

**А. П. Николаенко, М. Хайакава\***

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

*12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*

E-mail: [sasha@ire.kharkov.ua](mailto:sasha@ire.kharkov.ua)

*\*Хайакава и К° «Институт сейсмоэлектромагнетизма»*

*Инкубационный центр Университета электросвязи*

*Научно-исследовательский центр современной беспроводной связи Университета электросвязи*

*1-5-1 Чофугаока, Чофу, Токио 182-8585, Япония*

Email: [hayakawa@hi-seismo-em.jp](mailto:hayakawa@hi-seismo-em.jp)

## ВОЗМУЩЕНИЕ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НАД ОЧАГОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И АНОМАЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ ГЛОБАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА. Часть 2. АНОМАЛИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРАХ

Моделируется влияние неоднородности ионосферы над очагом землетрясения на Тайване на записи электрической и магнитных компонент радиоволн в диапазоне частот шумановского резонанса, производимые в Японии. Изменения в спектре сигнала происходят за счет интерференции прямой волны с волнами, отраженными от неоднородности. Используется модель возмущения ионосферной проводимости, описанная в первой части работы и решение задачи дифракции и рассеяния радиоволн, построенное с помощью интегрального уравнения Стрэттона-Чу. Для описания пространственного распределения естественных источников (мировых гроз) применяются данные спутника «Оптический импульсный детектор» (*Optical Transient Detector*). Расчеты показали, что в области частот четвертого мода шумановского резонанса в энергетических спектрах всех компонент поля возникают резкие изменения, похожие на данные наблюдений. Обсуждаются свойства моделируемых аномалий, вызванных сейсмической активностью. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 24 назв.

**Ключевые слова:** шумановский резонанс, проводимость атмосферы, неоднородности ионосферы.

В этой части работы мы рассмотрим электромагнитные поля регулярного промежутка Земля–ионосфера, а также соотношения, учитывающие влияние локальной неоднородности ионосферы на глобальный электромагнитный (шумановский) резонанс. Затем мы рассчитаем вертикальное электрическое и горизонтальное магнитное поле в области частот шумановского резонанса в однородной и неоднородной полости. В заключение обсудим результаты и проинтерпретируем особенности сейсмогенных аномалий спектра.

Полоса частот глобального шумановского резонанса занимает область от нескольких герц до нескольких десятков герц, а резонансные пики наблюдаются в энергетических спектрах естественного сверхнизкочастотного (СНЧ) радишума вблизи 8, 14, 20, 26 Гц и т. д. Необычные радиосигналы в этом диапазоне были описаны в серии работ [1–6]. Статистический анализ непрерывных длительных записей показал, что спектральные искажения появляются в Японии в окрестности 4-го резонансного мода, если землетрясения происходят на Тайване. Данные наблюдений и их интерпретация были обобщены в работе [7].

Возникновение необычных сигналов трактовалось с двух разных позиций. В первом случае использовалось ионосферное возмущение над очагом землетрясения. Второе предполагало появление гиротропных волн, которые возбуждаются подземными процессами в ультранизкочастотном (УНЧ) и СНЧ-диапазонах. Напомним, что УНЧ занимают полосу 0,03...3 Гц, а СНЧ

охватывают диапазон от 3 Гц до 3 кГц. В настоящей работе мы сосредоточимся на интерпретации первого типа и впервые рассчитаем изменения всех компонент электромагнитного поля: вертикального электрического поля  $E$  и двух взаимно ортогональных горизонтальных магнитных полей  $H_{ЗВ}$  и  $H_{ЮС}$ .

**1. Геометрия задачи.** Естественные радиосигналы на низких частотах генерируются мировыми грозами и распространяются в полости Земля–ионосфера. Электромагнитные резонансы в этой полости были предсказаны Шуманом в 1952 г., поэтому их часто называют шумановскими. СНЧ-радиоволна на поверхности Земли имеет только вертикальную электрическую и горизонтальную магнитную компоненты [8]. Магнитное поле ортогонально направлению распространения, его ориентация зависит от расположения источника относительно наблюдателя. В используемой нами локальной декартовой системе координат ось  $OX$  направлена с запада на восток, ось  $OY$  – с юга на север, а ось  $OZ$  – вертикально вверх. На рис. 1 показаны сферическая система координат  $(r, \theta, \varphi)$  и позиции наблюдателя  $(\theta_0, \varphi_0)$ , источника  $(\theta_S, \varphi_S)$  и ионосферного возмущения  $(\theta_R, \varphi_R)$ . Здесь же обозначены все характерные углы и дуги. Азимуты источника и возмущения  $\beta_S$  и  $\beta_R$  измеряются, как на компасе: от направления на север по часовой стрелке.

На вставке в верхнем правом углу рис. 1 показана проекция окрестности обсерватории в декартовых координатах. Здесь обозначены направления прихода прямой и распространения

рассеянной на неоднородности волн, а также ориентация соответствующих магнитных полей. Распространение описывается с помощью комплексной постоянной распространения  $\nu(f)$ , зависящей от частоты. Сама же постоянная распространения, как было описано в первой части работы,

связана с вертикальным профилем проводимости атмосферы. Нами используется так называемая модель «колена», предложенная в [9]. Далее в таблице приведены параметры регулярной и возмущенной ионосферы. Они позволяют рассчитать резонансные спектры [9–11].

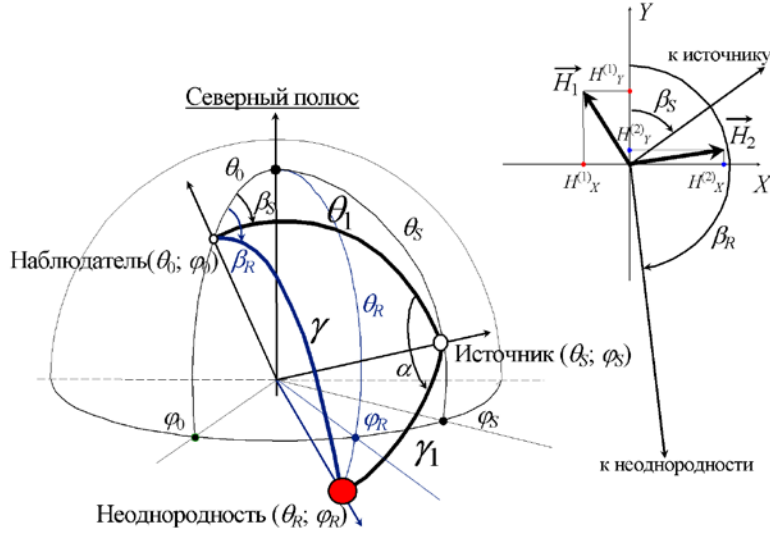


Рис. 1. Геометрия задачи

Параметры регулярной и возмущенной модели ионосферы

Высота колена $h_{KNEE} = 55$ км
Частота колена $f_{KNEE} = 10$ Гц
Высотный масштаб проводимости выше колена $\zeta_a = 2,9$ км
Высотный масштаб проводимости ниже колена $\zeta_b = 8,3$ км
Магнитная высота $h_m^* = 96,5$ км
Магнитная частота $f_m^* = 8$ Гц
Магнитный масштаб проводимости $\zeta_m^* = 4$ км
Параметр частотной зависимости магнитного масштаба проводимости $b_m = 20$ км
Размер неоднородности $d = 1\ 000$ км

**2. Поля однородного резонатора.** При заданном угловом расстоянии источник–приемник  $\theta_1$  поля однородного резонатора рассчитываются по следующим формулам [8, 12]:

$$E(\omega) = \frac{M_C(\omega) i \nu(\nu+1) P_\nu[\cos(\pi - \theta_1)]}{4a^2 \varepsilon_0 h_E^R \omega \sin \pi \nu}, \quad (1)$$

$$H_\varphi(\omega) = -\frac{M_C(\omega) P_\nu^1[\cos(\pi - \theta_1)]}{4ah_M^R \sin \pi \nu}, \quad (2)$$

$$H_{3B} = -H_\varphi \cos \beta_S; \quad (3)$$

$$H_{ЮС} = H_\varphi \sin \beta_S; \quad (4)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1}[\cos \theta_0 \cos \theta_s + \sin \theta_0 \sin \theta_s \cos(\varphi_s - \varphi_0)]; \quad (5)$$

$$\beta_S = \cos^{-1}\left(\frac{\cos \theta_s - \cos \theta_0 \cos \theta_1}{\sin \theta_0 \sin \theta_1}\right). \quad (6)$$

Здесь  $M_C$  обозначает токовый момент источника;  $a$  – радиус Земли;  $h_E^R = \text{Re}(h_0)$  и  $h_E^R = \text{Re}(h_1)$  – реальные части электрической и магнитной характерных высот (см. часть 1 настоящей работы [13]);  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $P_\nu(x)$  и  $P_\nu^1(x)$  – функция Лежандра и присоединенная функция Лежандра, которые вычисляются с помощью рядов зональных гармоник с ускоренной сходимостью [8, 12].

### 3. Учет неоднородности ионосферы.

Постулируем, что сейсмическая активность снижает нижнюю границу ионосферы на 20 км, так что высота колена вместо обычной  $h_{KNEE} = 55$  км принимает значение  $h_{KD} = 35$  км. Все остальные параметры профиля остаются неизменными. Постоянная распространения радиоволн при наличии возмущения находится из тех же соотношений, что и в регулярном резонаторе. Более подробное описание и соответствующие формулы приведены в первой части работы [13]. Величина возмущения убывает к периферии по гауссоиду, а характерный размер модифицированной области принимается равным 1 000 км. Конечно, это упрощенная модель, но она позволяет успеш-

но интерпретировать наблюдаемые аномалии. В частности, она объясняет почему землетрясения на Тайване приводят к аномалиям сигнала именно в Японии, предсказывает появление резких скачков в спектре шумановского резонанса и нарастание эффектов с увеличением частоты.

Снижение высоты колена изменяет «электрическую» высоту профиля от обычного значения  $h_0$  к возмущенному  $h_{ED}$ . Обе величины рассчитываются по формуле (12) из [13], в которую подставляют  $h_{KNEE} = 55$  км или  $h_{KD} = 35$  км. По новой электрической высоте  $h_{ED}$ , получают возмущенную величину  $S_D$  и новую постоянную распространения.

Интегральное уравнение Стрэттона-Чу описывает дифракцию СНЧ-радиоволны на локальной неоднородности, в него входит максимальное возмущение

$$\Delta = \frac{h_1}{h_{ED}} - \frac{h_1}{h_0}. \quad (7)$$

Изменение неоднородности в пространстве описывается функцией

$$\delta = \Delta \cdot \exp\left(\frac{\cos\chi - 1}{d^2}\right), \quad (8)$$

где  $\Delta$  – максимальная неоднородность в центре возмущения;  $\chi$  – угловое расстояние от центра;  $d = \pi/20$  определяет характерный размер области изменений, равный 1 000 км. С помощью уравнения Стрэттона-Чу можно получить следующее выражение для относительного возмущения электрического поля резонансных колебаний [8, 14–17]:

$$B_z = \frac{E_2}{E_1} = \frac{dZ Q_i}{\sin(\pi\nu) P_v [\cos(\pi - \theta_1)]}. \quad (9)$$

Здесь  $E_1$  – поле однородного резонатора;  $E_2$  – поле, рассеянное на локальной неоднородности. Остальные величины определяются соотношениями:

$$dZ = \frac{\pi d^2}{2} \Delta; \quad (10)$$

$$Q_i = B P_v [\cos(\pi - \gamma_1)] P_v [\cos(\pi - \gamma)] - M P_v^1 [\cos(\pi - \gamma_1)] P_v^1 [\cos(\pi - \gamma)]; \quad (11)$$

$$M = \frac{\sin\theta_1 \cos\gamma_1 \cos\alpha - \sin\gamma_1 \cos\theta_1}{\sin\gamma}; \quad (12)$$

$$\cos\alpha = \frac{\cos\gamma - \cos\theta_1 \cos\gamma_1}{\sin\theta_1 \sin\gamma_1}. \quad (13)$$

Поля неоднородного резонатора находят из следующих соотношений:

$$E^D = E_1 (1 + B_z); \quad (14)$$

$$H_{3B}^D = -H_\varphi (\cos\beta_S + B_z \cos\beta_R); \quad (15)$$

$$H_{ЮС}^D = H_\varphi (\sin\beta_S + B_z \sin\beta_R); \quad (16)$$

$$\cos\beta_R = \frac{\cos\varphi_R - \cos\varphi_0 \cos\gamma}{\sin\varphi_0 \sin\gamma}. \quad (17)$$

**4. Результаты моделирования для точечного источника поля.** Рассмотрим работу модели в простейшем случае. Наблюдатель находится в Японии (35,4°с.ш. и 37,5°в.д.). Координаты очага землетрясения на Тайване равны 21,83°с.ш. и 120,54°в.д. Точечный источник расположен в Южной Америке в точке 0°с.ш. и 60°з.д. Как было показано в работах [1–6, 16], при такой геометрии наибольшая аномалия в спектрах шумановского резонанса наблюдается для южноамериканских гроз. Это объясняется тем, что все три точки лежат вблизи одной и той же дуги большого круга, поэтому реализуется режим, близкий обратному рассеянию радиоволн от неоднородности. Модель точечного источника выявляет характерные скачки спектральной плотности, вызванные резкими частотными изменениями модуляционного множителя  $B_z$ . Соответствующие возмущения для вертикальной электрической компоненты поля показаны на рис. 2.

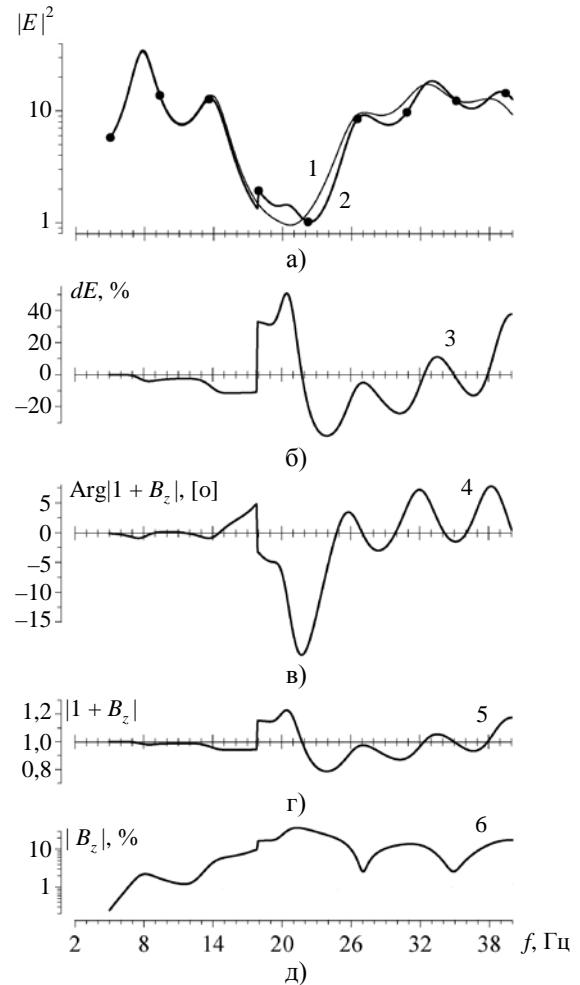


Рис. 2. Резкие возмущения в энергетическом спектре изменения вертикальной электрической компоненты поля в модели точечного источника, расположенного в Южной Америке

Общая абсцисса рис. 2 показывает частоту в герцах. На рис. 2, а в логарифмическом масштабе построены энергетические спектры вертикального электрического поля, возбуждаемые «белым» источником поля ( $M_C(f) = \text{const}$ ). Линия 1 показывает спектр однородного резонатора, регистрируемый в Японии. Линия 2 – это спектр, когда над Тайванем расположено возмущение ионосферы. Видно, что кривая 2 имеет скачок вблизи частоты 17,5 Гц. Резкие изменения спектральной плотности можно заметить, если:

- графики получены со спектральным разрешением не хуже 0,1 Гц;
- по ординате используется логарифмический масштаб.

Если перечисленные условия не выполнены, то скачок поля окажется незаметным, например, если шаг по частоте составляет 0,5...1 Гц.

Линия 3 на рис. 2, б приводит относительные изменения поля  $dE = 100\% (E^D - E_1) / E_1$ . Здесь скачок составляет 40%, он виден яснее, поскольку в окрестности третьего резонансного мода для конкретной геометрии имеется минимум поля прямой волны.

Скачок в графике энергетического спектра кажется подозрительным. Чтобы исключить сомнения, следует указать его причину. Поскольку поле в точке наблюдения состоит из прямой и отраженной от неоднородности волн, происходит их интерференция. Рассеянное поле находится из решения интегрального уравнения Стрэттона-Чу [8, 14–16] с помощью безразмерного параметра (9), чьи частотные изменения определяются двумя членами функции  $Q_i(f)$  в соотношении (11). Эта функция и испытывает скачок при изменении частоты. Угловые расстояния источник–приемник  $\theta_1$ , источник–неоднородность  $\gamma$  и неоднородность–наблюдатель  $\gamma_1$ , а также углы прихода радиоволн играют при этом роль параметров, влияющих на положение скачка над осью частот.

Графики рис. 2, в–д относятся к нормированному возмущению  $B_z$ , они поясняют происхождение скачка. Кривые 4 и 5 на рис. 2, в, г иллюстрируют частотные измерения фазы и амплитуды комплексной величины  $(1 + B_z)$ , характеризующей поле неоднородного резонатора. Кривая 6 рис. 2, д показывает частотную зависимость амплитуды самого относительного возмущения  $|B_z(f)|$ . Как видно, в графиках везде присутствует скачок на частоте 17,5 Гц, что и вызвало аномалию в энергетическом спектре (кривая 2 рис. 2, а). Положение разрыва зависит от взаимного расположения точки источника, наблюдателя и неоднородности.

**5. Модель суточных вариаций в глобальном распределении гроз.** Чтобы сделать модель более реалистичной, необходимо использовать правдоподобное пространственное распре-

деление источников поля. Мы применим глобальное распределение гроз, полученное из космоса спутником «Оптический импульсный детектор» – *Optical Transient Detector* (ОИД) [17]. Эти распределения уже использовались в работах [8, 18, 19]. В настоящем исследовании применяется та же самая модель гроз, что и в работах [1–6, 18]. Данные представляют собой 24 карты глобального распределения, каждая из которых отвечает отдельному часу мирового времени (МВ). Карты были взяты непосредственно из записей ОИД [17], имеющих избыточное пространственное разрешение  $2,5 \times 2,5^\circ$ . Мы увеличили размер ячеек до  $10 \times 10^\circ$  и преобразовали исходную пространственную плотность оптических вспышек в число разрядов в ячейках карты. Увеличение размеров ячеек несущественно для глобального электромагнитного резонанса, поскольку каждая из них остается намного меньше рассматриваемой длины волны. Однако при этом удалось в 16 раз уменьшить число элементов карты и объем вычислений. Центры ячеек расположены на долготах  $-175^\circ, -165^\circ, \dots, +175^\circ$  (с запада на восток) и на широтах  $-85^\circ, -75^\circ, \dots, +85^\circ$  (с юга на север).

Вычисления производились следующим образом. Фиксировалось время суток и выбиралась соответствующая карта мирового распределения гроз. На данной частоте находилась регулярная и возмущенная постоянная распространения, а затем вычислялось относительное возмущение  $B_z$ . Для каждой ячейки карты находили геометрические параметры: дистанции от ячейки до наблюдателя и неоднородности, углы прихода  $\alpha, \beta_S, \beta_R$ , а также безразмерный параметр  $M$  из формулы (12), учитывающий градиенты. Затем с помощью рядов зональных гармоник с ускоренной сходимостью [6, 12, 20] вычислялся вклад ячейки в энергетические спектры компонент поля  $E, H_{ЗВ}$  и  $H_{ЮС}$  при единичном токовом моменте источника  $M_C(\omega) = 1$  в однородном резонаторе. В результате получались «единичные» спектральные плотности однородной полости Земля–ионосфера. В резонаторе с неоднородностью эти поля умножаются на  $B_z$ , что дает «единичное» возмущенное поле. Ожидаемые энергетические спектры, создаваемые ячейкой, получаются умножением «единичных» спектров на число молний  $N_i$  в этой ячейке. Процедура предполагает, что взаимно независимые импульсы молний формируют пуассонов случайный процесс, поэтому энергии отдельных импульсов складываются. И наконец, искомая спектральная плотность данной компоненты поля на фиксированной частоте находится суммированием по всем ячейкам карты. Затем частота сигнала изменяется и вычисления повторяются.

Так были получены частотные изменения спектральной плотности поля в однородном и

неоднородном резонаторе, когда время суток служит параметром. На рис. 3 показаны девиации спектров, т. е. относительные разности энергетических спектров полей в возмущенном и однородном резонаторе для трех характерных моментов МВ: 10, 16 и 20 ч.

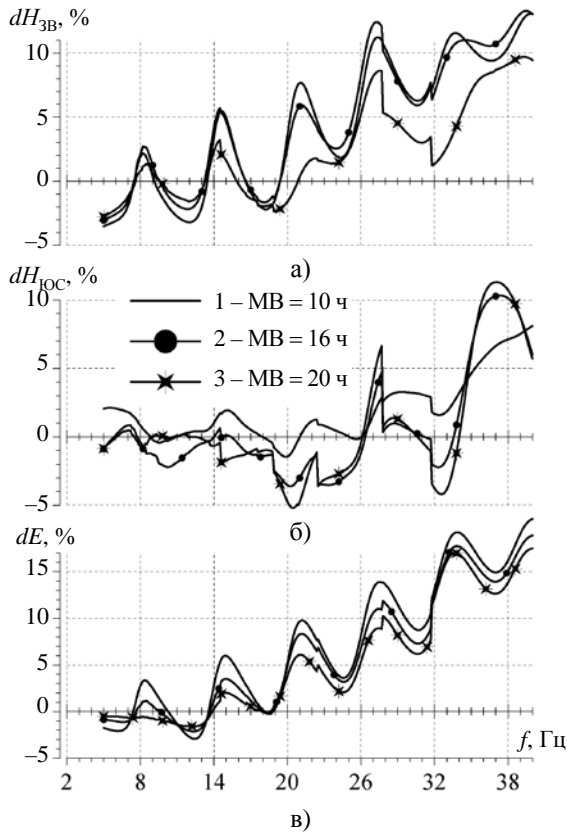


Рис. 3. Спектральные аномалии интенсивности поля в характерные времена суток

Графики на рис. 3 имеют общую абсциссу, вдоль которой отложена частота от 2 до 40 Гц. Сверху вниз показаны относительные девиации энергетических спектров компонент поля:

$$dH_{YOC} = 100 \% (\langle |H_{YOC}^D|^2 \rangle - \langle |H_{YOC}|^2 \rangle) / \langle |H_{YOC}|^2 \rangle,$$

$$dH_{ZB} = 100 \% (\langle |H_{ZB}^D|^2 \rangle - \langle |H_{ZB}|^2 \rangle) / \langle |H_{ZB}|^2 \rangle,$$

$$dE = 100 \% (\langle |E^D|^2 \rangle - \langle |E|^2 \rangle) / \langle |E|^2 \rangle.$$

Гладкие линии 1 отвечают 10 ч МВ, когда доминируют грозы Юго-Восточной Азии. Линии 2 (с точками) показывают спектры в 16 ч МВ, когда грозы сосредоточены в Африке, а линии 3 (со звездочками) соответствуют 20 ч МВ, когда активность переместилась в Америку. Как видно, сейсмическое возмущение ионосферы вызывает изменения в спектрах, нарастающие с частотой и хорошо различимые в окрестности четвертого резонансного мода. Модификации заметны в обоих магнитных компонентах поля, что отмечалось экспериментально. Изменения присутствуют

также в спектрах вертикального электрического поля, однако чувствительнее всего оказывается компонента поля  $H_{YOC}$ . Полученные спектральные скачки напоминают узкие пики, наблюдавшиеся в работах [5, 6] в окрестности 25 Гц.

Расчеты снова приводят к скачкам спектральной плотности, связанным с интерференцией волн в параметре рассеяния  $V_z$ . Источники колебаний теперь распределены по всей поверхности Земли, но в точке наблюдения прямые волны встречаются с отражениями от неоднородности. Оказывается, что для фиксированных наблюдателя и неоднородности имеются некоторые «удачные» положения источников, которые усиливают аномалии.

Поскольку грозы в течение суток обходят земной шар, должны существовать временные интервалы, когда аномалии видны ярче всего. На рис. 4 приведены обзорные динамические спектры шумановского резонанса в однородном (слева) и неоднородном (справа) резонаторе. Здесь в виде двумерных карт над плоскостью время–частота показаны динамические спектры всех трех компонент поля. Левую часть рисунка занимают суточные записи в однородном резонаторе, а правую – такие же точно записи, но в резонаторе с неоднородностью.

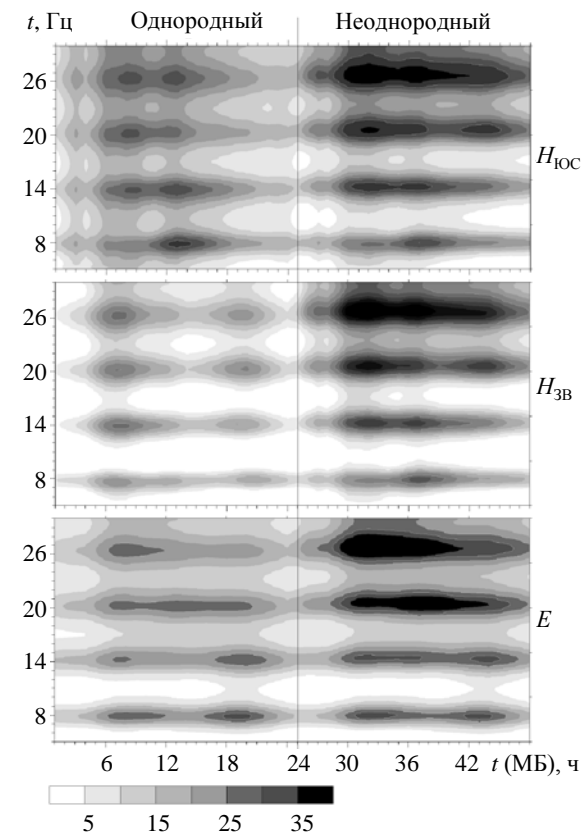


Рис. 4. Цифровые сонограммы шумановского резонанса: в однородном резонаторе (слева) и резонаторе с возмущением (справа)

Вдоль абсциссы показано МВ в часах, а по ординате отложена частота в герцах. Спектральная плотность показана темной заливкой, и соответствующая шкала приведена в нижней части рисунка. Панели показывают динамические спектры компонент поля  $H_{ЮС}$ ,  $H_{ЗВ}$ , и  $E$  (сверху вниз). Неоднородность ионосферы возникает в 25 ч МВ. Этот момент отмечен вертикальной линией. Рисунок иллюстрирует заметное возрастание интенсивности колебаний в окрестности третьего и четвертого модов.

В экспериментальных наблюдениях такие изменения можно отнести на счет случайного, сравнительно кратковременного увеличения активности мировых гроз или их пространственного перераспределения в течение конкретного дня.

Чтобы подчеркнуть характер аномалии, лучше использовать спектры относительных отклонений спектральной плотности, показанные на рис. 5.

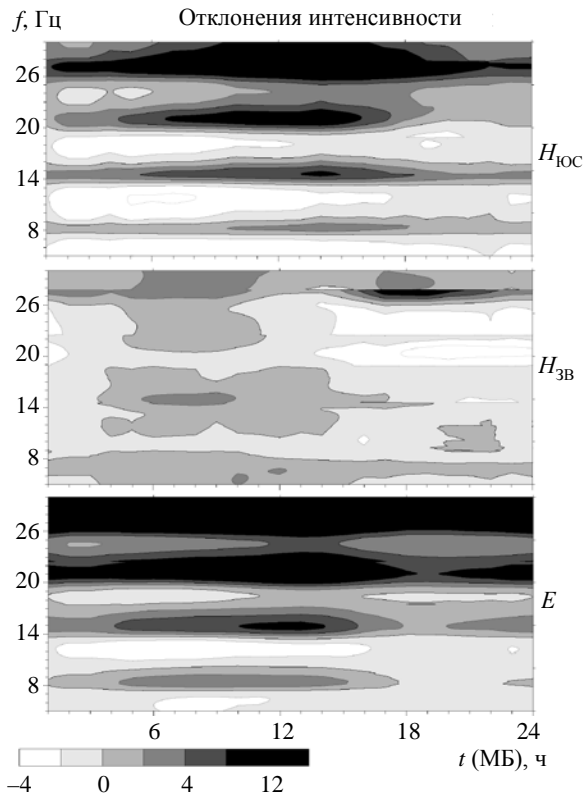


Рис. 5. Динамические спектры аномалий интенсивности

Здесь по горизонтальной оси показан интервал 24 ч, а величина девиаций обозначена заливкой. Аномалии стали заметнее, поскольку появились характерные горизонтальные линии в окрестности скачков спектральной плотности, наблюдаемых в определенные временные интервалы. Резкие горизонтальные линии проявляются особенно ярко на частотах чуть выше 4-го мода в

компоненте поля  $H_{ЗВ}$ , тогда как наиболее чувствительной к неоднородности над Тайванем оказывается интенсивность горизонтальной магнитной компоненты  $H_{ЮС}$ .

**6. Обсуждение результатов.** Расчеты показывают, что локальная неоднородность ионосферы над очагом землетрясения на Тайване повышает интенсивность шумановского резонансного сигнала в Японии, особенно на высших типах колебаний. Моделирование подсказывает, что искать сейсмические возмущения ионосферы следует в относительных отклонениях энергетических спектров всех компонент поля. При этом роль «эталонных» данных должны играть спектры регулярного резонатора. Их можно получить путем усреднения записей за несколько спокойных дней до землетрясения. Например, можно использовать скользящее среднее спектров для данного часа наблюдений за две недели записей, а затем строить девиации от среднего для каждого дня наблюдений. Возможны и другие схемы, например [21].

Интерференция, увеличивающая наблюдаемое поле, усиливается, если грозы находятся в некоторой области, где геометрия распространения и рассеяния оптимальна. Если мировые грозы занимают обширную область, то эффект размывается. Расчетные спектры следует рассматривать как модель возможных аномалий в Японии во время землетрясения на Тайване, поскольку не известно, как именно располагались грозы в день землетрясения. Мы можем утверждать, однако, что сейсмические аномалии будут видны ярче, если использовать относительные изменения спектров. Этот вывод подтверждается как в модели точечного источника, так и при глобальном распределении гроз. Изменения могут достигать 10–15 % в окрестности четвертого мода шумановского резонанса, что связано со специфическим расположением наблюдателя, очага землетрясения и источников поля.

Моделирование подтвердило появление аномалий шумановского резонанса в Японии во время землетрясений на Тайване. Подчеркнем, что необычные сигналы возникают исключительно в полосе частот шумановского резонанса. Действительно, мы знаем, что изменения профиля проводимости происходят на высотах ниже 60...70 км. Мы не будем обсуждать конкретные физико-химические механизмы возникновения таких возмущений, их можно найти в обзорной статье [21]. Отметим только, что самое простое объяснение связывает увеличение проводимости с эманацией из очага землетрясения некоторых радиоактивных веществ, например, радона, который проходит через стратосферу, достигает мезо-

сферы и увеличивает ионизацию. Возникновение неоднородности на этих высотах трудно подтвердить с помощью современных независимых наблюдений, поскольку обнаружение соответствующих ионизирующих веществ, да и проведение измерений на высотах 60...70 км и ниже вряд ли выполнимо даже при самом современном оборудовании.

Альтернативные и более сложные механизмы возникновения неоднородности включают гравитационные волны в атмосфере, излучение от подземной электрической активности и пр.

В первой части работы [13] мы показали, что снижение нижней части профиля проводимости заметно влияет только на СНЧ-радиоволны. Действительно, описанное возмущение изменит постоянную распространения на частотах ниже 400 Гц. На частотах около 20 кГц и выше возмущение постоянной распространения окажется очень слабым. Возможно, несколько возрастет затухание радиоволн над очагом землетрясения. Таким образом, неоднородность ионосферы над Тайванем, приводящая к аномальным сигналам шумановского резонанса, останется незамеченной на более высоких частотах, включая СДВ (ОНЧ) диапазон. Возмущение ионосферы стало бы заметным и на СДВ, если бы профиль проводимости понижался целиком. Такое снижение способно вызвать эффекты, аналогичные так называемым "trimp", наблюдаемым в записях сигналов удаленных СДВ-радиопередатчиков [22–24]. Однако наблюдения в Японии не обнаружили СДВ-аномалий, подобных СНЧ-модификациям, что свидетельствует об изменениях ионосферы на высотах 60...70 км и ниже.

Похожие выводы справедливы относительно сейсмогенных изменений полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. ПЭС является признанным инструментом ионосферных исследований, в особенности ее горизонтальных неоднородностей. Легко оценить, что рассмотренные выше возмущения заметно не изменят ПЭС. Действительно, полное электронное содержание увеличится примерно на  $2 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ , поскольку сейсмическая активность создает дополнительные 100 электронов в кубическом сантиметре ( $10^{11} \text{ м}^{-3}$ ) в слое толщиной примерно 20 км. В то же время ионосфера вблизи максимума области F2 характеризуется концентрацией от  $4 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  электронов днем до  $2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$  ночью при толщине около 200 км. Видно, что наша модификация окажется на несколько порядков меньше, чем величина ПЭС, что заметно ниже погрешности измерений. Похоже, что кроме шумановского резонанса никакие другие измерения не в состоянии обнаружить столь небольшие изменения.

**Выводы.** Аномальные сигналы шумановского резонанса можно объяснить локальным возмущением проводимости атмосферы на высотах ниже 60...70 км, расположенным над очагом землетрясения.

Эффект усиливается при удачном расположении наблюдателя, возмущения и источника, поэтому аномалии в спектре шумановского резонанса в Японии ярко проявляются при землетрясениях на Тайване.

Аномальные сигналы выглядят как скачкообразные изменения спектральной плотности всех компонент поля на одних и тех же частотах. Ярче всего рассмотренные вариации видны вблизи 4-го резонансного мода.

Обнаружить возмущения легче, если измерять относительные изменения поля.

#### Библиографический список

1. *Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan* / M. Hayakawa, K. Ohta, A. P. Nickolaenko, Y. Ando // *Ann. Geophys.* – 2005. – 23, N 4. – P. 1335–1346.
2. *Hayakawa M. Diurnal variation of electric activity of global thunderstorms deduced from OTD data* / M. Hayakawa, M. Sekiguchi, A. P. Nickolaenko // *J. Atmos. Electricity.* – 2005. – 25, N 2. – P. 55–68.
3. *Anomalous ELF phenomena in the Schumann resonance band as observed at Moshiri (Japan) in possible association with an earthquake in Taiwan* / M. Hayakawa, A. P. Nickolaenko, M. Sekiguchi et al. // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2008. – 8, N 6. – P. 1309–1316.
4. *Interpretation in terms of gyrotropic waves of Schumann-resonance-like line emissions observed at Nakatsugawa in possible association with nearby Japanese earthquakes* / M. Hayakawa, K. Ohta, V. M. Sorokin et al. // *J. Atmos. Solar-Ter. Phys.* – 2010. – 72, N 3. – P. 1292–1298.
5. *ULF/ELF emissions observed in Japan, possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan* / K. Ohta, K. Umeda, N. Watanabe, M. Hayakawa // *Nat. Hazards Earth System Sci.* – 2001. – 1, N 1. – P. 37–42.
6. *Ohta K. Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan* / K. Ohta, N. Watanabe, M. Hayakawa // *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* – 2006. – 31, N 4–9. – P. 397–402.
7. *Seismogenic effects in the ELF Schumann resonance band* / M. Hayakawa, Y. Hobara, K. Ohta et al. // *IEEEJ Trans. Fundamental material.* – 2011. – 131, N 9. – P. 684–690.
8. *Nickolaenko A. P. Resonances in the Earth-ionosphere cavity* / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Dordrecht-Boston-L.: Kluwer Academic Publ., 2002. – 380 p.
9. *Mushtak V. C. ELF propagation parameters for uniform models of the Earth-ionosphere waveguide* / V. C. Mushtak, E. R. Williams // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* – 2002. – 64, N 18. – P. 1989–2001.
10. *Williams E. R. Distinguishing ionospheric models using Schumann resonance spectra* / E. R. Williams, V. C. Mushtak, A. P. Nickolaenko // *J. Geophys. Res.* – 2006. – 111, N D16. – D16107 (12 p.).
11. *Greifinger P. S. On modeling the lower characteristic ELF altitude from aeronautical data* / P. S. Greifinger, V. C. Mushtak, E. R. Williams // *Radio Sci.* – 2007. – 42, N 2. – RS2S12 (12 p.).

12. *Nickolaenko A.* Schumann resonance for tyros (Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth-Ionosphere Cavity) / A. Nickolaenko, M. Hayakawa. – Tokyo-Heidelberg-N. Y.-Dordrecht-L.: Springer, 2014. – Ser. XI. Springer Geophys. – 348 p.
13. *Николаенко А. П.* Возмущение нижней ионосферы над очагом землетрясения и аномальные сигналы глобального электромагнитного резонанса. Часть 1. Модели ионосферы / А. П. Николаенко, М. Хайакава // Радиофизика и электрон. – 2015. – 6(20), № 1. – С. 32–39.
14. *Николаенко А. П.* О влиянии локальной неоднородности ионосферы на распространение СНЧ-радиоволн / А. П. Николаенко // Изв. вузов. Радиофизика. – 1984. – 27, № 10. – С. 1227–1237.
15. *Nickolaenko A. P.* ELF radio wave propagation in a locally non-uniform Earth-ionosphere cavity / A. P. Nickolaenko // Radio Sci. – 1994. – 29, N 2. – P. 1187–1199.
16. *Model modifications in Schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicenter* / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa, M. Sekiguchi et al. // Ann. Geophys. – 2006. – 24, N 2. – P. 567–575.
17. *Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector* / H. J. Christian, R. J. Blakeslee, D. J. Boccippio et al. // J. Geophys. Res. – 2003. – 108(D), N 1. – P. 4005–4025.
18. *Nickolaenko A. P.* Variations in global thunderstorm activity inferred from the OTD records / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa, M. Sekiguchi // Geophys. Res. Lett. – 2006. – 33, N 6. – L06823 (4 p.).
19. *Pechony O.* Model variations of Schumann resonance based on OTD maps of the global lightning activity / O. Pechony, C. Price, A. Nickolaenko // J. Geophys. Res. – 2006. – 111(A), N 11. – D23102 (12 p.).
20. *Nickolaenko A. P.* Localized ionospheric disturbance over the earthquake epicentre and modifications of Schumann resonance electromagnetic fields / A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2013. – 5, N 3. – P. 271–283.
21. *Hayakawa M.* Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: Electromagnetic phenomena associated with earthquakes / M. Hayakawa, O. A. Molchanov // Radio Sci. Bull. – 2007. – N 320. – P. 8–17.
22. *Dowden R. L.* Phase and amplitude perturbation on sub-ionospheric signals explained in terms of echoes from lightning-induced electron precipitation ionization patches / R. L. Dowden, C. D. D. Adams // J. Geophys. Res. – 1987. – 93, N 9. – P. 11,543–11,550.
23. *Decay of whistler-induced electron precipitation and cloud-ionosphere discharge Trimpis: Observations and analysis* / R. L. Dowden, C. J. Rodger, J. B. Brundell, M. A. Clilverd // Radio. Sci. – 2001. – 36, N 1. – P. 151–169.
24. *Lower ionospheric modifications by lightning EMP: simulation of the night ionosphere over the United States* / C. J. Rodger, M. Cho, M. A. Clilverd, M. J. Rycroft // Geophys. Res. Lett. – 2001. – 28, N 1. – P. 199–202.

Рукопись поступила 12.11.2014.

A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa

## DISTURBANCES OF LOWER IONOSPHERE ABOVE THE CENTER OF EARTHQUAKE AND ANOMALY IN THE GLOBAL ELECTROMAGNETIC RESONANCE SIGNAL PART 2. ANOMALIES IN THE POWER SPECTRA

We model an effect of the ionosphere non-uniformity centered above the earthquake at Taiwan on the Schumann resonance records in Japan. The changes in the resonance spectra arise from the interference of the direct radio wave with the one reflected from the ionosphere modification above the earthquake. The disturbance model is used and it was described in the first part of this work. Solution of the Stratton-Chu integral equation is used for describing the wave diffraction and scattering. Observations of the Optical Transient Detector (OTD) satellite are used for modeling the spatial distribution of global thunderstorms. Computations showed that abrupt changes occur in the spectra of all field components resembling the observational results. The features of seismic anomalies are discussed.

**Key words:** Schumann resonance, the conductivity of the atmosphere, the ionosphere non-uniformity.

О. П. Николаенко, М. Хайакава

## ЗБУРЕННЯ НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ НАД ЦЕНТРОМ ЗЕМЛЕТРУСУ Й АНОМАЛЬНІ СИГНАЛИ ГЛОБАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ. ЧАСТИНА 2. АНОМАЛІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СПЕКТРІВ

Моделюється вплив неоднорідності іоносфери над центром землетрусу на Тайвані в записах шуманівського резонансу в Японії. Зміни в резонансному спектрі відбуваються внаслідок інтерференції звичайних радіосигналів із хвилями, відбитими від неоднорідності над центром землетрусу. Використовується модель збурення провідності іоносфери, яку було отримано у першій частині роботи. Розв'язок інтегрального рівняння Стреттона-Чу використовується для опису дифракції та розсіювання радіохвиль. Розподіл у просторі натуральних джерел випромінювання (світових гроз) базується на оптичних спостереженнях штучного супутника «Оптичний імпульсний детектор». Розрахунки показали, що поблизу четвертого максимуму шуманівського резонансу в енергетичних спектрах усіх компонент поля виникають різкі зміни, подібні до тих, що спостерігались експериментально. Обговорюються властивості модельних аномалій, що пов'язані з сейсмічною активністю.

**Ключові слова:** шуманівський резонанс, провідність атмосфери, неоднорідності іоносфери.