

УДК 550.388.22+521.37

## МНОГОПУНКТОВОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СВЕРХНИЗКОЧАСТОТНОГО ВСПЛЕСКА, ВЫЗВАННОГО КОСМИЧЕСКОЙ ВСПЫШКОЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ 27 ДЕКАБРЯ 2004 ГОДА

*А. П. Николаенко*<sup>1</sup>, *А. Ю. Щекотов*<sup>2\*</sup>, *М. Хайакава*<sup>3,4</sup>,  
*Я. Хобара*<sup>4</sup>, *Г. Шатори*<sup>5</sup>, *Й. Бор*<sup>5</sup>, *М. Нешка*<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАНУ, г. Харьков, Украина

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт сейсмоэлектромагнетизма, Университет электросвязи, г. Токио, Япония

<sup>4</sup> Университет электросвязи, г. Токио, Япония

<sup>5</sup> Научно-исследовательский центр астрономии и наук о Земле Венгерской академии наук,  
г. Шопронь, Венгрия

<sup>6</sup> Институт геофизики Польской академии наук, г. Варшава, Польша

Представлены синхронизированные метками времени GPS экспериментальные записи радиоимпульса, связанного с вспышкой гамма-излучения 27 декабря 2004 года. Они были получены в обсерваториях Мошири и Онагава (Япония), Эсранге (Швеция), Карымшино (Камчатка, Россия), Надьченк (Венгрия) и Хорнзунд (Шпицберген, Польша). Данные демонстрируют исключительное сходство и содержат характерные импульсы, соответствующие времени прихода гамма-лучей. Обработка сигналов показала, что, помимо совпадения во времени, подтверждаются следующие модельные предсказания: радиоимпульсы содержат сигнал на основной частоте шумановского резонанса, источник поля имеет положительную полярность (ток направлен из ионосферы на землю), поляризация горизонтального магнитного поля радиоволны практически линейна, направления на источник указывают на эпицентр столкновения потока гамма-квантов с ионосферой. Эти свойства соответствуют концепции параметрического электромагнитного импульса, возникшего благодаря значительному изменению тока глобальной электрической цепи, вызванному космической гамма-вспышкой.

### ВВЕДЕНИЕ

27 декабря 2004 года была зарегистрирована вспышка гамма-излучения от магнитара SGR 1806–20 [1–7], которая оказалась самой интенсивной в истории наблюдений космических гамма-лучей: зарегистрированная плотность потока энергии на три порядка превзошла аналогичную величину в наиболее сильных солнечных рентгеновских вспышках. Гамма-кванты резко изменили высотный профиль электронной концентрации в нижней ионосфере, из-за чего внезапно изменились амплитуды и фазы в транстихоокеанских записях сигналов сверхдлинноволновых передатчиков [8] (сверхдлинные, или очень низкочастотные, волны занимают диапазон от 3 до 30 кГц). Перед модификацией искусственных радиосигналов возрос естественный очень низкочастотный шум. Эпицентр области, освещенной гамма-лучами, имел географические координаты 20,4° ю. ш. и 146,2° з. д., практически совпал с центром дневного полушария и располагался всего в 450 км от «подсолнечной» точки.

Начало гигантской гамма-вспышки было зарегистрировано в 21 ч 30 мин и 26,35 с мирового времени (UT) спутником GEOTAIL (см., например, [5]). Используя известное положение последнего, можно рассчитать время прихода гамма-лучей в центр Земли [9], равное 21:30:26,65 UT. Задержка во времени между приходом излучения вспышки в эпицентр возмущения на поверхности Земли и в центр планеты составляет 21 мс.

\*checkit@post.ru

В предыдущих публикациях [9–12] был описан электромагнитный импульс, обнаруженный в записях разных пунктов наблюдения шумановского резонанса, связанный по времени с началом гамма-вспышки. В настоящей работе мы собрали воедино все известные нам экспериментальные записи, полученные в шести обсерваториях мира. Пункты наблюдения были следующими: японские обсерватории Мошири ( $44,37^\circ$  с. ш. и  $142,24^\circ$  в. д.) и Онагава ( $38,43^\circ$  с. ш. и  $141,48^\circ$  в. д.), обсерватория Эсранге, Швеция ( $67,83^\circ$  с. ш. и  $21,1^\circ$  в. д.), Карымшино, Россия ( $52,83^\circ$  с. ш. и  $158,13^\circ$  в. д.), Надьченк, Венгрия ( $47,6^\circ$  с. ш. и  $16,7^\circ$  в. д.) и польская станция Хорнзунд на Шпицбергене ( $77,0^\circ$  с. ш. и  $15,5^\circ$  в. д.). В Эсранге, Онагаве и Карымшино записывались две ортогональные горизонтальные компоненты магнитного поля, а в Мошири, Надьченке и Хорнзунде регистрировались две горизонтальные магнитные компоненты и вертикальное электрическое поле. Последнее позволяет установить полярность источника и устранить неоднозначность его пеленга. К сожалению, ни в одной из обсерваторий не удалось получить одновременные высококачественные записи всех трёх компонент поля. Записи синхронизировались метками времени GPS, так что предельные отклонения индивидуальных отсчётов времени не превышают нескольких миллисекунд. Магнитные антенны всех обсерваторий были ориентированы по географическим сторонам света, и только в Карымшино они были направлены вдоль геомагнитных координат.

Мы демонстрируем исключительно высокое подобие записей, собранных во всём мире. В частности, они содержат пару характерных сверхнизкочастотных всплесков, записанных в непосредственной близости от времени прихода излучения космической гамма-вспышки. Возникновение электромагнитных импульсов ожидалось как результат импульсной модификации тока глобальной электрической цепи над акваторией Тихого океана [13–16]. Модельные вычисления облегчили поиск параметрических сверхнизкочастотных всплесков, указав на их следующие ожидаемые свойства.

- 1) Появление сверхнизкочастотного всплеска привязано по времени к моменту прихода гамма-квантов.
- 2) Спектр сигнала содержит только самый низкий мод шумановского резонанса.
- 3) Полярность источника должна быть положительной (ток направлен из ионосферы на землю). Это означает, что начало импульса в вертикальной компоненте электрического поля должно быть отрицательным (направленным вниз).
- 4) Импульсное магнитное поле должно быть линейно поляризованным при условии, что изменения тока утечки глобальной электрической цепи были симметричными в пространстве относительно центра возмущения.
- 5) Радиоволны должны приходить примерно от центра возмущения, имеющего координаты  $20,4^\circ$  ю. ш. и  $146,2^\circ$  з. д.
- 6) Амплитуда импульса должна заметно превышать фоновый сигнал шумановского резонанса.

Ниже мы кратко опишем приёмное оборудование, приведём экспериментальные записи, отметим основные особенности обработки сигналов и сравним данные наблюдений с модельными предсказаниями для характерных пунктов наблюдения и определённых компонент поля.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Ортогональные компоненты горизонтального магнитного поля регистрировались на всех обсерваториях с помощью индукционных магнитометров. Оборудование, используемое в каждой обсерватории, было разным. Оно было разработано и изготовлено экспериментаторами независимым образом. Детальное описание приёмной аппаратуры можно найти в работах [17–25]. Датчики имеют много общего, поскольку все они предназначены для исследования глобального электромагнитного (шумановского) резонанса. В пунктах наблюдения применяются различные частоты

дискретизации: 4 000 Гц на Мошири, 400 Гц в Онагаве и Эсранге, 150 Гц в Карымшино, примерно 514 Гц в Надьченке и 100 Гц в Хорнзунде.

На рис. 1 представлены записи, сделанные одновременно в шести далеко разнесённых обсерваториях. Часть из них была опубликована в работах [9, 11], часть публикуется впервые. Мировое время (по Гринвичу) отложено вдоль оси абсцисс в интервале  $\pm 1,5$  с в окрестности 21:30:26,5 UT. Верхний график показывает изменения вертикального электрического поля  $E$  в обсерватории Надьченк. Остальные графики на рисунке отображают парные записи ортогональных компонент магнитного поля  $H_{ЗВ} = H_X$  и  $H_{ЮС} = H_Y$  в других обсерваториях. Напряжённости полей даны в относительных единицах. Нам пришлось изменить знак компоненты  $H_{ЗВ}$  в Мошири, поскольку отклонения в знаке были обнаружены в предыдущих работах, когда анализировались записи атмосфериков от известных источников [19, 23, 24]. Прежде чем построить графики на рис. 1, мы применили сингулярный спектральный анализ по алгоритму «Гусеница» [26, 27]. Это позволило удалить высокочастотные шумы и остатки помехи на частоте 50 Гц.

Рисунок 1 демонстрирует выдающееся сходство записей, собранных при глобальном разнесении пунктов наблюдения, хотя в графиках, конечно, присутствуют некоторые отклонения. Они объясняются различными условиями распространения и влиянием местных шумов. Естественно, сказываются и различия частотных характеристик приёмного оборудования обсерваторий. Однако мы решили использовать эти записи такими, как они есть.

Над временной осью рис. 1 размещены три горизонтальные полосы чёрного цвета. Каждая из этих полос обозначает интервал, содержащий характерные фрагменты импульсного сигнала:  $26,3 \div 26,4$ ;  $26,5 \div 26,6$  и  $26,7 \div 26,95$  с. В этих интервалах по записям горизонтального магнитного поля определялось направление прихода волны, т.е. азимут источника  $A_Z$ . Азимут  $A_Z$  — это угол между направлением на север (ось  $Y$  локальной системы координат) и малой осью эллипса поляризации волны. Азимут отсчитывается, как на компасе, от направления на север по часовой стрелке. Поляризационные характеристики магнитного поля рассчитывались по элементам  $P_{YY}$ ,  $P_{XX}$  и  $P_{XY}$  матрицы когерентности

$$\begin{pmatrix} P_{XX} & P_{XY} \\ P_{YX} & P_{YY} \end{pmatrix}.$$

Последние находят из спектров ортогональных компонент магнитного поля, см ниже.

Мы применили специальную технику вейвлет-преобразования для нахождения пеленга (азимута) источника [19, 23, 24]. Вместо преобразования Фурье, она использует разложение поля по комплексным гауссовым вейвлетам третьего порядка. Вспомогательный угол  $\theta$  между осью  $X$ , направленной с запада на восток, и большой осью эллипса находится с помощью уравнения

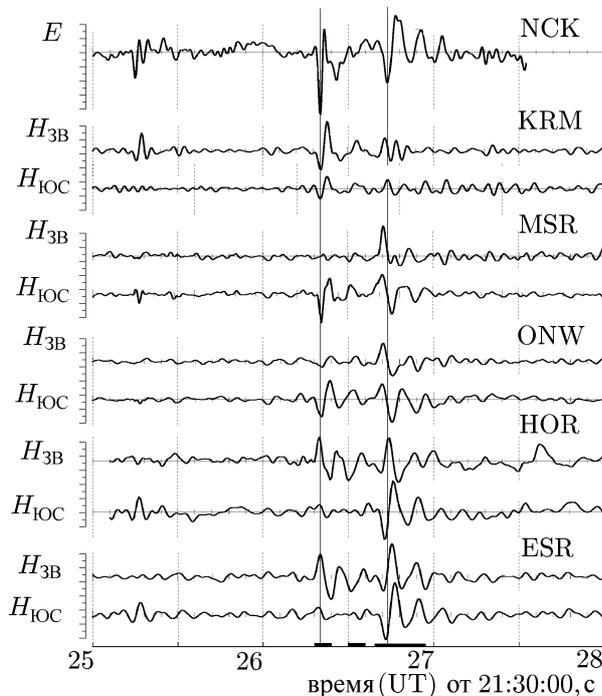


Рис. 1. Записи глобальной сети обсерваторий шумановского резонанса: NCK — Надьченк, KRM — Карымшино, MSR — Мошири, ONW — Онагава, HOR — Хорнзунд, ESR — Эсранге. По горизонтальной оси отложено мировое (гринвичское) время в окрестности момента гамма-вспышки

$$\tan(2\theta) = \frac{2 \operatorname{Re} P_{YX}}{P_{XY} - P_{XX}}, \quad (1)$$

где элементы матрицы когерентности выражаются через вторые статистические моменты спектральной плотности ортогональных компонент горизонтального магнитного поля:  $P_{XX} = \langle H_{3B} H_{3B}^* \rangle$ ,  $P_{YY} = \langle H_{ЮС} H_{ЮС}^* \rangle$  и  $P_{YX} = \langle H_{ЮС} H_{3B}^* \rangle$ , звёздочка обозначает комплексное сопряжение [28].

Угол  $\theta$  лежит в интервале от  $-\pi/2$  до  $\pi/2$  при условии, что в выражении (1) учитываются знаки числителя и знаменателя. В случае использования компонент геомагнитного поля  $H$  и  $D$  азимут источника находится как

$$A_Z = (90^\circ - \theta - G) \pm 90^\circ, \quad (2)$$

где  $G$  обозначает геомагнитное склонение обсерватории. При использовании географических координат в уравнение (2) подставляют  $G = 0$ .

Для каждого момента времени использовалось вейвлет-преобразование каждой из компонент поля. Так получался ансамбль азимутов относительно частоты (временного масштаба вейвлета). Средний азимут источника оценивался усреднением в полосе частот вейвлета  $3 \div 20$  Гц. Одновременно с этим определялось стандартное отклонение азимута [19, 23, 24]. Средние углы прихода использовались при построении азимутальной гистограммы с разрешением  $10^\circ$ . Данные каждой обсерватории были представлены в виде угловых диаграмм, наложенных на глобус. Мы также находили попутно эллиптичность  $e_l$  сигнала, связанную с отношением малой и большой осей эллипса поляризации:

$$e_l = \operatorname{tg} \beta, \quad (3a)$$

где

$$\beta = -\frac{1}{2} \arcsin \left[ \frac{2 \operatorname{Im} P_{YX}}{\sqrt{(P_{YY} - P_{XX})^2 + 4 |P_{YX}|^2}} \right]. \quad (3b)$$

Знак угла  $\beta$  определяет тип поляризации радиоволны.левой поляризации соответствуют положительные  $\beta$ , а правой — отрицательные. Поляризация становится линейной, когда  $\beta = 0$ . Средняя эллиптичность и её стандартное отклонение получались аналогично азимуту источника: для каждого момента времени проводилось усреднение в диапазоне частот вейвлета  $3 \div 20$  Гц.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Рисунок 2 показывает эволюцию записанного магнитного поля в окрестности  $\pm 0,5$  с момента прихода гамма-излучения. Верхний ряд графиков содержит импульсы для горизонтального магнитного поля в разных обсерваториях. На них компонента  $H_{ЮС}$  показана чёрным цветом,  $H_{3B}$  — серым цветом. Следующие ряды графиков (сверху вниз) показывают фигуры Лиссажу записанных сигналов, пеленг источника, эллиптичность поля и вейвлет-спектры полной амплитуды магнитного поля. Верхний ряд графиков позволяет усмотреть связь динамических характеристик с конкретными фрагментами записи. Вертикальные пунктирные линии отмечают момент  $t = 0$ , или 21:30:26,5 UT.

Фигуры Лиссажу (т.е. годографы поля) иллюстрируют типичную проблему: импульсы, как правило, имеют не линейную, а эллиптическую поляризацию. Поэтому определение азимута источника оказывается иногда сложной задачей, тогда как для линейной поляризации угол прихода

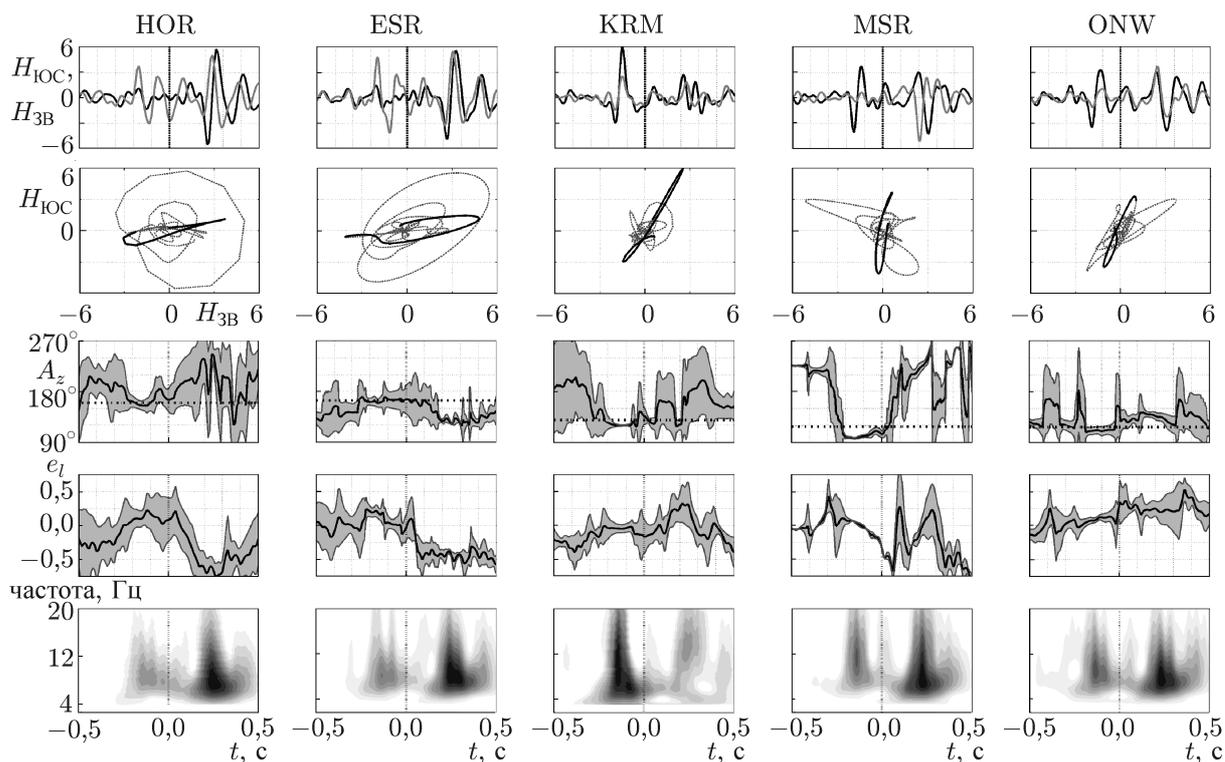


Рис. 2. Результаты обработки сигнала в интервале  $\pm 0,5$  с относительно времени гамма-вспышки. Момент  $t = 0$  соответствует 21:30:26,5 UT. На верхних панелях показан вид компонент сигнала в относительных единицах во временной области для каждого пункта. Компонента  $H_{ЮС}$  показана чёрной линией, компонента  $H_{ЗВ}$  — серой. В следующем ряду показаны построенные по ним фигуры Лиссажу. В среднем горизонтальном ряду чёрными линиями показаны усреднённые по частоте азимуты источников сигнала, серым фоном показано их стандартное отклонение и горизонтальными пунктирными линиями — истинный азимут источника. На двух нижних рядах панелей показаны эллиптичность поляризации сигнала и его спектры, наблюдаемые в разных пунктах. Везде, кроме второго ряда, по горизонтальным осям отложено одно и то же время

находится довольно просто. Это хорошо видно на примере первого из двух импульсов. Его фигура Лиссажу прорисована чёрной жирной линией в отличие от остального интервала, показанного более тонкой серой пунктирной линией.

Третья строка графиков представляет статистику азимута источника. Здесь жирные линии показывают средний азимут. Горизонтальная пунктирная прямая отвечает геометрическому направлению от обсерватории к центру области, освещённой гамма-лучами, — к эпицентру возмущения. Затемнённая область вокруг среднего азимута указывает зону шириной в стандартное отклонение. Можно видеть, что, несмотря на сложные фигуры Лиссажу, экспериментальные данные всё же позволяют обнаружить интервалы со стабильным пеленгом источника, связанные с конкретными элементами импульсов. Как видно, извлечение подобной информации с помощью обычных фигур Лиссажу не всегда возможно.

Четвёртый ряд графиков сверху на рис. 2 показывает изменения эллиптичности поля. Среднее значение снова представлено жирной чёрной линией, а стандартное отклонение описывается затемнённой областью вокруг этой линии. В самом нижнем ряду графиков показаны вейвлет-спектры полного магнитного поля в относительных единицах в полосе частот от 2 до 20 Гц (временные масштабы от 0,05 до 0,5 с).

Рисунок 2 иллюстрирует тот факт, что фигуры Лиссажу не всегда гарантируют определение

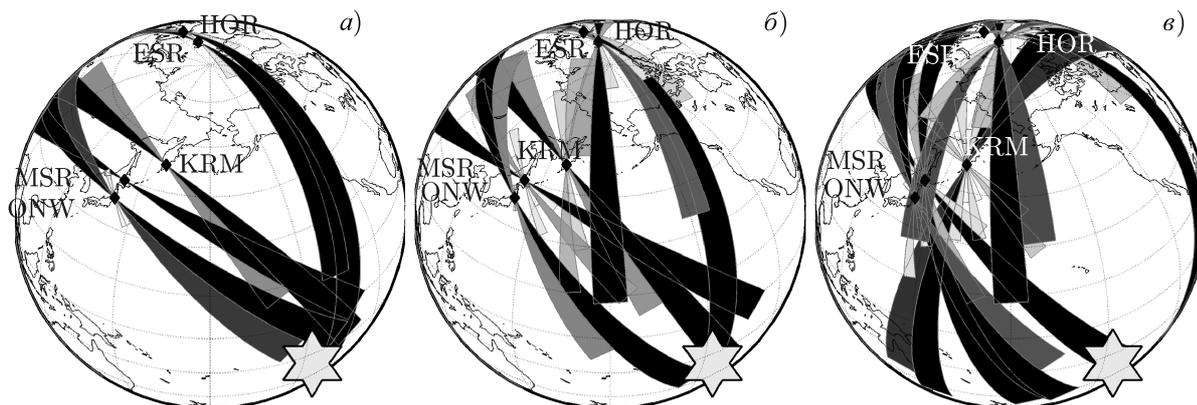


Рис. 3. Гистограммы распределений пеленга источника, показывающие триангуляцию последнего на глобусе для трёх интервалов времени  $t$ :  $a - t = -(0,2 \div 0,1)$  с,  $b - t = 0,0 \div 0,1$  с и  $c - t = 0,2 \div 0,45$  с. Пункты наблюдения показаны ромбами, а эпицентр источника — звездой

пеленга источника, тогда как вейвлет-преобразование с последующей статистической обработкой позволяет выделить временные интервалы, когда азимут стабилен и указывает на центр атмосферной модификации. В интервалах стабильного угла прихода сигнала горизонтальное магнитное поле оказывается, как правило, линейно поляризованным.

Горизонтальные компоненты магнитного поля содержат два хорошо различимых импульса, приходящих на временные интервалы стабильного азимута. Динамические спектры показывают, что энергия обоих импульсов максимальна на частотах около первого шумановского резонанса. Все перечисленные особенности сигнала отвечают модельным ожиданиям для параметрического сверхнизкочастотного всплеска.

Местоположение источника можно определить по известным пеленгам глобально разнесённых обсерваторий. На рис. 3 мы сравниваем результаты триангуляции источника с координатами гамма-вспышки для трёх временных интервалов:  $t = -(0,2 \div 0,1)$  с ( $a$ ),  $t = 0,0 \div 0,1$  с ( $b$ ) и  $t = 0,2 \div 0,45$  с ( $c$ ).

Круговые диаграммы на рис. 3 изображают триангуляцию в сферической проекции. Длина лепестков угловых гистограмм и их почернение пропорционально количеству случаев, когда пеленг источника попадал в конкретный сектор. Пункты наблюдения показаны чёрными ромбами, а звезда обозначает центр области, освещённой гамма-вспышкой. Как и ранее, сокращения ESR, KRM, MSR, HON и ONW обозначают обсерватории Эсранге, Карымшино, Мошири, Хоризунд и Онагава. Из рис. 3 видно, что пеленги, как правило, указывают на центр возмущения для первого и второго временных интервалов. Они отвечают приходу прямой и антиподной волн первого импульса. В третьем временном интервале наблюдается заметный разброс пеленгов. Разброс координат источника легко объясняется сравнительно небольшим отношением сигнал/шум, равным примерно 5. Отклонения пеленгов от направления на центр возмущения могут также объясняться асимметрией пространственного распределения токов глобальной электрической цепи.

Наблюдения отдельных обсерваторий соответствуют ожиданиям. Направления на источник пересекаются в дневном полушарии, а их рассеяние косвенно указывает на пространственную асимметрию токов параметрического источника, созданного гамма-лучами. Такая асимметрия выглядит естественной, если учесть, что токи заряда глобальной электрической цепи преимущественно сосредоточены над грозowymi очагами, которые наиболее активны в послеполуденное местное время. В то же время токи утечки глобальной цепи связаны с областями ясной погоды. Кроме того, модификации этих токов должны зависеть от рельефа местности. Таким образом,

трудно ожидать однородного пространственного распределения токов утечки.

Наконец, мы должны заметить, что «преждевременный» импульс, наблюдавшийся в первом временном интервале, т. е. до регистрации основного гамма-всплеска, можно увязать с увеличением радиопомех на сверхдлинных волнах, упоминавшихся в работе [8]. Такое увеличение легко объяснить предварительной модификацией глобальной электрической цепи. В частности, токи заряда и утечки могут модулироваться до прибытия основного потока гамма-квантов из-за изменения проводимости воздуха над активными грозowymi ячейками и над такими структурами Тихого океана, как архипелаги. Эти быстрые предварительные изменения могут породить случайное импульсное излучение в сверхдлинноволновом диапазоне, воспринимаемое как «дискретный шум». На частотах глобального резонанса из-за громадной длины волны такие источники сливаются в один структурированный источник. Основной поток гамма-излучения, приходящий позднее, вызывает резкие изменения в ионосфере и соответствующий *trimri*-эффект в записях сверхдлинноволновых передатчиков [8, 29]. Он также модулирует структуру спектров шумановского резонанса, наблюдавшуюся в работах [12–15], и вызывает второй параметрический импульс [9, 11]. Этот всплеск будет связан с иным пространственным распределением параметрического тока.

### 3. СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ МОДЕЛИ И НАБЛЮДЕНИЙ

При моделировании мы рассматривали наиболее простое изменение параметрического тока, вызванное ионизирующим излучением, однородно распределённым в пространстве [16]. Космические гамма-лучи увеличивают проводимость воздуха между землёй и ионосферой, и ток утечки внезапно возрастает. Событие начинается тогда, когда ионизирующее излучение достигает слоя, где сосредоточена основная часть сопротивления воздуха, т. е. верхних слоёв тропосферы (см., например, [30]). Используя время регистрации гамма-вспышки, можно оценить время начала изменений величиной 21:30:26,67 UT [9]. Модификация проводимости запаздывает при удалении от этой точки из-за кривизны Земли. В точке, удалённой от эпицентра на угловое расстояние  $\alpha$ , задержка во времени составит  $\tau = a \cos(\alpha)/c$ , где  $a$  — радиус Земли,  $c$  — скорость света. Будем считать в дальнейшем, что космическое излучение скачком удваивает ток утечки от его регулярной плотности 1 пА/м<sup>2</sup> до 2 пА/м<sup>2</sup>. Модификация длится 1/60 секунды, а затем плотность тока возвращается к обычному значению.

Элементарный токовый момент такого типа имеет постоянную спектральную плотность в полосе частот шумановского резонанса. По сверхдлинноволновым наблюдениям в Антарктике [8] гамма-лучи осветили, по крайней мере, сектор с угловой полушириной 60° от эпицентра. Мы примем, что изменения занимают сектор такого же размера. Элементарный момент тока, относящийся к столбу воздуха с площадью сечения 1 м<sup>2</sup>, равен произведению высоты ионосферы (60 км) на дополнительную плотность тока (1 пА/м<sup>2</sup>). Такой источник создаёт элементарное поле, а полное поле создаётся суммой таких полей. В расчётах использованы частотные спектры элементарных полей с учётом задержек, вызванных кривизной Земли, в однородной по угловым координатам модели полости Земля—ионосфера. Компоненты электромагнитного поля от источника с единичным моментом тока  $M_C(\omega) = 1$  находятся из уравнений [13, 31]:

$$e_r(\omega, \theta_H) = \frac{1}{4ha^2\varepsilon_0} \frac{i\nu(\nu+1)}{\omega} \frac{P_\nu[\cos(\pi - \theta_H)]}{\sin \pi\nu}, \quad (4)$$

$$h_X(\omega, \theta_H) = h_\varphi(\omega, \theta_H) \cos A_Z, \quad (5)$$

$$h_Y(\omega, \theta_H) = h_\varphi(\omega, \theta_H) \sin A_Z, \quad (6)$$

$$h_{\varphi}(\omega, \theta_H) = - \frac{P_{\nu}^1[\cos(\pi - \theta_H)]}{4\pi a \sin \pi \nu}. \quad (7)$$

Здесь  $e_r$  и  $h_{\varphi}$  — вертикальное электрическое и горизонтальное магнитное поля,  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума, а  $P_{\nu}(x)$  и  $P_{\nu}^1(x)$  — функция Лежандра и присоединённая функция Лежандра,  $\nu$  — комплексная постоянная распространения в полости Земля—ионосфера,  $\theta_H$  — угловое расстояние от источника до приёмника,  $A_Z$  — азимут источника. Используется географическая система координат с осью  $Y$ , направленной с юга на север вдоль меридиана, и осью  $X$ , направленной с запада на восток. Азимут отсчитывается по часовой стрелке от направления на Северный полюс.

В расчётах используется эвристическая линейная зависимость постоянной распространения [31, 32]:

$$\nu = \frac{f[\Gamma_{\Pi}] - 2}{6} - i \frac{f[\Gamma_{\Pi}]}{100}. \quad (8)$$

Оценки проводились с функцией  $\nu(f)$ , соответствующей так называемой «модели колена» [13–15, 32–34]. Оказалось, что вид функции  $\nu(f)$  играет второстепенную роль и мало влияет на форму импульсного сигнала. Причина состоит в том, что спектр параметрического импульса занимает слишком узкую полосу частот, чтобы можно было заметить отличия моделей для вычисления постоянной распространения.

Поле, создаваемое пространственно распределёнными токами, является свёрткой спектров (4)–(7) с пространственным распределением момента тока источника  $M_C(\beta, \psi)$ :

$$E_r = \int_0^{\pi} d\beta \beta \int_0^{2\pi} d\psi e_r(\cos \gamma) M_C(\beta, \psi), \quad (9)$$

$$H_X = \int_0^{\pi} d\beta \beta \int_0^{2\pi} d\psi h_{\varphi}(\cos \gamma) M_C(\beta, \psi) \cos A_Z, \quad (10)$$

$$H_Y = \int_0^{\pi} d\beta \beta \int_0^{2\pi} d\psi h_{\varphi}(\cos \gamma) M_C(\beta, \psi) \sin A_Z. \quad (11)$$

Здесь углы  $\beta$  и  $\psi$  обозначают соответственно сопряжённую широту и долготу текущего элемента тока относительно эпицентра вспышки,  $\gamma(\beta, \psi)$  — угловое расстояние от обсерватории до элемента тока и  $A_Z(\beta, \psi)$  — пеленг элемента тока из точки наблюдения.

Операция свёртки имеет простой физический смысл. Параметрический источник состоит из малых элементов, каждый из которых даёт свой вклад в результирующее поле. Поля элементарных излучателей приходят к наблюдателю со своими амплитудами и фазами. Суммируя их с учётом всех перечисленных факторов, мы получаем результирующий спектр выбранной компоненты поля. Такая операция и есть свёртка поля с элементарными источниками. Вводя «малые» элементы источника, мы должны помнить, что рассматриваемая длина волны сравнима с длиной экватора 40 Мм. Поэтому размеры элементарного источника могут оставаться большими в общепотребительном смысле. Мы использовали элементарные ячейки с размерами  $5,8^{\circ}$  по углу  $\beta$  и  $24^{\circ}$  по углу  $\psi$ .

Заранее очевидно, что параметрический источник, сопоставимый по размерам с полушарием, способен возбуждать только первый (основной) мод шумановского резонанса. Дело в том, что волны, приходящие от удалённых участков большого источника, гасят друг друга на высоких частотах [13–16]. Свойство возбуждения колебаний самого низкочастотного типа позволяет отличить параметрический импульс от обычных импульсов.

Таблица 1. Параметры трасс распространения

Обсерватория	Расстояние, Мм	Пеленг эпицентра источника $A_Z$
Надьченк (NCK)	16,61	$-32,9^\circ$
Хорнзунд (HOR)	13,63	$-20,5^\circ$
Эсранге (ESR)	14,66	$-16,1^\circ$
Карымшино (KRM)	9,74	$129,2^\circ$
Мошири (MSR)	10,20	$117,2^\circ$
Онагава (ONW)	9,96	$116,8^\circ$

Геометрические параметры трасс распространения перечислены в табл. 1. Здесь обсерватории разделены на две группы. Имеются три дальневосточных обсерватории (Мошири, Онагава и Карымшино), которые удалены от эпицентра вспышки на расстояние около 10 Мм. Азимуты параметрического источника для этих обсерваторий составляют около  $120^\circ$ , т. е. импульс приходит к ним с юго-востока. Вторую группу образуют европейские пункты наблюдения (Эсранге, Надьценк и Хорнзунд), удалённые от эпицентра вспышки на расстояние около 15 Мм. Пеленг источника из этих обсерваторий близок к  $-20^\circ$ , т. е. волна приходит в них с северо-запада.

Для области с угловой полушириной  $60^\circ$  относительно эпицентра возмущения были вычислены комплексные спектры сигналов во всех шести обсерваториях. С помощью быстрого преобразования Фурье были получены их временные формы, приведённые на рис. 4. Модельные графики расположены в двух столбцах. Левая колонка относится к дальневосточным обсерваториям, а правая — к наблюдениям в Европе. Для каждой обсерватории построены магнитные (верхние графики) и электрические (вертикальная компонента поля) временные формы импульсов в относительных единицах. По оси абсцисс отложено время в интервале от 0 до 1 с. Линии с точками относятся к компоненте  $H_{ЮВ}$ , а линии без точек — к полю  $H_{ЗВ}$ .

В обсерваториях Дальнего Востока расчётные импульсы магнитного поля содержат ярко выраженные затухающие осцилляции на частоте первого шумановского резонанса. Это же свойство наблюдается в эксперименте, см. рис. 2. В вертикальном электрическом поле доминирует второй мод шумановского резонанса, что объясняется расстоянием от наблюдателя до эпицентра вспышки, равным примерно 10 Мм. Поэтому в записях дальневосточных обсерваторий спектры временных вариаций магнитного и электрического полей должны заметно отличаться друг от друга. К сожалению, неработавший электрический канал обсерватории Мошири не позволил проверить это характерное свойство.

Вычисления также показали, что большой размер источника выравнивает амплитуды компонент магнитного поля. Например, амплитуды  $H_{ЮС}$  и  $H_{ЗВ}$  в Карымшино оказываются близкими, тогда как эпицентр вспышки расположен под азимутом около  $130^\circ$ , для которого в случае точечного источника отношение амплитуд должно быть равно 2 : 1. Резкие ступенчатые изменения в некоторых рассчитанных амплитудных спектрах также обусловлены большим размером источника.

При моделировании мы учли типовой коэффициент передачи электрической антенны [35]

$$G_E = \frac{i\omega RC_0}{1 + i\omega R(C_0 + C_1)} \frac{C_0 + C_1}{C_0}. \quad (12)$$

Здесь  $C_0 = 25$  пФ — собственная ёмкость активного электрода антенны (сферы с диаметром около 55 см),  $C_1 = 50$  пФ — входная ёмкость антенного усилителя,  $R = 10^9$  Ом — его входное сопротивление. Электрические антенны не чувствительны к низким частотам, поэтому наблюдаемый видеоимпульс несколько деформирован из-за подавления ультранизкочастотных компонент.

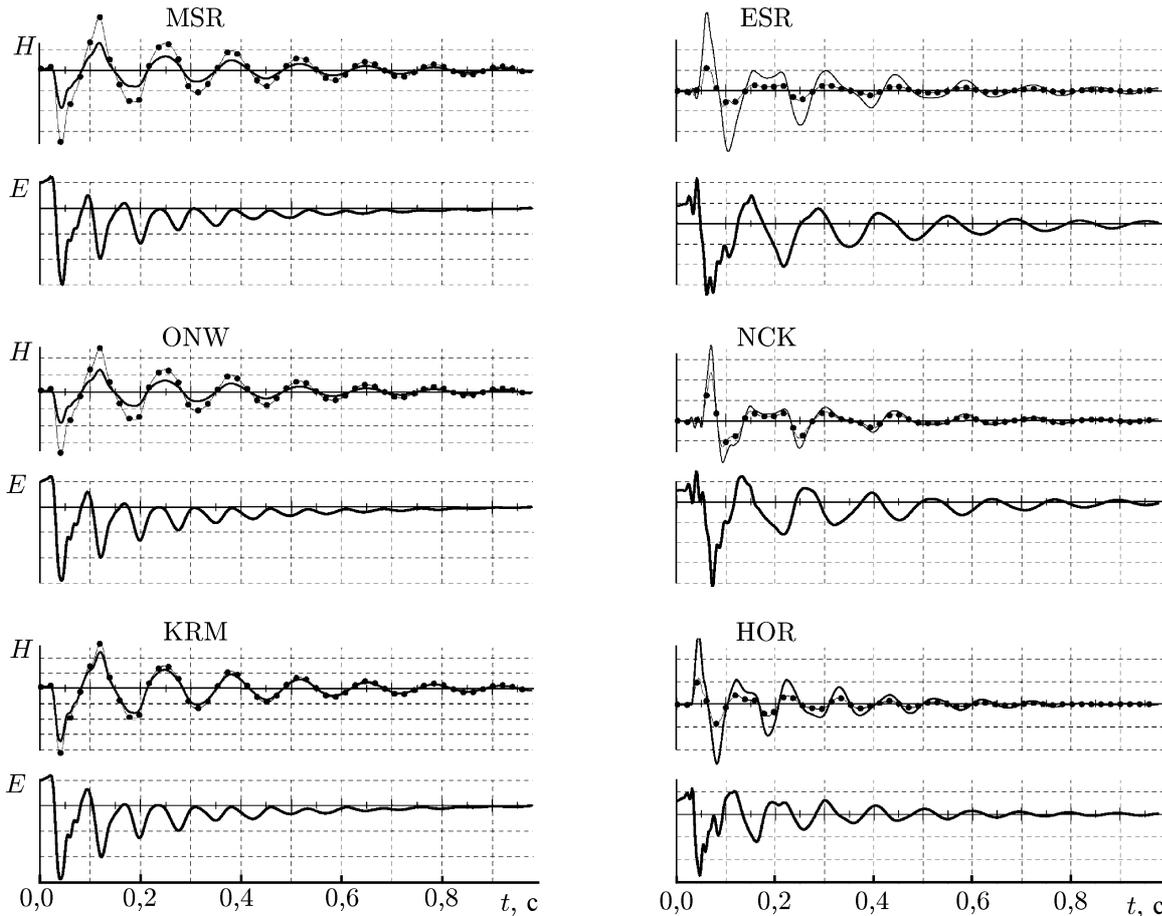


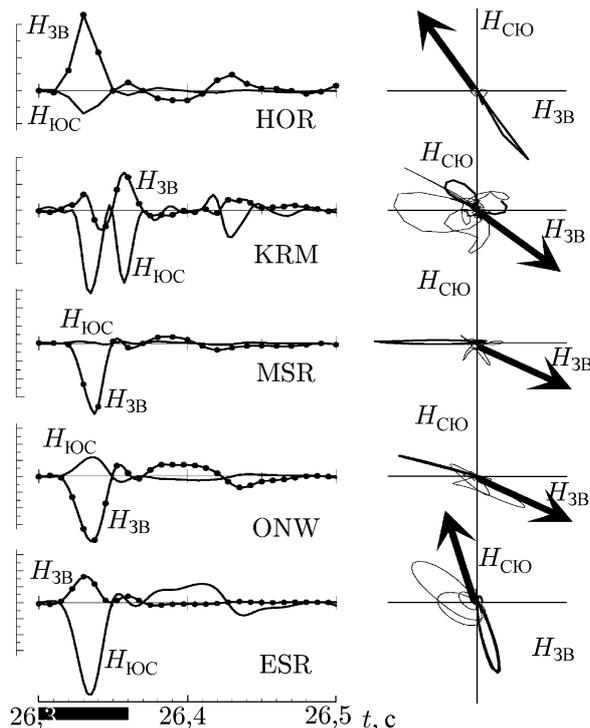
Рис. 4. Рассчитанные в относительных единицах волновые формы параметрического сверхнизкочастотного всплеска для всех обсерваторий. Линии с точками показывают данные, относящиеся к компоненте магнитного поля  $H_{ЮС}$ , а без точек —  $H_{ЗВ}$

Отрицательная полуволна на фронте электрического импульса однозначно указывает на положительную полярность источника поля. Такая полярность следует и из расчёта, т. к. уменьшение сопротивления атмосферы увеличивает ток утечки из ионосферы на Землю, направление которого соответствует движению положительных зарядов. Отрицательная первая полуволна характерна и для большинства обычных сверхнизкочастотных всплесков, поскольку они возбуждаются преимущественно положительными грозowymi пробоями.

К сожалению, у нас не было абсолютно надёжных данных ни одной обсерватории, которые содержали бы одновременно все три компоненты электромагнитного импульса. Поэтому однозначно исключалась возможность определить направление на источник по вектору Умова—Пойнтинга  $\mathbf{P}(t) = [\mathbf{E}(t), \mathbf{H}(t)]$ .

Покажем, что источник параметрических импульсов действительно располагался над Тихим океаном, для чего используем его положительную полярность. Благодаря неизменной полярности сверхнизкочастотного всплеска в вертикальном электрическом поле по всей Земле мы можем определить квадрант источника для каждой обсерватории. Для этого необходимо воспользоваться знаком первой полуволны импульса в компонентах «взаимного вектора Умова—Пойнтинга», определяемых равенствами  $P_{ЗВ}(t) = -E(t)H_{ЮС}(t)$  и  $P_{ЮС}(t) = E(t)H_{ЗВ}(t)$ . Отличие взаимного вектора состоит в том, что в нём используется запись электрического поля из обсерватории Надьченк, а компоненты магнитного поля берутся в каждом из иных пунктов наблюдения. Поло-

Рис. 5. Временная зависимость в относительных единицах (левые графики) и соответствующие фигуры Лиссажу (правые графики) взаимного вектора Умова–Пойнтинга, найденного по записям всех обсерваторий. Жирные петли с точками на фигурах Лиссажу иллюстрируют годограф взаимного вектора Умова–Пойнтинга во временном интервале 26,3 ÷ 26,36 с, отмеченном на оси времени левых графиков горизонтальной полосой. Стрелки показывают направление из пунктов наблюдения к эпицентру вспышки



жение источника в зависимости от полярности первой полуволны для горизонтальных магнитных компонент приведено в табл. 2.

Первые пять колонок этой таблицы перечисляют все варианты знаков первой полуволны на фронте магнитного импульса при неизменной отрицательной полуволне поля **E**. Последняя колонка таблицы указывает квадрант источника в локальной системе координат, который однозначно находится по той или иной комбинации знаков.

Применив табл. 2 к наблюдениям, легко найти направление на источник. Эти данные приведены в табл. 3. В её первой колонке указаны названия пунктов наблюдения, две следующие колонки содержат знак первой полуволны на фронте импульса для компонент  $H_{3B}$  и  $H_{10C}$ . Предпоследняя колонка даёт квадрант источника, найденный с помощью табл. 2, а последняя — географический азимут эпицентра возмущения. Сравнение данных двух последних колонок табл. 3 однозначно указывает на источник в Тихом океане.

Для оценки направления прихода можно использовать временные вариации взаимного вектора Умова–Пойнтинга. Правда, для этого пришлось преобразовать записи к одинаковой частоте квантования. Конечно, такой вектор является нестройкой характеристикой, но получающиеся фигуры Лиссажу оказываются весьма информативными (см. рис. 5). Колонка графиков слева на рис. 5 показывает компоненты взаимного вектора Умова–Пойнтинга как функции времени. Компонента запад–восток  $P_{3B}(t) = -E(t)H_{10C}(t)$  показана кривыми с точками, а компонента по линии юг–север  $P_{10C}(t) = E(t)H_{3B}(t)$  — кривыми без точек. Нами был выбран временной интервал № 1, когда был зарегистрирован первый, «преждевременный» импульс. Справа от временных

Таблица 2. Положение источника в зависимости от полярности первой полуволны на фронте импульсов в компонентах  $H_{3B}$  и  $H_{10C}$

Полярность на фронте импульса					Квадрант источника
$E$	$H_X$	$H_Y$	$P_X$	$P_Y$	
–	+	–	–	–	I
–	+	+	+	–	II
–	–	–	+	+	III
–	–	+	–	+	IV

Таблица 3. Квадрант источника первого импульса, видимый из отдельных обсерваторий

Обсерватория	Полярность на фронте импульса		Квадрант источника	Географический азимут эпицентра
	$H_{ЗВ}$	$H_{СЮ}$		
Надьченк (NCK)	+	+	II	$-16^\circ$
Хорнзунд (HOR)	+	+	II	$-33^\circ$
Эсранге (ESR)	-	+	III	$129^\circ$
Карымшино (KRM)	?	-	?	$117^\circ$
Мошири (MSR)	-	-	III	$117^\circ$

функций показаны соответствующие им фигуры Лиссажу. Большая часть этих графиков, охватывающая интервал  $26,3 \div 26,5$  с, показана тонкими линиями, тогда как жирные линии с точками отвечают части этого интервала от 26,3 до 26,36 с. Этот промежуток времени отмечен на временной оси левых графиков жирной горизонтальной полосой. Видно, что в это время в точку наблюдения пришла прямая волна. Стрелки на диаграммах справа указывают направление из обсерватории на эпицентр возмущения. Очевидно, что во всех без исключения случаях фигуры Лиссажу взаимного вектора Умова—Пойнтинга вытянута противоположно направлению этих стрелок, что и ожидалось для тихоокеанского источника.

Формы наблюдаемых и модельных импульсов в детально сравниваются на рис. 6. Мы выбрали данные Надьченка (поле  $E$ ), Эсранге (компонента поля  $H_{ЗВ}$ ) и Карымшино ( $D$ -компонента поля). Время отложено по оси абсцисс и изменяется от 21:30:26,2 до 21:30:27,4 UT. Амплитуда сигнала отложена вдоль ординаты. Вертикальная составляющая электрического поля приведена в мВ/м, а магнитная — в мкА/м. Эти последние единицы измерения широко используются в радиотехнике, т. к. произведение магнитного поля, выраженного в мкА/м, на волновое сопротивление вакуума  $120\pi$  Ом даёт напряжённость электрического поля в мкВ/м. Для перевода данных в пТл следует воспользоваться равенством  $1 \text{ мкА/м} = 0,4\pi \text{ пТл} = 1,256 \text{ пТл}$ .

Экспериментальные данные показаны на рис. 6 чёрными жирными линиями, а результаты моделирования — кривыми с точками. Если сдвигать расчётный импульс по времени, то коэффициент взаимной корреляции модельных и наблюдаемых данных будет изменяться. Это позволяет оценить время прихода в каждом пункте по максимальному абсолютному значению коэффициента взаимной корреляции. Соответствующие времена приведены в табл. 4. Как видно, они хорошо согласуются для всех обсерваторий.

Начальная полуволна первого из двух сверхнизкочастотных всплесков заметно короче во всех пунктах наблюдения. Чтобы получить короткий импульс, приходится уменьшить до  $5^\circ$  угловой размер области, где модифицируется ток глобальной электрической цепи. Одновременно с этим на порядок величины приходится повысить изменение плотности тока — до  $30 \text{ пА/м}^2$ , т. к. иначе не удастся получить импульс соответствующей амплитуды. Волновая форма второго импульса вычислялась при угловой полуширине области модификации проводимости  $60^\circ$  и добавочном токе утечки  $1 \text{ пА/м}^2$ .

Первый импульс прибыл до момента регистрации основной гамма-вспышки, а второй почти совпадал по времени с резкими изменениями сверхдлинноволновых сигналов на транстихоокеанских трассах распространения. Соответствие между моделью и наблюдениями очевидно как для европейских, так и для азиатских данных. Время прихода и соответствующие коэффициенты взаимной корреляции указаны на графиках для каждой пары импульсов. Отклонения данных на рис. 6 можно отнести на счёт естественного фонового шума.

Таблица 4. Времена прихода импульсов в обсерватории и коэффициенты взаимной корреляции модельных и наблюдаемых данных

Обсерватория	Время прихода первого импульса относительно 21:30:00 UT 27.12.2004, с	Время прихода второго импульса относительно 21:30:00 UT 27.12.2004, с	Коэффициент взаимной корреляции для первого импульса	Коэффициент взаимной корреляции для второго импульса
Надъченк (NCK)	26,25	26,65	0,60	0,78
Хорнзунд (HOR)	26,27	26,69	0,35	0,72
Эсранге (ESR)	26,28	26,71	0,37	0,67
Карымшино (KRM)	26,29	26,60	0,28	0,46
Мошири (MSR)	26,31	26,61	0,28	0,59
Онагава (ONW)	26,31	26,60	0,10	0,40

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Галактическая гамма-вспышка 27 декабря 2004 года возбудила сверхнизкочастотные всплески, обнаруженные глобально. Близость времён приходов импульсов к моменту регистрации гамма-вспышки, одномодовый состав спектров шумановского резонанса, полярность источника, азимут прихода волны и её линейная поляризация приводят к выводу о том, что наблюдавшееся излучение возникло благодаря резкому кратковременному изменению тока утечки глобальной электрической цепи под воздействием космических гамма-квантов.

Все доступные записи шумановского резонанса содержат сверхнизкочастотные всплески, близкие по времени к приходу излучения гамма-вспышки. При этом записи содержат два импульса, а не один. Подводя итоги независимым наблюдениям в глобально разнесённых обсерваториях, мы отмечаем следующее.

- 1) Сверхнизкочастотные всплески одновременно обнаруживаются на всей Земле в момент времени, близкий к времени регистрации вспышки космического гамма-излучения.
- 2) Спектральная плотность импульсных радиосигналов сосредоточена в окрестности первого мода резонансных колебаний полости Земля–ионосфера.
- 3) Амплитуда импульса превышает естественный фон в 4÷6 раз.
- 4) Источник параметрического импульса имел положительную полярность, т. е. импульсный положительный ток был направлен к земле.
- 5) Поляризация параметрической радиоволны была близка к линейной.
- 6) Глобальная триангуляция указывает на эпицентр возмущения для первого импульса, тогда как для второго импульса пеленги смещены и характеризуются значительным разбросом.

Первый сверхнизкочастотный всплеск имеет все ожидаемые характеристики параметрического сигнала за исключением раннего времени прихода. Событие было зарегистрировано за  $0,3 \div 0,4$  с до начала изменений проводимости, отмеченных в записях сигналов от сверхдлинноволновых радиопередатчиков. Самое простое объяснение состоит в случайном совпадении разнородных событий [9]. Можно предположить, что ранний импульс возник от обычного положительного пробоя молнии, который по случайному стечению обстоятельств произошёл перед приходом гамма-лучей. Отвергать совпадение, конечно, нельзя, однако нам оно представляется сомнительным, поскольку такая интерпретация требует ответов на следующие весьма неудобные вопросы.

- 1) Почему указанный положительный грозовой пробой произошёл посередине Тихого океана, тогда как известно, что именно в этой области наблюдается самая низкая на Земле грозвая

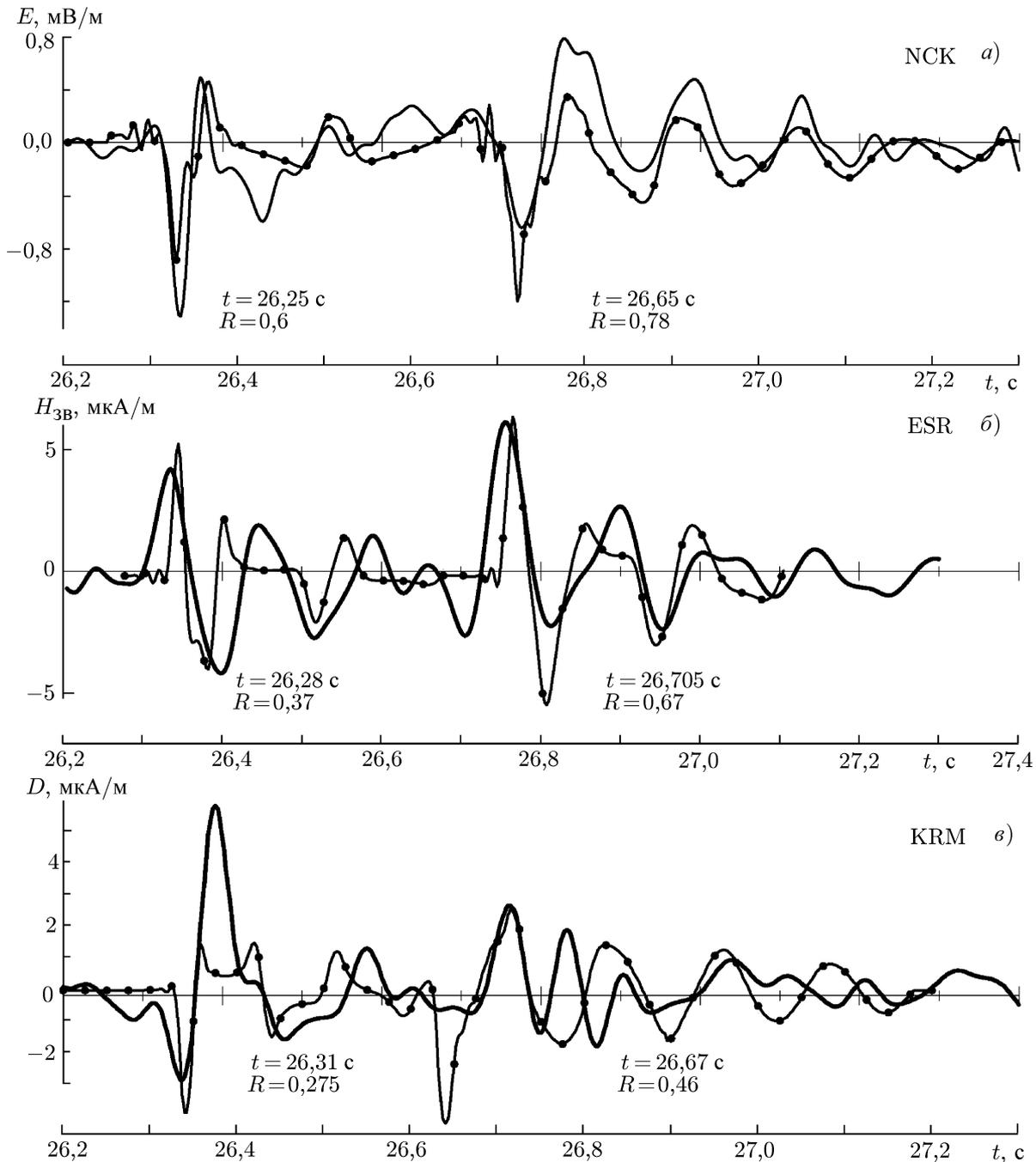


Рис. 6. Сравнение наблюдаемых (жирные линии) и модельных (линии с точками) импульсов в вертикальном электрическом и горизонтальном магнитном полях различных обсерваторий. Левые части отвечают угловой ширине возмущения  $5^\circ$ , правые —  $60^\circ$ . Величины  $t$ , приведённые на графиках, отвечают временам прихода первого и второго импульсов относительно 21:30:00 UT 27 декабря 2004 года, величины  $R$  — коэффициенты корреляции модельных и наблюдаемых данных

активность?

2) Почему грозовой пробой положительной полярности произошёл в местный полдень? Максимум мировых гроз приходится на послеполуденное время. Кроме того, положительные пробои преобладают в заключительной фазе (фазе «умирания») грозы, которая обычно отвечает  $18 \div 22$  ч

местного времени. Почему рассматриваемое случайное событие произошло во внеурочное время и настолько опережало типичное время возникновения положительных пробоев?

3) Для получения корректной формы первого импульса пришлось использовать не точечный, а распределённый источник, когерентные токи которого занимают площадку с угловой полушириной около  $5^\circ$ . Такая модель имеет мало общего с вертикальными молниями. Почему формы импульсов от грозового источника, рассчитанные для разных обсерваторий, не отвечают данным наблюдений?

4) Необычной представляется гроза посреди Тихого океана, состоявшаяся в полдень и генерировавшая положительный пробой. Но почему она располагалась в эпицентре приближающихся гамма-лучей и произошла прямо перед приходом вспышки?

5) Гипотеза о случайной молнии не объясняет особый спектральный состав зарегистрированного импульса. Спектр сверхнизкочастотного всплеска от положительного пробоя даже с длительностью  $1/60$  с, расположенного в эпицентре возмущения, всё равно должен содержать заметные по амплитуде второй и третий резонансные моды во всех пунктах приёма, а в данных наблюдений они отсутствуют. Почему?

Попытавшись ответить на эти вопросы, мы пришли к заключению, что оба импульса вероятнее всего обязаны своим возникновением галактической гамма-вспышке. Первый из них можно объяснить некоторой «предварительной» активностью до прихода основного потока. Все остальные его параметры соответствуют модельным ожиданиям.

За исключением пеленга источника, все характеристики второго импульса идеально совпадают с ожиданиями. Импульсная волна пришла в нужное время, она имела ожидаемый спектральный состав, её амплитуда была соответствующей расчётам, источник имел положительную полярность, поляризация волны была близка к линейной. Однако триангуляция даёт сильный разброс положений источника относительно эпицентра возмущения. Возможно, это объясняется пространственно неоднородными модификациями тока утечки глобальной электрической цепи.

Итак, имеются два кандидата на роль параметрического импульса. Каждый из них имеет по пять (из шести) характеристик, совпадающих с ожиданиями, и каждый обладает девиациями в одной из характеристик. Другими словами, если необходимо оставить один импульс из двух, то придётся смириться либо с ранним приходом, либо со значительными отклонениями координат источника. Разумно предположить, что оба импульса связаны с галактической вспышкой. Первый из них был обусловлен некоторой предварительной активностью, «не замеченной» орбитальными гамма-телескопами. В то же время, эта активность была отмечена как возрастание уровня естественных сверхдлинноволновых шумов перед приходом гамма-вспышки, зарегистрированной в сигналах от сверхдлинноволновых передатчиков [8]. Если обратиться к записи спутника RHESSI, представленной на рис. 2 и 3 в работе [8], можно отметить некоторую активность, предвещающую приход основной вспышки. Она началась примерно в 21:30:26,3 UT. В области частот глобального резонанса, где сочетаются гигантская длина волны и медленные временные процессы, такая активность могла бы сформировать импульсный предвестник. Скачок в записи сверхдлинноволновых радиосигналов, связанный с приходом основного потока гамма-квантов, происходит в 21:30:26,6 UT. Второй сверхнизкочастотный всплеск совпадает по времени с этими изменениями, но характеризуется большим разбросом пеленгов источника.

Бесспорно, что предсказанное параметрическое импульсное радиоизлучение успешно обнаружено мировой сетью радиообсерваторий. Особенность данных наблюдений состоит в приёме не одного, а двух близких по времени импульсов. Первый из них удовлетворяет всем ожиданиям, однако он прибыл раньше модификации нижней ионосферы, отмеченной в антарктических измерениях транстихоокеанских сигналов сверхдлинноволновых радиостанций. Возможно, что неизвестный агент одновременно с увеличением сверхдлинноволнового радиос шума вызвал пер-

вый параметрический сверхнизкочастотный всплеск за счёт изменения сопротивления утечки глобальной электрической цепи. При этом высота ионосферы осталась неизменной и сигналы сверхдлинноволновых передатчиков были стабильными, а на орбитальных гамма-телескопах отмечались лишь незначительные вариации гамма-фона.

Завершая статью, мы перечислим основные полученные результаты.

Все доступные записи шумановского резонанса на всемирной сети станций содержат характерные импульсы, соответствующие приходу космической гамма-вспышки 27 декабря 2004 года.

Параметрические импульсы обнаружены во взаимно ортогональных горизонтальных компонентах магнитного поля и в вертикальной компоненте электрического поля.

Отрицательная полярность на фронте импульса в вертикальной компоненте электрического поля говорит о положительной полярности источника. Следовательно, радиоизлучение возникло благодаря увеличению тока утечки глобальной электрической цепи в  $2 \div 10$  раз.

Наблюдаемые и модельные импульсы похожи, коэффициенты их взаимной корреляции оказались высокими.

Записи содержат не один, а два импульса. Один из них опережает время прихода основного потока гамма-излучения, тогда как второй совпадает с максимумом этого потока. Глобальная триангуляция показала, что первый импульс пришёл из эпицентра атмосферной модификации, вызванной гамма-вспышкой, тогда как источник второго импульса характеризуется сильным разбросом пеленгов относительно азимута эпицентра.

Оба импульса, вероятно, связаны с гамма-вспышкой. Однако сделать окончательные выводы затруднительно, поскольку событие было единичным, а отношение амплитуды импульса к естественному фону не превышало  $4 \div 6$ .

Исследования венгерской группы выполнялись при поддержке Европейского социального фонда (грант ТАМОР-4.2.2.С-11/1/KONV-2012-0015 (система Земля)). Авторы признательны неизвестному рецензенту работы за его ценные замечания, предложения и поправки, несомненно улучшившие статью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thompson C., Duncan R. C. // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1995. V. 275. P. 255.
2. Thompson C., Duncan R. C. // *Astrophys. J.* 1996. V. 473. P. 322.
3. Hurley K., Boggs S. E., Smith D. M., et al. // *Nature*. 2005. V. 434. P. 1098.
4. Palmer D. M., Barthelmy S., Gehrels N., et al. // *Nature*. 2005. V. 434. P. 1107.
5. Terasawa T., Tanaka Y. T., Takei Y., et al. // *Nature*. 2005. V. 434. P. 1110.
6. Mereghetti S., Götz D., von Kienlin A., et al. // *Astrophys. J. Lett.* 2005. V. 624. P. L105.
7. Frederiks D. D., Golenetskii S. V., Palshin V. D., et al. // *Astron. Lett.* 2007. V. 33. P. 1.
8. Inan U. S., Lehtinen N. G., Moore R. C., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. Art. no. L08103.
9. Tanaka Y. T., Hayakawa M., Hobara Y., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. Art. no. L08805.
10. Dowden R. L., Thomson N. R., Roger C. J., Hayakawa M. // *URSI General Assembly, Toronto, 1999. Section G2. P. 2.*
11. Николаенко А. П., Щекотов А. Ю. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2011. Т. 54, № 1. С. 16.
12. Nickolaenko A. P., Kudintseva I. G., Pechony O., et al. // *Ann. Geophysicae.* 2012. V. 30. P. 1321.
13. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. // *J. Atmos. Electr.* 2010. V. 30, No. 1. P. 1.
14. Николаенко А. П., Кудинцева И. Г., Печеная О. Б. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2010. Т. 53, № 9–10. С. 605.

15. Hayakawa M., Nickolaenko A. P., Shvets A. V., Hobara Y. // *Lightning: properties, formation and types* / Ed. by M. D. Wood. Nova Sci. Pub., 2011. Ch. 3. P. 39.
16. Nickolaenko A. P. // *J. Atmos. Electr.* 2011. V. 31, No. 2. P. 95.
17. Ando Y., Hayakawa M., Shvets A., et al. // *J. Atmos. Electr.* 2005. V. 25. P. 29.
18. Hobara Y., Iwasaki N., Hayashida T., et al. // *J. Atmos. Electr.* 2000. V. 20. P. 99.
19. Schekotov A. Yu., Pilipenko V., Shiokawa K., Fedorov E. // *Earth Planets Space.* 2011. V. 63, No. 2. P. 119.
20. Sato M., Fukunishi H. // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, No. 16. P. 1859.
21. Satori G., Szendrői J., Verö J. // *Methodology J. Atmos. Terr. Phys.* 1996. V. 58, No. 13. P. 1475.
22. Satori G., Neska M., Williams E., Szendroi J. // *Radio Sci.* 2007. V. 42. Art. no. RS2S10.
23. Schekotov A. Yu., Molchanov O. A., Hayakawa M., et al. // *Radio Sci.* 2007. V. 42. Art. no. RA6S90.
24. Schekotov A. Yu., Molchanov O. A., Hayakawa M., et al. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008. V. 8. P. 1237.
25. Neska M., Satori G. // *Przegl. Geofiz. (Engl. Transl.)*. 2006. No. 3–4. P. 189.
26. Данилов Д. Л., Жиглявский А. А. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница». СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1997. 307 с.
27. Troyan V., Hayakawa M. *Inverse geophysical problems*. Tokyo: Terrapub, 2002. 286 p.
28. Fowler R. A., Kotick B. J., Elliot R. D. // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 2871.
29. Tanaka Y. T., Terasawa T., Yoshida M., et al. // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. Art. no. A07307.
30. Rycroft M. J., Harrison R. G., Nicoll K. A., Mareev E. A. // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 137. P. 83.
31. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. *Resonances in the Earth—ionosphere cavity*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Acad. Publ., 2002.
32. Nickolaenko A. P., Hayakawa M. // *J. Atmos. Electr.* 2009. V. 29, No. 1. P. 19.
33. Mushtak V. C., Williams E. R. // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 1989.
34. Pechony O., Price C. // *Radio Sci.* 2004. V. 39. Art. no. RS5007.
35. Ogawa T., Tanaka Y., Miura T., Yasuhara M. // *J. Geomagn. Geoelectr.* 1966. V. 18. P. 443.

Поступила в редакцию 1 августа 2013 г.; принята в печать 9 декабря 2013 г.

#### **MULTI-POINT DETECTION OF THE ELF TRANSIENT CAUSED BY THE GAMMA FLARE OF DECEMBER 27, 2004**

*A. P. Nickolaenko, A. Yu. Schekotov, M. Hayakawa, Y. Hobara, G. Satori, J. Bor, and M. Neska*

We present the experimental records of the radio pulse related to the gamma burst that took place on December 27, 2004. The records, which are synchronized by GPS time marks, were obtained in the observatories at Moshiri and Onagawa (Japan), Esrange (Sweden), Karimshino (Kamchatka, Russia), Nagycenk (Hungary), and Hornsund (Polish Polar Station Spitzbergen). The data demonstrate exceptional similarity and contain characteristic pulses that correspond to the time of gamma-ray arrival. Processing of the signals show that along with the time match, the following modeling predictions are confirmed: radio pulses contain a signal at the main frequency of the Schumann resonance, the field source has positive polarity (the current is directed from the ionosphere towards the Earth), the polarization of the horizontal magnetic field of the radio wave is almost linear, and the directions towards the source indicated the epicenter of the gamma-quanta flux collision with the ionosphere. These properties correspond to the concept of the parametric electromagnetic pulse that is produced due to a significant change in the current in the global electric circuit, which is caused by a space gamma-ray flare.

*А. П. Николаенко, А. Ю. Щекотов, М. Хайакава и др.*