

А. П. Николаенко, А. Ю. Щекотов*

СНЧ-ИМПУЛЬС В КАРЫМШИНО, СВЯЗАННИЙ С ГАММА-ВСПЫШКОЙ 27.12.04

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, г. Харьков, 61085, Украина
E-mail: sasha@ire.kharkov.ua

**Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН*
10, ул. Б. Грузинская, г. Москва, 123995, Россия
E-mail: checkit@post.ru

Приведены результаты анализа электромагнитного импульса, связанного с резким изменением высоты промежутка Земля–ионосфера, который был вызван интенсивной гамма-вспышкой в 21 ч 30 мин 26,5 с 27 декабря 2004 г. Показано, что параметры экспериментально наблюдаемого сверхнизкочастотного (СНЧ) импульса отвечают модельным ожиданиям: угол прихода радиоволны близок к направлению на эпицентр ионосферного возмущения, форма близка к расчетной, а амплитуда в несколько раз превышает уровень регулярного фонового сигнала шумановского резонанса. При этом вступление радиоимпульса на обсерватории Карымшино ($52,827^\circ$ с.ш. и $158,132^\circ$ в.д.) на 0,16 с опережает момент регистрации на сверхдлинных волнах. Ил. 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: СНЧ-радиоимпульс, шумановский резонанс, импульс гамма-излучения.

27 декабря 2004 г. в 21 ч 30 мин и 26,5 с мирового времени (МВ) наблюдался импульс гамма-излучения от источника SGR 1806-20, который уменьшил высоту ионосферы над дневным полушарием примерно на 20 км [1, 2]. Эпицентр ионосферного возмущения находился в Тихом океане ($146,2^\circ$ з.д. и $20,4^\circ$ ю.ш.) на расстоянии примерно 450 км от центра дневной полусферы. В теоретических работах [3–5] оценивались два типа эффектов:

- Глобальное изменение высоты ионосферы модифицирует параметры глобального электромагнитного (шумановского) резонанса [6, 7].

- Поскольку ионосфера положительно заряжена относительно Земли [8], ее резкое снижение вызывает импульс тока, который возбуждает «параметрический» радиоимпульс. В настоящей работе мы представим результаты экспериментального обнаружения такого импульса.

Имеются особенности параметрического СНЧ-всплеска [3], которые облегчают его выделение на фоне обычных всплесков СНЧ-излучений, приходящих несколько раз в минуту от сверхмощных грозных разрядов:

- Время появления импульса должно отвечать приходу гамма-всплеска, т. е., 21 ч 30 мин и 26,5 с по МВ 27 декабря 2004 г.

- Горизонтальные магнитные компоненты радиоволны должны соответствовать направлению на эпицентр ионосферного возмущения.

- Поскольку ионосфера несет положительный заряд и ее высота падает, ток источника поля имеет «положительную поляризацию». Импульс в вертикальной электрической компоненте поля E_z должен начинаться отрицательной полуволной. К сожалению, этим свойством воспользоваться

невозможно, так как электрическая антенна в Карымшино отсутствует.

- Из-за большого размера источника поля спектр импульса может содержать только основной (низший) мод резонансных колебаний [3].

- Модельные вычисления предсказывают также широкий спектральный пик в окрестности 60 Гц, однако обсуждаемые экспериментальные данные не несут информации о нем, поскольку рабочая полоса приемника лежит ниже 40 Гц.

Для обнаружения импульсного отклика резонатора Земля–ионосфера на вспышку гамма-излучения были использованы записи горизонтальных компонент магнитного поля, показанные на рис. 1, выполненные на Камчатской обсерватории Карымшино ($52,827^\circ$ с.ш. и $158,132^\circ$ в.д.), расположенной приблизительно в 40 км от Петропавловска-Камчатского.

СНЧ-мониторинг ведется с помощью трехкомпонентного индукционного магнитометра. Система сбора подробно описана в работе [9]. Важно отметить, что временная привязка данных к МВ обеспечивается сигналами GPS и ее погрешность не превышает 5 мс. Датчики горизонтальных компонент H и D ориентированы соответственно вдоль магнитного меридиана и перпендикулярно ему. Магнитное склонение в районе обсерватории равно $6,5^\circ$ к западу.

Успех обнаружения сигнала во многом зависит от полноты априорных сведений о нем. В данном случае известны время прихода импульса, его поляризация, временная форма и положение центра источника. По формулам сферической тригонометрии легко рассчитать параметры трассы распространения. Расстояние от пункта наблюдения до центра возмущения равно $D_S = 9,7$ Мм, а азимут источника $A_Z = 129,3^\circ$.

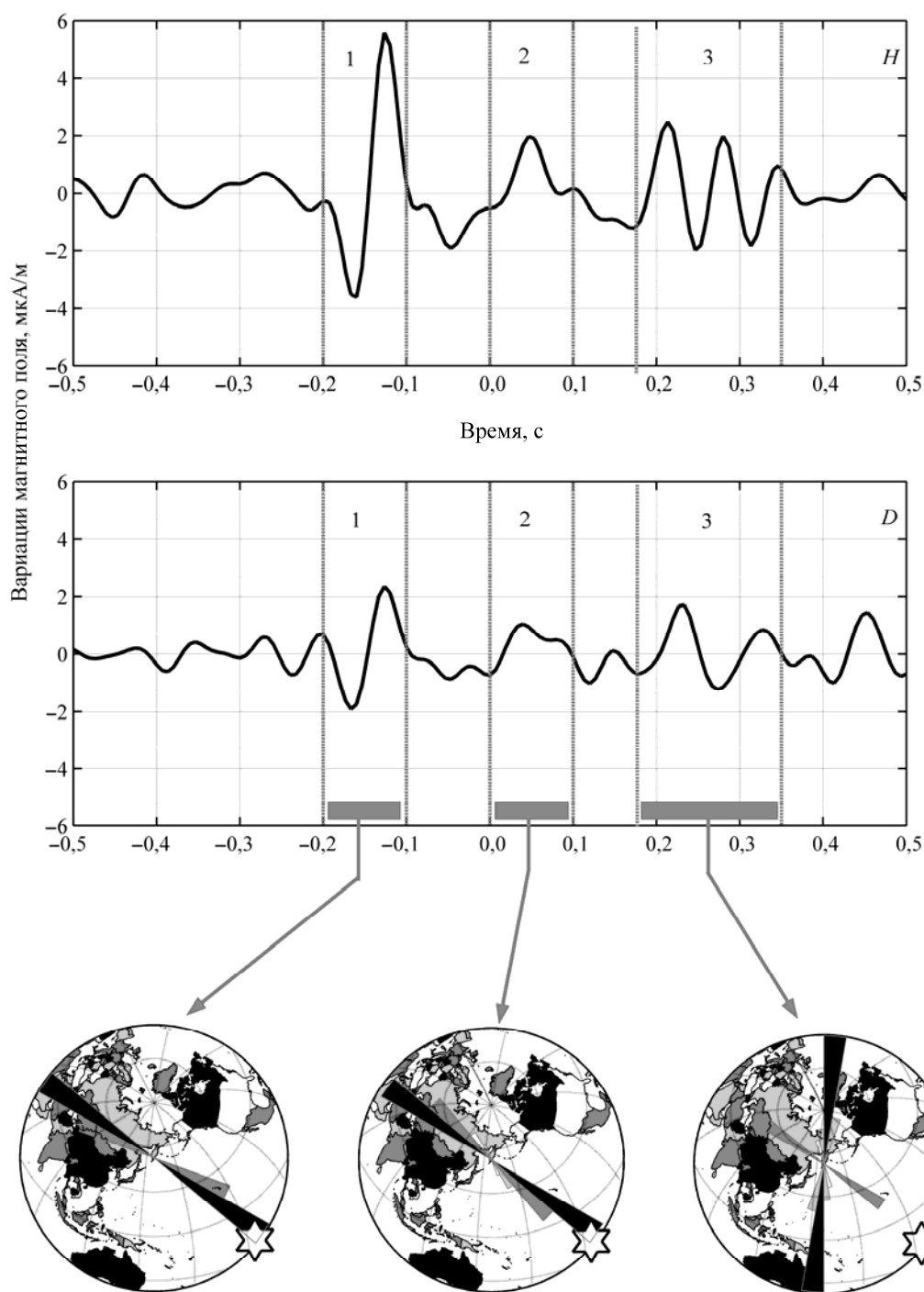


Рис. 1. Углы прихода радиоволны для различных фрагментов записи

Рис. 1 состоит из трех частей. Два верхних графика показывают поведение компонент поля H и D в $\pm 0,5$ -с окрестности времени вспышки, нуль времени отвечает 21 ч 30 мин и 26,5 с МВ. Верхний график показывает вариации H -компоненты магнитного поля, а нижний – компоненты D . Обе величины измеряются в мкА/м, и амплитуда импульса в H -

компоненте составляет около 6 мкА/м. Амплитуда D -компоненты в ~ 3 раза меньше. Для более подробного анализа структуры сигнала мы выделили три участка записи, занимающих интервалы $t \in (-0,2; -0,1$ с), $t \in (0; 0,1$ с) и $t \in (0,15; 0,35$ с), и построили круговые гистограммы углов прихода радиоволны для этих участков, показанные в нижней части рис. 1.

Интервалы обозначены вертикальными пунктирными линиями и отмечены серыми горизонтальными отрезками над осью времени на панели D -компоненты.

На участке 1 сигнал характеризуется широкой полосой, линейной поляризацией и азимутом прихода $\sim 120^\circ$. Сигнал на участке 2 также линейно поляризован, но стабильный азимут в 120° наблюдается только в начальной его части, далее этот азимут снова появляется в начале участка 3. Во вторых частях интервалов 2 и 3 регистрируется сигнал с нестационарным азимутом в районе $150 \dots 190^\circ$.

Вейвлет-преобразование сигналов (не приводится) в интервале 1 имеет один максимум в районе 6–7 Гц. В конце интервала 2 появляется компонент с частотой, примерно равной второму шумановскому резонансу 14–15 Гц.

На интервалах 1 и 2 сигнал линейно поляризован и приходит от эпицентра возмущения, поэтому мы интерпретируем его как волну, идущую от «параметрического» источника СНЧ-всплеска. Фрагмент записи 1 отвечает прямой волне, а участок 2 – «антиподной», т. е. волне, приходящей к наблюдателю от антипода источника. Поскольку расстояние от наблюдателя до центра возмущения известно ($D_S = 9,7$ Мм), то разность хода этих волн равна 20,6 Мм. Учитывая, что первая пиковая частота головной части параметрического импульса равна ~ 7 Гц, мы можем оценить ожидаемое запаздывание антиподной волны относительно прямой как $166 \cdot 20,6 / 20 = 172$ мс, что хорошо согласуется с записью (см. рис. 1). Фрагмент 3 включает импульс, «сопутствующий» параметрическому. Здесь мы можем ожидать прихода первой «кругосветной» волны.

В нижней части рис. 1 показаны распределения азимутов источника для каждого временного интервала. Они имеют вид круговых диаграмм, показывающих проекцию глобуса и эволюцию углов прихода в указанных временных интервалах.

Азимут – это угол, отсчитываемый по часовой стрелке от направления на север к перпендикуляру, восстановленному от главной оси эллипса поляризации. При переходе к географической системе координат к этому значению необходимо добавлять величину магнитного склонения $6,5^\circ$. Значения эллиптичности и положения главной оси эллипса поляризации рассчитывались по матрице когерентности [10], которая находится из спектров мощности и взаимных спектров компонент поля. Последние рассчитывались из коэффициентов разложения сигнала по комплексным гауссовым вейвлетам 3-го порядка. Положения главной оси для каждого отсчета импульса усреднялись по частотным компонентам в

полосе 3...20 Гц, по ним же оценивались и стандартные отклонения этих параметров [9].

Круговые диаграммы углов прихода разбиты на 10° секторы. Среднее направление на источник, вычисленное для элемента импульса, попадает в один из секторов. Подсчитывая количество значений в каждом секторе, мы получаем распределение в виде лепестковой гистограммы, наложенной на карту, построенную в эквидистантной азимутальной проекции с центром в точке наблюдения [9]. Длина лепестка и степень его почернения пропорциональны количеству пеленгов, попавших в данный сектор. Видно, что на участках 1 и 2 основной лепесток направлен почти точно на эпицентр вспышки (показан звездочкой), тогда как на участке 3 главный пеленг источника смещен к восточному побережью Австралии. В третьем интервале записи все еще присутствует мода, указывающая на эпицентр (светло-серый сектор), этому сигналу (повидимому кругосветной волне) соответствует начало записи интервала 3.

Рис. 2 демонстрирует согласие экспериментальной и расчетной волновых форм. Экспериментальный (кривая 1) и модельный (кривая 2) сигналы для H -компоненты поля показаны на рис. 2, а. Расчет выполнялся в предположении, что «параметрический» источник охватывает область радиусом 60° , это соответствует данным наблюдений [1] в диапазоне сверхдлинных волн (СДВ). Амплитуда расчетного импульса отложена вдоль правой ординаты. Видно, что наблюдаемый экспериментально импульс в 40 раз меньше расчетного (см. ниже). Однако при этом экспериментальная и расчетная формы импульса очень похожи.

Количественной мерой сходства кривых служит коэффициент взаимной корреляции, показанный на рис. 2, б. Положение максимума этой функции указывает на начало модификации ионосферы и совпадает с началом модельного импульса 2 на рис. 2, а. Видно, что максимум коэффициента кросс-корреляции равен 0,75, он смещен к предыстории события на 0,16 с (см. далее). Положительный знак коэффициента корреляции говорит о положительной полярности источника, что обусловлено зарядом ионосферы. Таким образом, наблюдаемая полярность источника также согласуется с моделью.

Согласие данных можно видеть как в форме импульсов (одномодовый спектр шумановского резонанса), так и в угле прихода радиоволны (направление на центр ионосферного возмущения). Два из предсказанных признака подтверждаются на опыте, а третий (время прихода) близок к ожидаемому, но по какой-то причине опережает реакцию на гамма-всплеск, наблюдавшуюся в измерениях СДВ-радиосигналов [1].

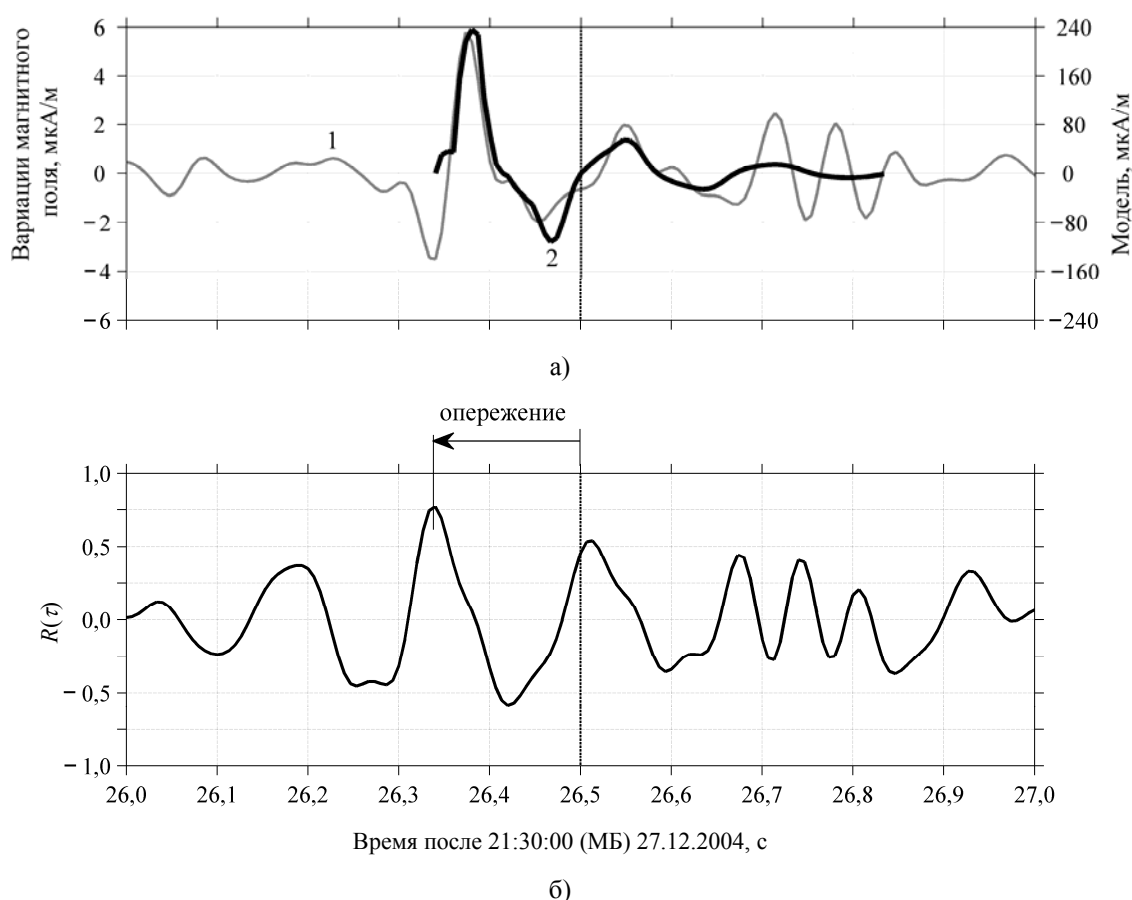


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и расчетных волновых форм: а) – экспериментальная запись 1 и модельный импульс 2 в H -компоненте поля; б) – коэффициент взаимной корреляции наблюдаемого и расчетного импульса

Опережение можно объяснить следующими причинами:

- Самое простое объяснение состоит в том, что метки времени содержат систематическую ошибку. Однако данные других обсерваторий идеально согласуются с записью в Карымшино (мы надеемся в дальнейшем опубликовать результаты сопоставления всех имеющихся записей). Отсюда, сбой временных меток, если он произошел в действительности, присутствует во всех записях и поэтому не связан с отдельной обсерваторией, а вызван сбоем в системе *GPS*. Такая возможность маловероятна.

- опережение, присутствующее во всех упомянутых записях, не связано с гамма-лучами, потому что наблюдался обычный СНЧ-всплеск, случайно совпавший с гамма-вспышкой. Тогда придется объяснить, почему случайное совпадение во времени сопровождается одновременным совпадением иных независимых параметров:

- поляризация сигнала линейна (в модели это обусловлено размерами одновременного снижения ионосферы);
- импульс пришел с ожидаемого направления, о чем говорит распределение углов прихода и

положительный коэффициент взаимной корреляции расчетных и наблюдаемых данных;

- спектр импульса (его волновая форма) содержит только низший мод шумановского резонанса, как и предсказала модель.

Совпадение всех этих признаков, вероятнее всего, говорит об успешном обнаружении параметрического возбуждения полости Земля–ионосфера.

- Если обнаруженный СНЧ-всплеск все же связан с приходом гамма-квантов, то необходимо пояснить, как возникло опережение.

Прежде всего отметим, что была использована простейшая модель: «металлические» Земля и ионосфера, разделенные сферическим слоем идеального диэлектрика. Опускание половины верхней обкладки заряженного сферического конденсатора вызывает ток параметрического источника.

Реальное строение глобальной электрической цепи значительно сложнее. Проводимость воздуха конечна и изменяется с высотой. Разность потенциалов между ионосферой и Землей неравномерно распределена по высоте [8]. Потенциал возрастает быстрее всего в области,

где сосредоточена главная часть электрического сопротивления атмосферы. Эту область называют «электросферой», она приурочена к верхней границе тропосферы и имеет толщину, примерно равную высотному масштабу атмосферы (7,8 км).

Отсюда ясно, почему наблюдаемый импульс слабее предсказанного теоретически. В расчете предполагалось, что заряд верхней атмосферы сосредоточен на нижней кромке ионосферы, и эта граница на дневной стороне Земли скачком опускается на 20 км, как это следует из СДВ-наблюдений [1]. Поскольку токи и заряды глобальной электрической цепи распределены во всей толще воздуха, на электросферу приходится меньший заряд, а ее вертикальное смещение не может превышать нескольких километров. Так концепция электросферы объясняет меньшую амплитуду импульса.

Ионизация нижней ионосферы (область *D* и ниже) ночью поддерживается галактическим фоном ионизирующего излучения. При повышении солнечной активности ночная область *D* не снижается, а сдвигается в область больших высот. Этот факт хорошо известен из наблюдений сигналов СДВ-радиостанций. Объяснение состоит в том, что солнечная радиация «выметает» галактические космические лучи из Солнечной системы, и высота ночной ионосферы возрастает.

Аналогично объясняется и «преждевременная» регистрация параметрического СНЧ-импульса. Если принять, что поток гамма-квантов проходит сквозь «сплошную среду», образованную галактическим фоном, то подобно солнечной радиации, он должен «выметать» фон, и тогда перед фронтом гамма-лучей возникает «сгущение» фона. Если расстояние между пиком сгущения и фронтом потока составляет 50 000 км, то опережение параметрического импульса окажется равным 0,16 с.

- Записи потока гамма-лучей на космических аппаратах содержали предвестник, опередивший гамма-всплеск на 120 с [2]. Кроме того, в графиках публикации [1] видно небольшое возрастание потока прямо перед приходом гамма-всплеска. Остается только предположить, что указанное возрастание спровоцировало СНЧ-импульс, но не сказалось на записях СДВ-радиостанций. Это вполне возможно, если «предвестник» в потоке ионизирующего излучения обусловлен «более мягкими» квантами, влияние которых сказывается сильнее в электросфере.

Следовательно, СНЧ-импульс может расщепиться на две части. Первая часть опережает приход главного гамма-всплеска на доли секунды. А вторая часть совпадает с приходом жестких гамма-квантов или несколько запаздывает из-за времени реакции электросферы. Токи «второго» параметрического источника обусловлены взаимодействием гамма-квантов с уже развившейся

модуляцией электросферы. Такие токи могут обладать иными характеристиками, например, центр вторичного источника может сместиться, что и наблюдается экспериментально.

Мы надеемся, что в дальнейшем удастся сопоставить все доступные записи в момент события 27 декабря 2004 г. Это позволило бы получить более полную картину вариаций СНЧ-сигналов и, в свою очередь, взаимодействия атмосферы с потоком ионизирующего излучения, уникального по интенсивности и жесткости.

Приведем главные результаты работы:

- СНЧ-записи обсерватории Карымшино (Камчатка, Россия) содержат СНЧ-импульс, приуроченный к моменту прихода гамма-всплеска. Импульс превосходит амплитуду шумановского фона примерно в 4 раза.

- Всплеск наблюдался в обеих компонентах горизонтального магнитного поля и имел форму, близкую к предсказанной.

- Направление на источник оказалось близким к направлению на центр ионосферного возмущения. Ошибка в пеленге источника менее 10° объясняется величиной отношения сигнал-шум.

- Коэффициент взаимной корреляции расчетных и наблюдаемых временных форм достигает 0,75.

- Обнаружено опережение СНЧ-всплеска по сравнению с опубликованным временем начала эффектов в записях сигналов СДВ-радиостанций. Оно может указывать на генерацию электромагнитного импульса не ионосферой, а более низкими слоями атмосферы, так называемой «электросферой», модификация которой вызвана галактическим фоном или же «мягким» предвестником в самом гамма-всплеске.

- Желательно сравнить записи в Карымшино с данными других обсерваторий и с расчетами в рамках более реалистичной модели источника.

1. *Massive disturbance of the daytime lower ionosphere by the giant γ -ray flare from magnetar SGR 1806–20* / U. S. Inan, N. G. Lehtinen, R. C. Moore et al. // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – 34. – L08103(6 p.)
2. *An exceptionally bright flare from SGR 1806–20 and the origins of short-duration big gamma-ray bursts* / K. Hurley, S. E. Boggs, D. M. Smith et al. // *Nature.* – 2005. – 434. – P. 1098–1103.
3. Николаенко А. П. Параметрическое возбуждение СНЧ радиои импульса всплеском внегалактического гамма излучения 27 декабря 2004 г. / А. П. Николаенко // *Изв. вузов. Радиофизика.* – 2010. – 53, № 4. – С. 235–245.
4. Николаенко А. П. Модель возмущений глобального электромагнитного резонанса во время всплеска внегалактического гамма излучения 27 декабря 2004 г. / А. П. Николаенко, М. Хайакава // *Радиофизика и электрон.* – 2010. – 15, № 1. – С. 78–85.
5. *Nickolaenko A. P. Model disturbance of Schumann resonance by the SGR 1806–20 γ -ray flare on December 27, 2004* / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa // *J. of Atmospheric Electricity.* – 2010. – 30, N 1. – P. 1–11.

6. Блюх П. В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля-ионосфера / П. В. Блюх, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. – К.: Наук. думка, 1977. – 199 с.
7. Nickolaenko A. P. Resonances in the Earth-ionosphere Cavity / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 380 p.
8. An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity / M. J. Rycroft, R. G. Harrison, K. A. Nicoll, E. A. Mareev // Space Sci. Rev. – 2008. – 137, N 1-4. – P. 83-105.
9. About possibility to locate an EQ epicenter using parameters of ELF/ULF preseismic emission / A. Y. Schekotov, O. A. Molchanov, M. Hayakawa et al. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2008. – 8, N 6. – P. 1237-1242.
10. Fowler R. A. Polarization analysis of natural and artificially induced geomagnetic micropulsations / R. A. Fowler, B. J. Kottick, R. D. Elliot // J. Geophys. Res. – 1967. – 72, N 11. – P. 2871-2875.

A. P. Nickolaenko, A. Yu. Schekotov

ELF TRANSIENT AT KARYMSHINO ASSOCIATED WITH EXTRA-GALACTIC GAMMA RAY BURST OF 27.12.04

Results are given of observations of electromagnetic pulse associated with an abrupt change of the height of the Earth-ionosphere cavity that was caused by intense gamma ray burst of December 27, 2004. We demonstrate that parameters of observed extremely low frequency (ELF) radio pulse correspond to expecta-

tions: the source bearing is close to the direction toward the epicenter of ionosphere modification, the pulsed waveform is similar to that computed, and its amplitude exceeds the level of regular Schumann resonance background by a few times. Simultaneously, the pulse onset at the Karymshino observatory (52,827° N, 158,132° E) is ~0.16 s in advance relative to the published time of modification in the VLF records.

Key words: ELF transient, Schumann resonance, extra-galactic gamma ray burst.

ННЧ-ІМПУЛЬС В КАРИМШИНО ПОВ'ЯЗАНИЙ З ГАММА-СПЛЕСКОМ 27.12.04

Наведено результати аналізу електромагнітного імпульсу, що був зумовлений різкою зміною висоти проміжку Земля-іоносфера, яка була викликана інтенсивним гамма-сплеском в 21 год 30 хв 26,5 с 27 грудня 2004 р. Показано, що параметри наднизькочастотного (ННЧ) імпульсу, який спостерігався експериментально, відповідають модельним очікуванням: кут приходу радіохвилі є близьким до напрямку на епіцентр іоносферного збурення, форма імпульсу є близькою до розрахунку, а амплітуда в декілька разів перевищує рівень регулярного фоновому сигналу шумановського резонансу. При цьому вступ радіоімпульсу на обсерваторії Каримшино (52,827° п.ш. та 158,132° с.д.) на 0,16 с випереджає момент ресстрації на наддовгих хвилях.

Ключові слова: ННЧ-радіоімпульс, шумановський резонанс, імпульс гамма-випромінювання.

Рукопись поступила 28.01.11 г.