменения настолько, что они становятся неразличимыми.

в) Только прямое сопоставление экспериментальных и расчётных сонограмм позволило обнаружить глобальное изменение ионосферы, вызванное гамма-всплеском.

Наблюдения подтвердили предсказания о том, что резкое снижение ионосферы может возбудить СНЧ радиоимпульс, по времени совпадающий с приходом гамма-лучей. Регистрация импульса служит прямым доказательством того, что между Землёй и ионосферой действительно имеется постоянная разность потенциалов, поскольку движение только заряженной ионосферы порождает токи, возбуждающие СНЧ всплеск.

а) В момент модификации нижней ионосферы гамма-лучами в записи обсерватории Мошири обнаружен СНЧ радиоимпульс.

б) Спектр параметрического импульса содержит один хорошо различимый пик на первом моде шумановского резонанса, что согласуется с предсказанием теории.

в) Отсутствие широкого пика в окрестности 60 Гц указывает на то, что радиус ионосферного возмущения не превышал $60^\circ \div 70^\circ$.

г) Необычная полярность импульсов в компонентах поля $H_{СЮ}$ и $H_{ЗВ}$ не согласуется с направлением на центр ионосферного возмущения, найденный по сверхдлинноволновым наблюдениям.

д) В дальнейшем желательно сравнить доступные записи шумановского резонанса из различных обсерваторий, что позволило бы подтвердить модификацию глобального электромагнитного резонанса и приём параметрического СНЧ радиоимпульса в других обсерваториях. Такое сравнение позволило бы уточнить параметры ионосферных изменений и повысить точность оценки размеров возмущения.

Записи шумановского резонанса, полученные в других обсерваториях, способны предоставить материал, уточняющий представление о взаимодействии жёсткого ионизирующего космического излучения с мезосферой — областью, недоступной для радиоволн более высоких частот.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Williams E. R., Mushtak V., Nickolaenko A. P. // J. Geophys. Res. D. 2006. V. 111. P. 16107.
2. Pechony O., Price C. // Radio Sci. 2004. V. 39. P. RS5007.
3. Price C., Mushtak V. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 1043.

4. Inan U. S., Lehtinen N. G., Lev-Tov S. J., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. P. 3357.
5. Inan U. S., Lehtinen N. G., Moore R. C., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. P. L08103.
6. Terasawa T., Tanaka Y. T., Takei Y., et al. // *Nature*. 2005. V. 434. P. 1110.
7. Tanaka Y. T., Terasawa T., Yoshida M., et al. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. A07307.
8. Hurley K., Boggs S. E., Smith D. M., et al. // *Nature*. 2005. V. 434. P. 1098.
9. Николаенко А. П., Хайакава М. // *Радиофизика и электроника*. 2010. Т. 15, № 1. С. 78.
10. Greifinger C., Greifinger P. // *Radio Science*. 1978. V. 13. P. 831.
11. Николаенко А. П., Рабинович Л. М. // *Космические исследования*. 1982. Т. 20, вып. 1. С. 82.
12. Кириллов В. В. // *Проблемы дифр. и распр. радиоволн*. 1993. Вып. 25. С. 35.
13. Кириллов В. В. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1996. Т. 39, № 9. С. 1103.
14. Кириллов В. В., Копейкин В. Н. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2002. Т. 45, № 12. С. 1011.
15. Mushtak V. C., Williams E. R. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 1989.
16. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. *Resonances in the Earth-ionosphere cavity*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2002. 380 p.
17. Pechony O., Price C., Nickolaenko A. P. // *Radio Sci.* 2007. V. 42. P. RS2S06.
18. Николаенко А. П. // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 4. С. 235.
19. Ruscroft M. J., Harrison R. G., Nicoll K. A., Mareev E. A. // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 83.
20. Данилов Д. Л., Жиглявский А. А. *Главные компоненты временных последовательностей: метод «Гусеница»*. СПб: Изд-во СПбГУ, 1997. 307 с.
21. Марпл-мл. С. Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. М.: Мир, 1990. 584 с.

Поступила в редакцию 8 августа 2010 г.; принята в печать 17 октября 2011 г.

IMPACT OF A GAMMA-RAY BURST ON THE SCHUMANN RESONANCE

A. P. Nickolaenko, I. G. Kudintseva, O. Pechonaya, M. Hayakawa, T. Nakamura, Ya. Habara, and Ya. Tanaka

We compare the experimental and simulated data on the impact of an extragalactic gamma-ray burst of December 27, 2004 on the global electromagnetic resonance. It is known from measurements of the signals of ultralong-wave radio stations that the ionizing radiation descended the ionosphere over the dayside hemisphere by 20 km. Such a disturbance should change the eigenfrequencies of the Earth-ionosphere cavity and affect the shape of the observed spectrum of extremely low-frequency Earth's radio noise. The results of observations and modeling of the Schumann resonance variation under the action of a gamma-ray burst are compared. We employ two models. In the simpler one, the ionospheric disturbance is averaged over the entire globe. The second model allows for the day-night nonuniformity. It is shown that both models yield similar predictions and the effect little depends on the day-night nonuniformity. Since the ionosphere carries the positive electric charge, its vertical displacement causes a current which serves as a "parametric" impulse source of the electromagnetic field. The global size of the source results in that the pulse contains only the lower frequency of the Schumann resonance. The extremely low-frequency pulse coincides in time with the gamma-ray burst arrival. The results of observations in the Moshiri observatory (Japan) at the time of a gamma-ray burst, which are compared with the calculation for this observatory are presented. It is shown that both a modification of the Schumann resonance sonogram and a parametric extremely low-frequency radio pulse have been detected in the record.