

А.П. Николаенко¹, Ю.П. Галюк², М. Хайакава³

¹Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 64085, Украина
E-mail: sasha@ire.kharkov.ua

²Санкт-Петербургский государственный университет
35, Университетский просп., Санкт-Петербург, Петергоф, 198504, Россия
E-mail: j.galuk@spbu.ru

³Институт Хайакавы, Компания сейсмического электромагнетизма
Инкубационный центр 508 Университета электросвязи
1-5-1 Чофугаока, Чофу, Токио, 182-8585, Япония
E-mail: hayakawa@hi-seismo-em.jp

Интерпретация результатов наблюдений глобального электромагнитного резонанса с помощью локального возмущения ионосферы над очагом землетрясения

***Предмет и цель работы.** Моделируются возмущения амплитудных спектров вертикального электрического и горизонтального магнитного полей сигналов глобального электромагнитного (шумановского) резонанса за счет локальной сейсмогенной неоднородности средней атмосферы. Рассмотрен точечный источник радиоволн, расположенный в Юго-Восточной Азии, Африке или Южной Америке. Наблюдатель расположен в обсерватории Мошири, Япония (44,37° с. ш., 142,25° в. д.), а очаг землетрясения, модифицирующий среднюю атмосферу, находится на Тайване (21,82° с. ш., 120,81° в. д.). Рассмотрены возмущения амплитудных спектров шумановского резонанса. Продемонстрировано их подобие наблюдаемым данным.*

***Методы и методология работы.** Для определения параметров распространения сверхнизкочастотных (СНЧ) радиоволн используется метод полного поля в форме уравнения Риккати. Спектральные компоненты полей вычисляются с помощью двумерного телеграфного уравнения, в котором заложены параметры однородного и неоднородного промежутков Земля–ионосфера.*

***Результаты работы.** Получены численные оценки влияния локальной сейсмогенной неоднородности на амплитудные спектры электрического и магнитного полей в области частот глобального электромагнитного (шумановского) резонанса. Показано подобие модельных и наблюдавшихся спектров.*

***Заключение.** Предложенная модель сейсмогенного возмущения средней атмосферы позволяет успешно интерпретировать наблюдаемые СНЧ-данные. Ил. 3. Библиогр. 16 назв.*

***Ключевые слова:** сейсмогенное возмущение проводимости средней атмосферы, шумановский резонанс, возмущение поля на локальной неоднородности.*

В литературе об электромагнитных проявлениях сейсмической активности многократно обсуждались возмущения проводимости средней атмосферы (мезосферы) и ионосферной плазмы, расположенные над очагом землетрясения. Одной из последних книг, изданных на эту тему, является коллективная монография [1]. Среди множества явлений, сопровожда-

ющих землетрясения, отмечались возмущения спектров глобального электромагнитного (шумановского) резонанса. Причиной таких изменений может служить рассеяние радиоволн, приходящих от мировых гроз, на локальной неоднородности нижней ионосферы, расположенной над очагом землетрясения [2–9]. Как отмечалось в работе [10], в большинстве

опубликованных на эту тему работ вместо реалистичных вертикальных профилей проводимости атмосферы использовалась эвристическая модель колена.

В первой части настоящей работы анализировалось влияние сейсмогенных возмущений профиля проводимости средней атмосферы на радиосигналы в области частот шумановского резонанса [10]. При этом с помощью метода полного поля для конкретных профилей находились комплексные характеристические высоты и частотная зависимость комплексной постоянной распространения СНЧ-радиоволн как в регулярном, так и неоднородном резонаторе Земля–ионосфера. При этом в модели дневного и ночного профиля проводимости $\sigma(z)$ вносились возмущения и рассчитывались новые характеристические высоты. Для плавного перехода день–ночь с помощью двумерных телеграфных уравнений (ДТУ) рассчитывались вертикальное электрическое и горизонтальное магнитное поля в присутствии и в отсутствие локального возмущения. Эти расчеты позволили продемонстрировать работоспособность подхода и выяснить основные свойства модели распространения СНЧ-радиоволн в полости с возмущением. Ниже мы применим эту модель для расчетов возмущений полей, наблюдаемых в Японии, когда очаг землетрясения расположен на Тайване, и сравним расчетные данные с результатами наблюдений.

1. Аномалии, наблюдавшиеся в связи с землетрясениями. Информация об электромагнитных проявлениях сейсмике в диапазоне шумановского резонанса публиковалась многократно, но обычно она воспринимается с недоверием, хотя все готовы признать, что обнаружить электромагнитное излучение от подземной электрической активности, если таковая имеется, легче всего на низких частотах уже из-за того, что они слабо затухают в проводящей почве (см., например, [1–6]). Поэтому мы сначала приведем экспериментальные факты, а затем предложим их возможное объяснение на основе нашей модели.

В течение ряда лет в японских записях шумановского резонанса отмечались аномалии, вызванные землетрясениями на Тайване, т. е. на расстоянии нескольких тысяч километров от наблюдателя. Впервые необычные сигналы

были записаны в обсерватории Накатсугава [3] и ассоциировались с мощным землетрясением на Тайване 21 сентября 1999 г. Наблюдалось аномальное увеличение амплитуды в районе четвертого (а иногда третьего) мода шумановского резонанса. Затем результат был выявлен при статистической обработке записей Накатсугавы для всех тайванских землетрясений с магнитудой выше 5, которые произошли в течение шести лет наблюдений. Подобные изменения в области высших резонансных модов были найдены и в записях обсерватории Мошири при землетрясении на Тайване 26 декабря 2006 г. [5, 6]. Необходимо отметить, что аналогичные наблюдения были выполнены и в Китае [7–10].

Приведем характерные экспериментальные данные, детали и ссылки можно найти в работах [3–10]. В обсерваториях Накатсугава и Мошири ведется мониторинг вертикального электрического и горизонтального магнитного поля: компоненты юг–север, запад–восток. Частоты квантования равны соответственно 100 и 4000 Гц. Спектральный анализ выполняется с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) при длине элементарной реализации около 10 с, поэтому частотное разрешение составляет около 0,1 Гц. В записях шумановского резонанса, выполненных в Японии, отмечались следующие аномалии, ассоциируемые с землетрясениями на Тайване:

- рост амплитуды четвертого (иногда третьего) мода при сдвиге пиковой частоты до 1 Гц;
- аномалии возникают от недели до нескольких дней до землетрясения, отмечаются в течение нескольких дней и существуют при афтершоковой активности;
- по записи ортогональных магнитных компонент поля удалось запеленговать источник необычного радиосигнала. Он оказался близким к азимуту Тайваня.

Всего было отмечено 27 событий, их обработка указала на статистически значимую корреляцию наблюдений в Японии с землетрясениями на Тайване. Что касается подводных землетрясений, то только два из них были связаны с аномалиями. Одно землетрясение было самым мощным, а второе произошло на мелководье.

Представим типичные данные наблюдений [10], а затем сравним их с результатами модель-

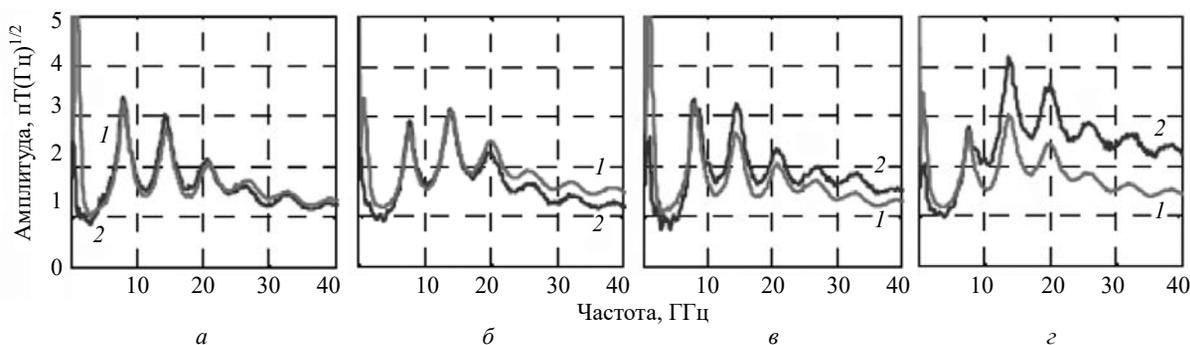


Рис. 1. Средние за месяц энергетические спектры шумановского резонанса, записанные на станции Мошири в интервале от 20 до 22 часов мирового времени; 1 – невозмущенные спектры; 2 – возмущенные спектры: а – компонента $H_{ЮС}$, центрированная относительно 21 декабря 2006 г.; б – компонента $H_{ЗВ}$, центрированная относительно 21 декабря 2006 г.; в – компонента $H_{ЮС}$, центрированная относительно 23 декабря 2006 г.; з – компонента $H_{ЗВ}$, центрированная относительно 23 декабря 2006 г.

ных вычислений рассеяния СНЧ-радиоволн на возмущении проводимости средней атмосферы над Тайванем. Землетрясение, названное Хенгчун (его описание находится на сайте: https://en.wikipedia.org/wiki/2006_Hengchun_earthquakes), произошло на Тайване 26 декабря 2006 г. в 12:26 по гринвичскому, или мировому времени (МВ). Его магнитуда была равна 7, а глубина очага составляла около 10 км. В обсерватории Мошири наблюдались аномальные сигналы, а в Накатсугаве в это время происходила модернизация оборудования, поэтому данные этой обсерватории отсутствуют.

Были проанализированы записи во временных интервалах $08:00 \pm 01:00$ ч, когда максимум мировой грозовой активности наблюдается в Юго-Восточной Азии; в $15:00 \pm 01:00$ ч, когда грозы концентрируются в Африке, и в $21:00 \pm 01:00$ ч, когда грозовая активность сосредоточена в Америке. В последнем временном интервале были обнаружены наиболее заметные аномалии. На рис. 1 приведены четыре панели с экспериментальными спектрами шумановского резонанса, измеренными в интервале $21:00 \pm 01:00$ ч при наличии возмущений и в их отсутствие. На рис. 1, а показан спектр компоненты $H_{ЮС}$ «наблюдавшийся» 21 декабря; рис. 1, б приводит соответствующий спектр ортогональной компоненты поля $H_{ЗВ}$ на ту же дату. Графики на рис. 1, в и з содержат спектры тех же полей, «измеренных» 23 декабря. По осям абсцисс всех рисунков отложена частота в герцах, а по осям ординат – спектральная плотность амплитуды. Поясним, почему слово «измеренный» было взято в кавычки. Дело

в том, что кривые 1 показывают невозмущенные энергетические спектры, усредненные в интервале ± 15 дней относительно спокойного дня 21 декабря. Кривые 2 показывают аналогичные спектры, но в интервале ± 15 суток, центрированном относительно дня с возмущениями 23 декабря.

У спектральных аномалий, зарегистрированных японскими обсерваториями, наблюдаются сходные черты. Необычные резонансные сигналы связаны с землетрясениями только на Тайване, они обнаружены на обеих станциях в записях разных лет. Возмущения спектров более заметны на высших модах шумановского резонанса. Важно, что сигналы носили характер предвестника, они наблюдались за несколько дней до землетрясения.

Имелись и отличия: аномалии в обсерватории Мошири были широкополосными, а в Накатсугаве – узкополосными. Спектральные возмущения в Мошири наблюдались в течение короткого, а в Накатсугаве – длительного промежутка времени. Как видно из рис. 1, заметные изменения в Мошири отмечены в интервале $21:00 \pm 01:00$ ч МВ для записей, центрированных относительно 23 декабря 2006 г. Сигнал в Мошири наблюдался до главного удара и отсутствовал после него.

2. Используемая модель. Для объяснения наблюдаемых спектральных аномалий мы используем интерференцию прямых волн, приходящих от мировых грозовых центров, и волн, отраженных от локальной неоднородности ионосферы, расположенной над будущим очагом землетрясения [11]. В свободном пространстве

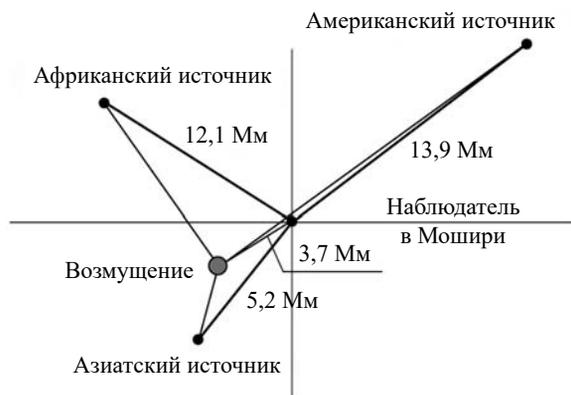


Рис. 2. Геометрия трасс распространения прямой и отраженной волн для трех точечных мировых грозовых центров, наблюдателя в Мошири (о. Хоккайдо) и неоднородности над Тайванем

геометрическая разность хода прямой и отраженной от препятствия волн определяет, на какой частоте поля сложатся в фазе и усилят друг друга. Мы рассмотрим случаи, когда мировая грозовая активность сосредоточена в одном из центров: в Африке, в Америке или Юго-Восточной Азии. Это позволит оценить характер аномалий в разное время суток. Приведем характерные параметры трасс распространения для этих трех компактных мировых грозовых центров (рис. 2).

Существует очевидная причина, по которой южноамериканские грозы могут играть выдающуюся роль в наблюдениях шумановского резонанса в Японии – эти разряды расположены вблизи антипода обсерваторий. Так, например, у пункта наблюдений Мошири координаты равны 44,37° с. ш. и 142,25° в. д., поэтому ее антипод 44,37° ю. ш. и 37,75° з. д. находится

недалеко от Южной Америки, что может обусловить усиление сигналов шумановского резонанса в электрической компоненте поля.

Принимая во внимание большую длину волны и, соответственно, значительную ширину антиподной зоны, можно ожидать заметную чувствительность японских записей шумановского резонанса к южноамериканской грозовой активности. Поскольку расстояние от Японии до Тайваня составляет около 3 Мм, амплитуды прямой и рассеянной на тайванской неоднородности волн окажутся сравнимыми по величине.

Результат интерференции прямых и отраженных волн зависит от их амплитуд и разности фаз, которые определяются взаимным расположением источника, приемника и неоднородности. Основные геометрические параметры представлены в таблице и на рис. 2.

Расположению американских источников на глобусе отвечает обратное рассеяние радиоволн от неоднородности над Тайванем. Поэтому влияние локальной неоднородности должно усиливаться, когда СНЧ-радиосигнал приходит из Америки, однако при этом амплитуды прямой и отраженной волн уменьшаются из-за большой дистанции до источника поля (см. таблицу).

Можно оценить частоту, на которой прямая и отраженная от ионосферного возмущения волны сложатся в фазе. Разность хода прямой и отраженной от неоднородности волн составит около 7 Мм для источников в Южной Америке. Поэтому интерференция усилит сигналы от американских гроз на частотах, у которых длина волны равна 7 Мм, т. е. в окрестности шес-

Геометрические параметры трех конфигураций «источник – наблюдатель – неоднородность» (землетрясение Hengchun (21,82° с. ш., 120,81° в. д.), магнитуда 7, произошло в 12:26 МВ 26.12. 2006)

Обсерватория Мошири (44,37° с. ш., 142,25° в. д.)				Обсерватория Накатсугава (35,45° с. ш., 137,3° в. д.)			
Точечный источник	Расстояние, Мм			Точечный источник	Расстояние, Мм		
	I	II	III		I	II	III
Азия (10° с. ш., 105° в. д.)	5,22	3,68	2,34	Азия (10° с. ш., 105° в. д.)	4,32	3,17	2,34
Африка (0° с. ш., 25° в. д.)	12,12	3,68	8,90	Африка (0° с. ш., 25° в. д.)	12,00	3,17	8,90
Америка (0° с. ш., 5° з. д.)	13,85	3,68	16,55	Америка (0° с. ш., 75° з. д.)	14,84	3,17	16,55

Примечание. I – источник – наблюдатель; II – наблюдатель – неоднородность; III – источник – неоднородность.

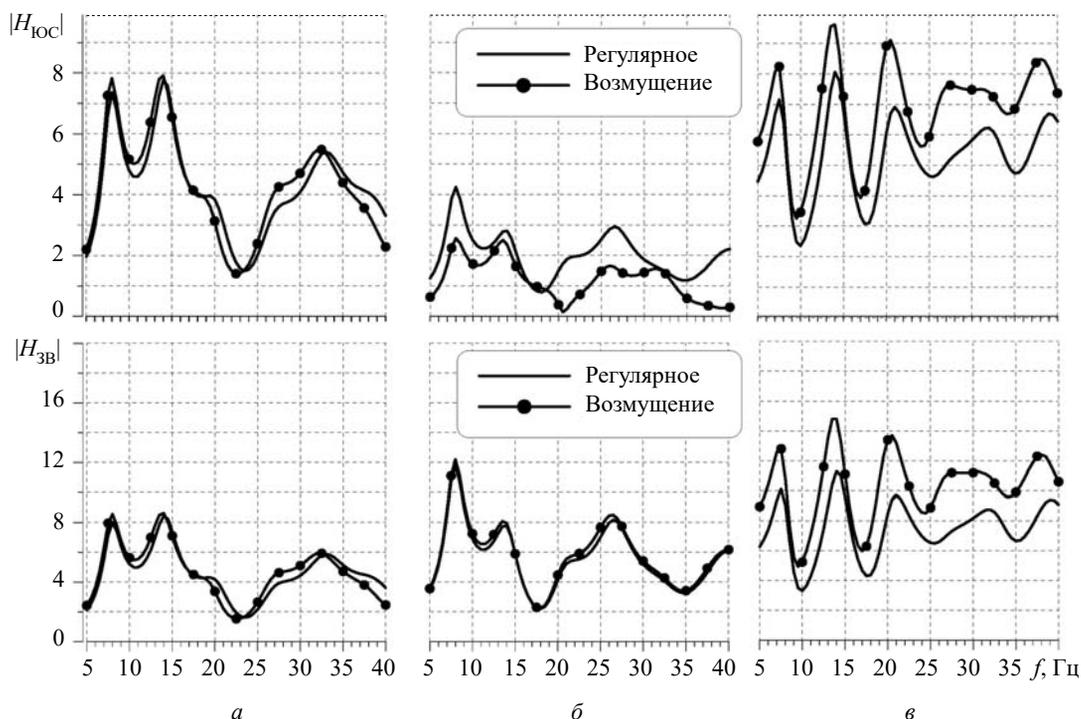


Рис. 3. Амплитудные спектры шумановского резонанса в двух компонентах поля для обсерватории Мошири при трех положениях точечного источника: *a* – в Южной Америке; *б* – в Африке; *в* – в Юго-Восточной Азии

того резонансного пика (мода), или 38 Гц. Аналогичные соображения показывают, что при прочих равных условиях взаимодействие прямых и рассеянных сигналов от азиатских или африканских источников должно особенно увеличивать амплитуду поля на более высоких частотах, вне диапазона уверенной регистрации пиков шумановского резонанса. В этих рассуждениях не учитывался знак коэффициента отражения от неоднородности.

3. Результаты моделирования. Ионосферное возмущение, связанное с сейсмической активностью, было описано в работе [11], которая по сути является первой частью настоящего исследования. Там же приведены результаты моделирования, которые показали, что величина эффекта от локальной неоднородности мало чувствительна к наличию неоднородности день–ночь. Поэтому в дальнейшем будем полагать, что сейсмогенное возмущение нижней ионосферы происходит в однородном резонаторе Земля–ионосфера.

В результатах, представленных на рис. 3, предполагается, что локальное возмущение проводимости средней атмосферы расположено над очагом землетрясения, оно максималь-

но в центре, обладает круговой симметрией и убывает вдоль радиуса по гауссовому закону. Радиальный масштаб возмущения равен $d = 2$ Мм (1 Мм = 1000 км).

Решение электромагнитной задачи вычисляем с помощью метода сеток, используя двумерные телеграфные уравнения (ДТУ) в рамках описанной геометрии. Основное внимание будет уделено расчету двух взаимно ортогональных компонент $H_\theta = H_{СЮ}$ и $H_\varphi = H_{ЗВ}$ горизонтального магнитного поля и сопоставлению полученных модельных данных с наблюдениями.

Поскольку экспериментальные записи были центрированы относительно 23 декабря, расчеты следовало бы проводить для зимнего солнцестояния, когда центр ночной полусферы располагается на северном тропике ($22,5^\circ$ с. ш.). Однако, как показало моделирование в первой части настоящего исследования [11], неоднородность ионосферы типа день–ночь оказывает второстепенное влияние на величину возмущений поля за счет неоднородности, локализованной над очагом землетрясения. Поэтому глобальной неоднородностью и временем года можно пренебречь. Результаты расчетов показаны на рис. 3. Здесь гладкие кривые показыва-

ют спектры в однородном (регулярном) промежутке Земля–ионосфера, а кривые с точками – аномальные спектры. Графики расположены слева направо и отвечают максимуму мировой грозовой активности, расположенному в Юго-Восточной Азии, Африке или в Америке, что соответствует мировому времени около 10:00, 16:00 и 20:00 ч. Частота в диапазоне от 5 до 40 Гц показана вдоль оси абсцисс каждого графика, а спектральная плотность амплитуды отложена по оси ординат в условных единицах.

Вычисления показали, что локальное возмущение проводимости средней атмосферы над Тайванем способно заметным образом изменить (преимущественно увеличить) амплитуду колебаний шумановского резонанса, особенно на высших модах, при условии, что наблюдатель находится в Японии, т. е. на сравнительно малом расстоянии от центра неоднородности.

Интенсивность резонансных колебаний различных типов и общая форма спектра варьируют в течение дня, что вызвано изменениями уровня и положения мировых гроз. Поскольку точно не известно, какое именно распределение гроз имело место в конкретные дни наблюдений, спектры рис. 3, отвечающие модели точечного источника колебаний, следует рассматривать как оценки возможных эффектов, связанных с проявлениями сейсмической активности. Если сопоставить расчетные спектры рис. 3 с наблюдениями на станции Мошири 21 и 23 декабря 2006 г. (рис. 1), то их подобие окажется очевидным.

4. Обсуждение данных. Представленные результаты говорят о правомерности интерпретации экспериментальных наблюдений с помощью рассеяния сверхнизкочастотных радиоволн на сейсмогенной ионосферной неоднородности. Надо подчеркнуть, что область нижней ионосферы, о которой идет речь, недоступна для современных средств дистанционного зондирования атмосферы, что исключает независимую проверку. Пока что результаты наблюдений глобального электромагнитного резонанса остаются единственным свидетельством возмущений проводимости средней атмосферы до и после землетрясений. Справедливость такой концепции подтверждается результатами наблюдений в других диапазонах радиоволн, где имеется немало свидетельств модификации

ионосферы, особенно ее нижней части, за счет сейсмической активности [1, 2].

Опубликованы результаты подобных сверхнизкочастотных наблюдений, связанные не только с землетрясениями на Тайване. Аналогичные аномалии были отмечены в китайских записях шумановского резонанса [8, 9] во время японского землетрясения с магнитудой 9, произошедшего 11 марта 2011 г. в префектуре Тохоку (*Tohoku-Oki*), которое в русскоязычной литературе обычно называют землетрясением в Фукусиме.

Следует упомянуть, что предлагалось альтернативное объяснение наблюдавшихся аномальных СНЧ-радиосигналов [6, 12, 13], оно основывалось на ионосферных анизотропных волнах. Предполагалось, что такие волны возникают в анизотропной плазме ионосферы под действием узкополосного СНЧ-радиоизлучения на частотах 15...20 Гц, идущего из-под земли. Это излучение формирует поляризационные токи на неоднородностях ионосферной проводимости. Расчеты показывают, что могут возникнуть «гиротропные» волны, распространяющиеся вдоль нижней границы ионосферы со скоростью от десятков до сотен километров в секунду и создающие сигналы, спектр которых похож на данные наблюдений (детали см. в работе [13]).

По нашему мнению, рассеяние СНЧ-радиосигналов от мировых гроз на неоднородностях проводимости мезосферы, вызванных сейсмической активностью, представляется более естественным [14, 15], тем более что оно согласуется с результатами наблюдений в диапазоне ОНЧ (очень низкие частоты, 10...100 кГц) [16]. Оно не требует привлечения отдельного подземного источника узкополосного радиоизлучения с нетривиальными свойствами.

Несомненно, что электромагнитный мониторинг, включающий частоты шумановского резонанса, позволил обнаружить аномальные радиосигналы, ассоциирующиеся с землетрясениями [3–9, 12–16]. При этом возмущения в диапазоне частот глобального электромагнитного резонанса, как правило, носят характер предвестника, поскольку появляются за несколько дней до главного удара землетрясения. Наблюдательные данные хорошо объясняются либо возникновением проводящей неоднород-

ности воздуха в мезосфере над будущим очагом землетрясения, либо рассеянием сейсмогенного СНЧ-радиоизлучения на анизотропной ионосфере. Очевидно, что для прояснения механизмов аномальных сигналов необходимо продолжать исследования в этом направлении.

Выводы. Проведенное рассмотрение позволяет сделать вывод о том, что наблюдаемые экспериментально аномалии в спектрах шумового резонанса с успехом объясняются

рассеянием электромагнитного излучения мировых гроз на неоднородности проводимости средней атмосферы, возникающей над очагом землетрясения. При этом проводимость воздуха изменяется так, как будто часть невозмущенного профиля проводимости на высотах ниже 60...70 км опускается на 20...30 км. Центр возмущения проводимости воздуха расположен над очагом землетрясения, а его характерный радиус по горизонтали составляет 2 Мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ouzounov D., Pulnits S., Hattori K., and Taylor P. *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. Geophys. Monograph Ser. 1st ed. Hoboken, NJ.: John Wiley & Sons, Inc.; Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2018. 384 p.
2. Hayakawa M., Molchanov O.A. Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: Electromagnetic phenomena associated with earthquakes. *Radio Sci. Bull.* 2007. N 320. P. 8–17.
3. Ohta K., Watanabe N., Hayakawa M. Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan. *Phys. Chem. Earth, Pafrts A/B/C*. 2006. Vol. 31, Iss. 4–9. P. 397–402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.031>.
4. Nickolaenko A.P., Hayakawa M., Sekiguchi M., Ando Y. and Ohta K. Model modifications in Schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicenter. *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24, N 2. P. 567–575. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-24-567-2006>.
5. Hayakawa M., Nickolaenko A.P., Sekiguchi M., Yamashita K., Yu-ichi Ida, Yano M. Anomalous ELF phenomena in the Schumann resonance band as observed at Moshiri (Japan) in possible association with an earthquake in Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008. Vol. 8, N 6. P. 1309–1316. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1309-2008>.
6. Hayakawa M., Hobara Y., Ohta K., Izutsu J., Nickolaenko A.P., Sorokin V. Seismogenic effects in the ELF Schumann resonance band. *IEEJ Trans. FM*. 2011. Vol. 131, Iss. 9. P. 684–690. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejfms.131.684>.
7. Schekotov A.Y., Molchanov O.A., Hayakawa M., Fedorov E.N., Chebrov V.N., Sinitsin V.I., Gordeev E.E., Andreevsky S.E., Belyaev G.G., Yagova N.V., Gladishev V.A. and Baransky L.N. About possibility to locate an EQ epicenter using parameters of ELF/ULF preseismic emission. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008. Vol. 8, Iss. 6. P. 1237–1242. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1237-2008>.
8. Zhou H., Zhou Z., Qiao X. and Yu H. Anomalous phenomena in Schumann resonance band observed in China before the 2011 magnitude 9.0 Tohoku-Oki earthquake in Japan. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. Vol. 118, Iss. 23. P. 13,338–13,345. DOI: 10.1002/2013JD020269.
9. Schekotov A.Y., Zhou H.J., Qiao X.L., Hayakawa M. ULF-ELF Atmospheric radiation in possible association to the 2011 Tohoku earthquake as observed in China. *Earth Sci. Res.* 2016. Vol. 5, N 2, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/esr.v5n2p47>.
10. Hayakawa M., Hobara Y., Ohta K., Izutsu J., Nickolaenko A.P., Sorokin V. Seismogenic effects in the ELF Schumann resonance band. *IEEJ Trans. Fundam. Mater.* 2011. Vol. 131, Iss. 9. P. 684–690. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejfms.131.684>.
11. Николаенко А.П., Галюк Ю.П., Хайакава М. Модель локального возмущения нижней ионосферы над очагом землетрясения и его влияние на сигналы глобального электромагнитного резонанса. *Радіофізика та електроніка*. 2019. Т. 24, № 1. С. 33–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2019.01.033>.
12. Sorokin V.M., Hayakawa M. On the generation of narrow-banded ULF/ELF pulsations in the lower ionospheric conducting layer. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, Iss. A6. P. A06306 (6 p.). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JA013094>.
13. Hayakawa M., Ohta K., Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Izutsu J., Hobara Y. and Nickolaenko A.P. Interpretation in terms of gyrotronic waves of Schumann-resonance-like line emissions observed at Nakatsugawa in possible association with nearby Japanese earthquakes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010. Vol. 72, Iss. 17. P. 1292–1298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.014>.
14. Ohta K., Izutsu J., Schekotov A. and Hayakawa M. The ULF/ELF electromagnetic radiation before the 11 March 2011 Japanese earthquake. *Radio Sci.* 2013. Vol. 48, Iss. 5. P. 589–596. DOI: <https://doi.org/10.1002/rds.20064>.
15. Hayakawa M., Rozhnoi A., Solovieva M., Hobara Y., Ohta K., Schekotov A. and Fedorov E. The lower ionospheric perturbation as a precursor to the 11 March 2011 Japan earthquake. *Geomat. Nat. Haz. Risk.* 2013. Vol. 4, Iss. 3. P. 275–287. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2012.751938>.
16. Asano T. and Hayakawa M. On the Tempo-Spatial Evolution of the Lower Ionospheric Perturbation for the 2016 Kumamoto Earthquakes from Comparisons of VLF Propagation Data Observed at Multiple Stations with Wave-Hop Theoretical Computations. *Open J. Earthq. Res.* 2018. Vol. 7, N 3. P. 161–185. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojer.2018.73010>.

Стаття надійшла 26.12.2018

REFERENCES

1. Ouzounov, D., Pulinet, S., Hattori, K., and Taylor, P., 2018. *Pre-Earthquake Processes: A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies*. Geophys. Monograph Ser. 1st ed. Hoboken, NJ.: John Wiley & Sons, Inc.; Washington, D.C.: American Geophysical Union.
2. Hayakawa, M., Molchanov, O.A., 2007. Seismo-electromagnetics as a new field of radiophysics: Electromagnetic phenomena associated with earthquakes. *Radio Sci. Bull.*, 320, pp. 8–17.
3. Ohta, K., Watanabe, N., Hayakawa, M., 2006. Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan. *Phys. Chem. Earth, Pafrts A/B/C*, 31(4–9), pp. 397–402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.031>.
4. Nickolaenko, A.P., Hayakawa, M., Sekiguchi, M., Ando, Y. and Ohta, K., 2006. Model modifications in Schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicenter. *Ann. Geophys.*, 24(2), pp. 567–575. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-24-567-2006>.
5. Hayakawa, M., Nickolaenko, A.P., Sekiguchi, M., Yamashita, K., Yu-ichi, Ida, Yano, M., 2008. Anomalous ELF phenomena in the Schumann resonance band as observed at Moshiri (Japan) in possible association with an earthquake in Taiwan. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8(6), pp. 1309–1316. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1309-2008>.
6. Hayakawa, M., Hobar, Y., Ohta, K., Izutsu, J., Nickolaenko, A. P., Sorokin, V., 2011. Seismogenic effects in the ELF Schumann resonance band. *IEEJ Trans. FM*, 131(9), pp. 684–690. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejfms.131.684>.
7. Schekotov, A.Y., Molchanov, O.A., Hayakawa, M., Fedorov, E.N., Chebrov, V.N., Sinitsin, V.I., Gordeev, E.E., Andreevsky, S.E., Belyaev, G.G., Yagova, N.V., Gladishev, V.A. and Baransky, L.N., 2008. About possibility to locate an EQ epicenter using parameters of ELF/ULF preseismic emission. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8(6), pp. 1237–1242. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-8-1237-2008>.
8. Zhou, H., Zhou, Z., Qiao, X. and Yu, H., 2013. Anomalous phenomena in Schumann resonance band observed in China before the 2011 magnitude 9.0 Tohoku-Oki earthquake in Japan. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(23), pp. 13338–13345. DOI: 10.1002/2013JD020269.
9. Schekotov, A.Y., Zhou, H.J., Qiao, X.L., Hayakawa, M., 2016. ULF-ELF Atmospheric radiation in possible association to the 2011 Tohoku earthquake as observed in China. *Earth Sci. Res.*, 5(2), pp. 47–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/esr.v5n2p47>.
10. Hayakawa, M., Hobar, Y., Ohta, K., Izutsu, J., Nickolaenko, A.P., Sorokin, V., 2011. Seismogenic effects in the ELF Schumann resonance band. *IEEJ Trans. Fundam. Mater.*, 131(9), pp. 684–690. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejfms.131.684>.
11. Nickolaenko, A.P., Galuk, Yu.P., Hayakawa, M., 2019. Model of local disturbance in lower ionosphere over the earthquake and its effect on signals of global electromagnetic resonance. *Radiophys. Electron.*, 24(1), pp. 33–46 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2019.01.033>.
12. Sorokin, V.M., Hayakawa, M., 2008. On the generation of narrow-banded ULF/ELF pulsations in the lower ionospheric conducting layer. *J. Geophys. Res.*, 113(A6), pp. A06306 (6 p.). DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JA013094>.
13. Hayakawa, M., Ohta, K., Sorokin, V.M., Yaschenko, A.K., Izutsu, J., Hobar, Y. and Nickolaenko, A.P., 2010. Interpretation in terms of gyrotronic waves of Schumann-resonance-like line emissions observed at Nakatsugawa in possible association with nearby Japanese earthquakes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 72(17), pp. 1292–1298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.014>.
14. Ohta, K., Izutsu, J., Schekotov, A. and Hayakawa, M., 2013. The ULF/ELF electromagnetic radiation before the 11 March 2011 Japanese earthquake. *Radio Sci.*, 48(5), pp. 589–596. DOI: <https://doi.org/10.1002/rds.20064>.
15. Hayakawa, M., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Hobar, Y., Ohta, K., Schekotov, A. and Fedorov, E., 2013. The lower ionospheric perturbation as a precursor to the 11 March 2011 Japan earthquake. *Geomat. Nat. Haz. Risk*, 4(3), pp. 275–287. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2012.751938>.
16. Asano, T. and Hayakawa, M., 2018. On the Tempo-Spatial Evolution of the Lower Ionospheric Perturbation for the 2016 Kumamoto Earthquakes from Comparisons of VLF Propagation Data Observed at Multiple Stations with Wave-Hop Theoretical Computations. *Open J. Earthq. Res.*, 7(3), pp. 161–185. DOI: <https://doi.org/10.4236/ojer.2018.73010>.

Received 26.12.2018

A.P. Nickolaenko¹, Yu.P. Galuk², M. Hayakawa³

¹O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine
12, Acad. Proskura st., Kharkov, 61085, Ukraine

²Saint-Petersburg State University
Universitetskii prospekt 35, Peterhof, Saint Petersburg, 198504, Russia

³Hayakawa Institute of Seismo Electromagnetics Co. Ltd. (HISEM)
508 Incubation center of the University of Electro-Communications (UEC)
Japan, Tokyo

INTERPRETATION OF OBSERVATIONS OF GLOBAL
ELECTROMAGNETIC RESONANCE BY IONOSPHERE NON-UNIFORMITY
LOCALIZED OVER THE EARTHQUAKE CENTER

Subject and purpose. We model disturbances in amplitude spectra of vertical electric and horizontal magnetic field components of the signals of global electromagnetic (Schumann) resonance by a seismogenic non-uniformity of the middle atmosphere. The point field source is used positioned at S-E Asia, Africa, or S. America. Observer is found at the Moshiri observatory in

Japan (44.37° N, 142.24° E.) and the earthquake modifying the middle atmosphere is situated at Taiwan (21.82° N; 120.81° E). Disturbances are computed in amplitude Schumann resonance spectra and their similarity is demonstrated to observational data.

Methods and methodology. The propagation parameters of extremely low frequency (ELF) radio waves are found by using the full wave solution in form of Riccati equation. The spectral components of fields are found numerically by using the two dimension telegraph equations having the parameters of regular and non-uniform Earth – ionosphere cavity.

Results. We obtain numerical estimates for an impact of localized seismogenic non-uniformity on amplitude spectra of electric and magnetic fields in the frequency band of global electromagnetic (Schumann) resonance. Similarity is demonstrated between the model and observational spectra.

Conclusion. The model suggested for a seismogenic non-uniformity in the middle atmosphere allows to successfully interpret the observations ELF data.

Key words: seismogenic disturbance of middle atmosphere conductivity, Schumann resonance, field disturbances by a localized non-uniformity.

О.П. Ніколаєнко¹, Ю.П. Галюк², М. Хаякава³

¹Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

²Санкт-Петербурзький державний університет
35, Університетський проспект, Санкт-Петербург, Петергоф, 198504, Росія

³Інститут Хаякави, Компанія сейсмічного електромагнетизму
Інкубаційний центр 508 Університету електров'язку
1-5-1 Чофугаока, Чофу, Токіо, 182-8585, Японія

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ГЛОБАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЗОНАНСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛОКАЛЬНОГО ЗБУРЕННЯ ІОНОСФЕРИ НАД ОСЕРЕДКОМ ЗЕМЛЕТРУСУ

Предмет і мета роботи. Моделюються збурення амплітудних спектрів вертикального електричного та горизонтального магнітного поля сигналів глобального електромагнітного (шуманівського) резонансу, що виникають завдяки локальній сейсмогенній неоднорідності середньої атмосфери. Розглянуто точкове джерело радіохвиль, розташоване на південному сході Азії, в Африці чи в Південній Америці. Спостерігач розташований в обсерваторії Моширі, Японія (44,37° п. ш., 142,25° с. д.), а осередок землетрусу, що модифікує середню атмосферу, знаходиться на Тайвані (21,82° п. ш., 120,81° с. д.). Розглянуто збурення амплітудних спектрів шуманівського резонансу. Продемонстровано їх подібність до даних спостережень.

Методи і методологія роботи. Для визначення параметрів поширення наднизькочастотних (ННЧ) радіохвиль використовується метод повного поля в формі рівняння Ріккаті. Спектральні компоненти полів знаходяться чисельно за допомогою двовимірного телеграфного рівняння (ДТР), в якому закладені параметри регулярного і неоднорідного проміжку Земля–іоносфера.

Результати роботи. Одержано чисельні оцінки впливу локальної сейсмогенної неоднорідності на амплітудні спектри електричного та магнітного полів в області частот глобального електромагнітного (шуманівського) резонансу. Показано подібність модельних спектрів до спектрів, що спостерігалися.

Висновок. Запропонована модель сейсмогенних збурень середньої атмосфери дозволяє успішно інтерпретувати дані ННЧ-спостережень.

Ключові слова: сейсмогенні збурення провідності середньої атмосфери, шуманівський резонанс, збурення поля на локальній неоднорідності.