

УДК 550.34:550.510.533

ТРОПОСФЕРНЫЕ И ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ВБЛИЗИ И НА УДАЛЕНИИ ОТ СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОГО РЕГИОНА

И.Г. Захаров, А.М. Цымбал

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, 61077, Украина
e-mail: @giz-zig.ukr.net

Поступила в редакцию 12 июня 2011 г.

Проведен анализ экспериментальных данных о вариациях электромагнитного излучения в ОНЧ диапазоне в атмосфере Земли и полного электронного содержания ионосферы вблизи и на больших удалениях от зоны землетрясения. Показано, что вариации ОНЧ излучения в сейсмически спокойном регионе в течение суток и ото дня ко дню имеют особенности, которые коррелируют с изменениями глобальной сейсмической активности. Эффекты в вариациях ОНЧ проявляются как до усиления сейсмической активностью с заблаговременностью, пропорциональной магнитуде землетрясения, так и в первые сутки после него. Влияние сильных землетрясений на широтный ход полного электронного содержания может носить различный характер; экваториальная аномалия, в частности, может исчезать и такой эффект наблюдается на больших удалениях от эпицентра (более 6 тыс. км).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясения, электромагнитное излучение ОНЧ диапазона, полное электронное содержание ионосферы, экваториальная аномалия

Проведено аналіз експериментальних даних про варіації електромагнітного випромінювання в ДНЧ діапазоні в атмосфері Землі і повного електронного вмісту іоносфери поблизу і на великих відстанях від зони землетрусу. Показано, що варіації ДНЧ випромінювання в сейсмічно спокійному регіоні протягом доби і день від дня мають особливості, які корелюють зі змінами глобальної сейсмічної активності. Ефекти у варіаціях ДНЧ проявляються як до посилення сейсмічної активності із завчасністю, пропорційній магнітуді землетрусу, так і в першу добу після нього. Вплив сильних землетрусів на широтний хід повного електронного вмісту може носити різний характер; екваторіальна аномалія, зокрема, може зникати, і такий ефект спостерігається на великих відстанях від епіцентру (більше 6 тис. км).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: землетруси, електромагнітне випромінювання ДНЧ діапазону, повний електронний вміст іоносфери, екваторіальна аномалія

Observational data about variations in VLF emissions and ionospheric total electron content near and at large distances from earthquake areas have been analyzed. The diurnal and day-to-day VLF variations have been shown to have features that correlate with variations in global seismic activity. The effects in the VLF variations occur both prior to enhancements in seismic activity (with the time lag proportional to the earthquake magnitude) and during first 24 h after the earthquake. The effect of violent earthquakes on latitudinal dependence of the total electron content may differ; specifically, the equatorial anomaly can disappear at distances of more than 6,000 km from the epicenter.

KEY WORDS: earthquakes, VLF emissions, total electron content, equatorial anomaly

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для изучения литосферно-атмосферно-ионосферных связей и для практических целей большой интерес представляют исследования различных явлений в период землетрясений, и в частности их предвестников. К таким явлениям относятся аномальные всплески электромагнитного излучения в УНЧ/КНЧ/ОНЧ диапазонах, возмущения основных параметров E и F-областей ионосферы, возмущения параметров сигналов СДВ и КВ радиостанций на трассах, проходящих через зоны землетрясений, вариации состава атмосферного газа, геомагнитные пульсации и целый ряд других эффектов. Накоплено достаточно большое количество экспериментальных данных о проявлениях таких эффектов. Однако, следует заметить, что большая их часть относится к зоне, где происходит землетрясение (области $R(км) = e^M$, которую определяют как область проявления предвестников, где M – магнитуда землетрясения). В то же время имеется ряд работ [см., например, 1,2], в которых отмечено наличие возмущений в ионосфере на больших удалениях (до ~10 000 км) от локального, но достаточно мощного источника воздействия (старты ракет, мощное коротковолновое излучение и др.); т.е. можно говорить уже о глобальном эффекте таких локальных воздействий. В целом надежной теории, объясняющей всю совокупность явлений, происходящих в околоземном пространстве при землетрясении, и особенно механизмы распространения возмущений на большие расстояния, до сих пор не создано. Открытым остается и вопрос о предвестниках землетрясений, которые могли бы быть положены в основу системы мониторинга и предупреждения о землетрясениях. Поэтому необходимо продолжить экспериментальные исследования влияния землетрясений на околоземное пространство, включая атмосферу, ионосферу и магнитосферу, особенно на больших расстояниях от эпицентра.

В связи с этим в данной работе проведен анализ экспериментальных данных о вариациях электромагнитного излучения в ОНЧ диапазоне в атмосфере Земли и полного электронного содержания ионосферы на больших удалениях от зоны землетрясения.

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Предвестники землетрясений электромагнитной природы обнаружены в целом ряде работ [3-7]. Электромагнитные аномалии, связанные с сейсмической активностью, обычно проявляются за несколько недель – несколько часов до события, как правило, в виде увеличения интенсивности регистрируемого сигнала в 1,5 – 4 раза в широком диапазоне частот $\sim 5 - 150$ кГц; чаще всего рассматривают ОНЧ и СЧЧ диапазоны [3-7]. Землетрясение начинается либо на спаде (более сильные землетрясения), либо после окончания аномального увеличения ЭМИ (более слабые землетрясения). Аномальное увеличение ЭМИ начинается тем раньше, чем больше магнитуда предстоящего землетрясения. Измерения ЭМИ, как и других параметров, обычно проводятся на расстояниях десятки – сотни километров от гипоцентра землетрясения. Отмечается, что накануне землетрясения возможны искажения типичного суточного хода ЭМИ [5].

В целом, несмотря на большой интерес к данной проблеме, измерения ЭМИ в связи с сейсмическими событиями являются эпизодическими. Рассматривают влияние на принимаемый сигнал только относительно близких землетрясений (десятки – сотни километров), тогда как, судя по устойчивому проявлению в записях глобальной грозовой активности, источник излучения может находиться на любом расстоянии от приемника [8,9]. Анализ регистраций проводится только в связи с наиболее сильными землетрясениями в данном регионе, хотя глобальный сейсмический процесс является практически непрерывным и проявляется, в том числе, и в виде слабых землетрясений. Исходя из сказанного, представляет интерес оценить и возможное глобальное влияние землетрясений на электромагнитное излучение, при этом уровень глобальной сейсмической активностей может быть оценен по числу землетрясений с магнитудой выше заданной.

В данной работе для регистрации ОНЧ излучения (диапазон частот 2,5-50 кГц) использовался приемник, который представляет собой измеритель числа импульсов с амплитудой выше заданного порога дискриминации, с широкополосной рамочной антенной (ось X – на север-юг, Y – на запад-восток, Z – в зенит).

Измерения ОНЧ излучения в целом проводятся в непрерывном режиме с конца 2004 г. в Харьковской обл. (49.7° N; 36.2° E), интервал измерения – 1 минута. Здесь представлены данные, полученные в период с 28 апреля 2007 года по 10 мая 2008 года. Для анализа длительных вариаций проводилось усреднение числа импульсов за 1 и 4 суток. Место измерения характеризуется отсутствием сильных искусственных источников электромагнитных помех.

Для поиска в сигналах ОНЧ излучения предвестников землетрясения проведено сопоставление полученных данных с глобальной сейсмической активностью. Данные о землетрясениях взяты из электронных каталогов USGS (<http://neic.usgs.gov/neic/epic/>) и (<http://www.sec.noaa.gov>).

Экспериментальные данные

Суточные вариации. Суточные вариации ОНЧ излучения проявляются во все времена года, но форма вариации подвержена сезонным изменениям. В осенне-зимний период уровень сигнала имеет максимум в неосвещенное время суток. Для весенне-летнего и начала осеннего периодов характерны два максимума суточного хода ОНЧ: ночной и послеполуденный.

В течение большинства дней суточные вариации были однотипными с сохранением соотношения интенсивностей ОНЧ излучения между отдельными компонентами и при наличии квазипериодических изменений ото дня ко дню амплитуды суточных вариаций. В отдельные дни суточные вариации ОНЧ излучения имели заметные и даже значительные особенности, наиболее явные из которых – изрезанность суточного хода, резкое изменение соотношения амплитуд локальных максимумов.

На рис.1 а представлен типичный спектр ОНЧ по оси X. Здесь мы видим выраженную суточную (период 1440 мин) и полусуточную компоненты (720 мин). Также можно выделить периоды 1,5 суток (2160 мин), 3 суток (4320 мин.) и ~7 суток (1080 мин).

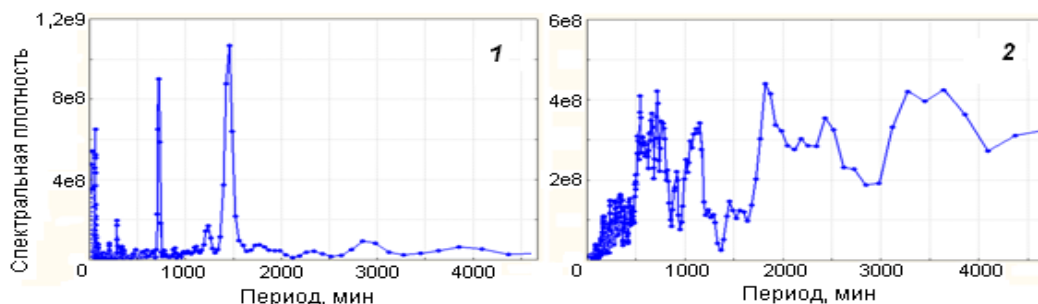


Рис. 1. Спектр ОНЧ излучения по каналу X: а – типичный; б – аномальный

На рис. 1 б представлен аномальный спектр ОНЧ излучения накануне усиления глобальной сейсмической активности (12.04.08), при этом наиболее мощные ЗТ имели магнитуду выше 7. Очевидным является исчезновение суточной компоненты при сохранении полусуточной, при этом появляется новый максимум – 2 суток (2880 мин.). Такое поведение спектра ОНЧ излучения обычно наблюдается в течение 1 – 3 суток подряд, часто в дни, предшествующие землетрясениям (ЗТ), после чего восстанавливается типичный суточный ход.

Изменения интенсивности ОНЧ ото дня ко дню. Значительные изменения амплитуды суточных вариаций ОНЧ имеют периодическую составляющую и обуславливают наличие долговременных изменений интенсивности ОНЧ излучения. Было проведено сопоставление этих вариаций с изменениями уровня глобальной сейсмической активности. Анализируемый период является подходящим для исследования связи между ОНЧ и сейсмической активностью ввиду того, что за это время произошло большое количество землетрясений, в том числе одно из наиболее сильных с магнитудой $M = 8,5$, при этом периоды повышенной сейсмической активности чередовались с относительно спокойными периодами.

Распределение по магнитудам числа землетрясений, зарегистрированных за период наблюдений, заметно отличалось от теоретического, определяемого известным соотношением (1): $\lg_{10} N = a - bM$ [10] и характеризовалось наличием относительного минимума числа ЗТ с магнитудой порядка 5, что позволяет допустить, что более слабые ЗТ отражают фоновую сейсмическую активность, а более сильные – периоды повышенной активности. Поэтому в качестве индикатора глобальной сейсмической активности было выбрано число ЗТ с магнитудой более 5. Данная неравномерность может быть обусловлена иерархией блокового строения земной коры, вследствие которой определенные размеры блоков встречаются заметно чаще [11]. Как следствие, размеры области подготовки землетрясения (V) и, соответственно, их магнитуды ($M \sim V$) также должны встречаться с разной частотой.

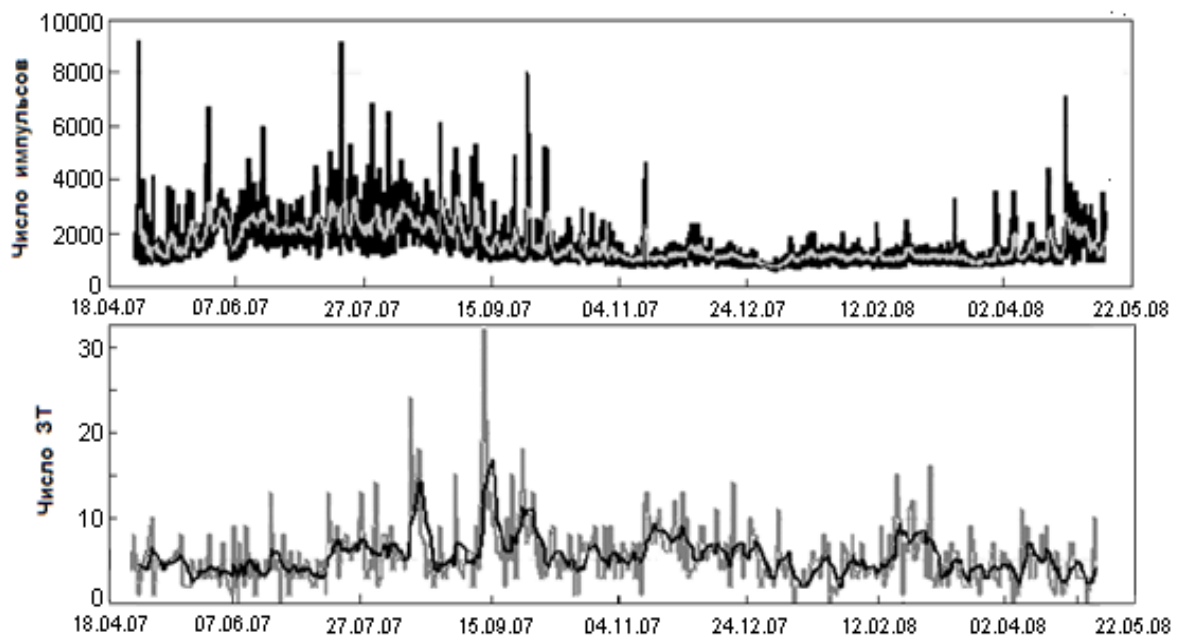
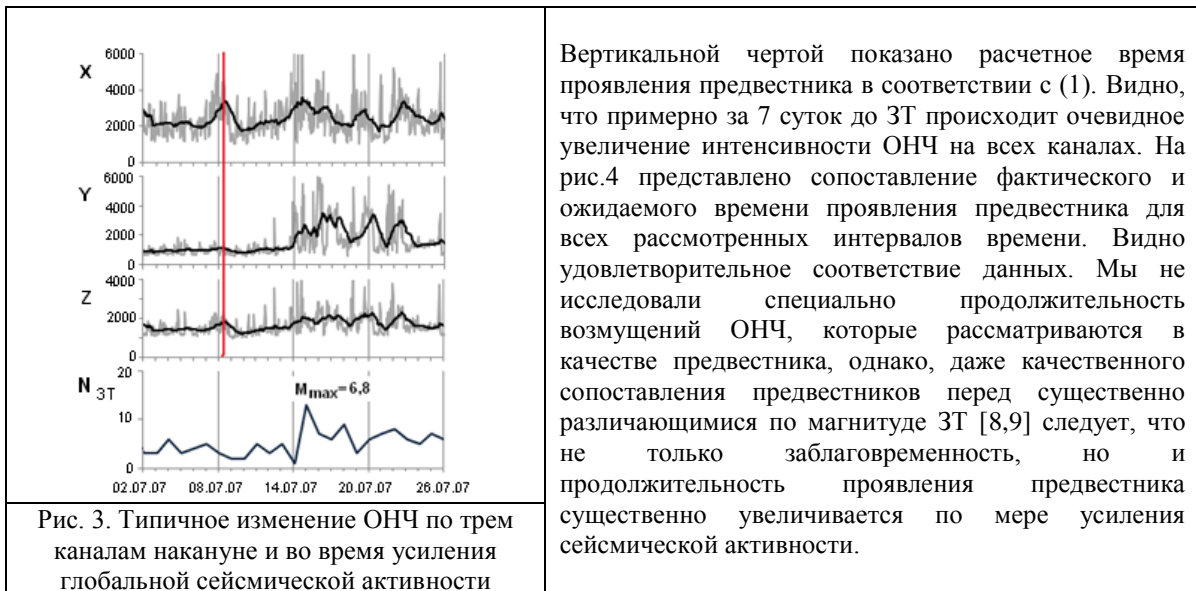


Рис. 2. Сопоставление изменения числа землетрясений с $M > 5.0$ и интенсивности ОНЧ излучения за период с 28 апреля 2007 года по 10 мая 2008 года.

На рис. 2 приведены изменения ото дня ко дню среднесуточных значений ОНЧ (исходные и усредненные по 3 суткам) и число ЗТ с $M > 5,0$, также с усреднением по 3 суткам. Видно, что в изменении рассматриваемых характеристик имеется определенное сходство, однако, для более надежных выводов необходим дополнительный анализ.

Для более детального анализа отобраны периоды резкого увеличения числа сильных ЗТ после относительного затишья, при этом продолжительность затишья была не менее ожидаемого периода проявления предвестников, определяемого соотношением (1). На рис.3 приведены наиболее характерные изменения уровня ОНЧ накануне серии сильных ЗТ, наиболее интенсивное из которых имело магнитуду $M = 6,8$, при этом накануне в течение достаточно длительного времени уровень сейсмической активности сохранялся стабильно низким.



Вертикальной чертой показано расчетное время проявления предвестника в соответствии с (1). Видно, что примерно за 7 суток до ЗТ происходит очевидное увеличение интенсивности ОНЧ на всех каналах. На рис.4 представлено сопоставление фактического и ожидаемого времени проявления предвестника для всех рассмотренных интервалов времени. Видно удовлетворительное соответствие данных. Мы не исследовали специально продолжительность возмущений ОНЧ, которые рассматриваются в качестве предвестника, однако, даже качественного сопоставления предвестников перед существенно различающимися по магнитуде ЗТ [8,9] следует, что не только заблаговременность, но и продолжительность проявления предвестника существенно увеличивается по мере усиления сейсмической активности.

Исходя из этого, заслуживает внимания продолжительное увеличение интенсивности ОНЧ (рис. 2) накануне продолжительного увеличения уровня глобальной сейсмической активности с конца июля 2007 г. с заблаговременностью $\sim 1,5$ месяца.

После начала активного периода сейсмической активности также происходит усиление интенсивности ОНЧ, хорошо видные на рис.3. Во многих случаях проявляются также квазигармонические флуктуации амплитуды принимаемого сигнала. В частности, после ЗТ в Индонезии 26 декабря 2004 г. (вблизи о. Суматра) волновые колебания амплитуды принимаемого сигнала началось примерно в 14:15 UT, т.е. примерно через 13,25 часа после главного толчка.

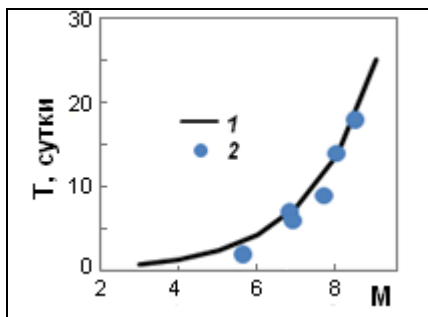


Рис. 4. Время появления предвестников ЗТ: 1 – расчетное, 2 – эксперимент

Кажущаяся скорость распространения возмущения составила порядка 600 м/с, период волны постепенно увеличивался примерно с 10 до 20 мин (частоты $f \sim 0,002 - 0,0008$ Гц), что соответствует внутренним гравитационным волнам.

В целом, наши результаты согласуются с полученными ранее другими авторами. В то же время, принципиальным отличием является то, что в нашем случае измерения проводились в сейсмически спокойном регионе далеко за пределами зоны проявления предвестников, принятой в настоящее время. Еще одно различие касается проявления эффекта на разных каналах. Обычно наиболее сильный эффект регистрируют по соотношению вертикальной и горизонтальной компонент поля Z/H, тогда как в нашем случае изменения всех компонент поля чаще всего были однотипны. Первый случай в наших данных также регистрируется, но значительно реже.

Обсуждение

Одним из основных механизмов формирования электромагнитных предвестников рассматривают изменение проводимости приземной атмосферы за счет природных газов, выходящих по микротрещинам на поверхность в зоне готовящегося ЗТ [6]. Этот механизм позволяет, в частности, объяснить изменение соотношения горизонтальной и вертикальной компонент поля.

В нашем случае имеет место по крайней мере две принципиальные особенности: 1) электромагнитный эффект проявляется далеко за пределами очага ЗТ (скорее всего, эффект является планетарным); 2) изменения ОНЧ, как правило, однотипны для всех компонент поля.

Из возможных механизмов наибольшее внимание заслуживает механизм, предложенный в [12] для объяснения постоянно существующей, но изменяющейся во времени электромагнитной эмиссии литосферы. Получены в общем виде нелинейные уравнения для описания процессов генерации и распространения излучения. Предварительно показана возможность аномально дальнего распространения возмущения.

Исходя из этого, можно допустить, что возмущение распространяется в земной толще в виде акустико-электромагнитных волн. При прохождении через земную толщу волна возмущает дислокации кристаллической решетки горных пород, что приводит к усилению постоянно существующей литосферной эмиссии.

ЭКВАТОРИАЛЬНАЯ АНОМАЛИЯ В ШИРОТНОМ ХОДЕ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В ряде работ [13-15] приведены данные об изменениях широтного хода полного электронного содержания ионосферы N_0 в периоды землетрясений. В частности, отмечались: модификация экваториальной аномалии (углубление или "заполнение" ионосферного провала), искажение ее формы с сильной депрессией южного горба вплоть до его исчезновения, движение горбов по направлению к экватору в период подготовки землетрясения и в течение периода высокой сейсмической активности. Заметим, что в этих работах анализировались широтные зависимости N_0 для долгот, близких к долготе λ_0 , на которой лежит эпицентр землетрясения. В данной работе рассмотрено влияние землетрясений на экваториальную аномалию на разных долготах, в том числе значительно удаленных от λ_0 . Для анализа были выбраны три сильных землетрясения (информация об этих землетрясениях приведена в табл.1): одно из них произошло вблизи экватора, а два других вдали от экватора, в северном и южном полушариях. Использовались широтные зависимости полного электронного содержания ионосферы N_0 , полученные по данным о пространственно-временных вариациях N_0 , представленных в базе данных (см. www.aiub.unibe.ch/download/CODE/). Эти широтные зависимости N_0 строились для периода ± 15 суток от даты землетрясения через каждые 2 часа (как представлено в базе данных).

Табл.1. Характеристики землетрясений.

Дата и время	Координаты эпицентра	Магнитуда
27.02.2010; $t_0=6^h33^m$ UT	Чили, $\varphi=35,85^\circ\text{S}$; $\lambda=72,72^\circ\text{W}$	8,8
06.04.2010, $t_0=20^h12^m$ UT	Индонезия, $\varphi=2,22^\circ\text{N}$; $\lambda=97,03^\circ\text{E}$	7,8
11.03.2011; $t_0=5^h46^m$ UT	Япония, $\varphi=38,3^\circ\text{N}$; $\lambda=142,4^\circ\text{E}$	~9

Отметим, что существенных длительных магнитных возмущений в эти периоды не наблюдалось.

Обсуждение результатов.

Анализ всех полученных широтных зависимостей показал наличие особенностей в поведении экваториальной аномалии (ЭА), которые обсуждаются ниже.

На рис.5 приведены широтные зависимости N_0 для периода, включающего землетрясение в Чили (27.02), для 13^hLT и 15^hLT – послеполуденных часов по местному времени, когда экваториальная аномалия обычно проявляется в наибольшей степени. Можно видеть, что на следующий день после землетрясения ЭА не наблюдается, после чего снова проявляется.

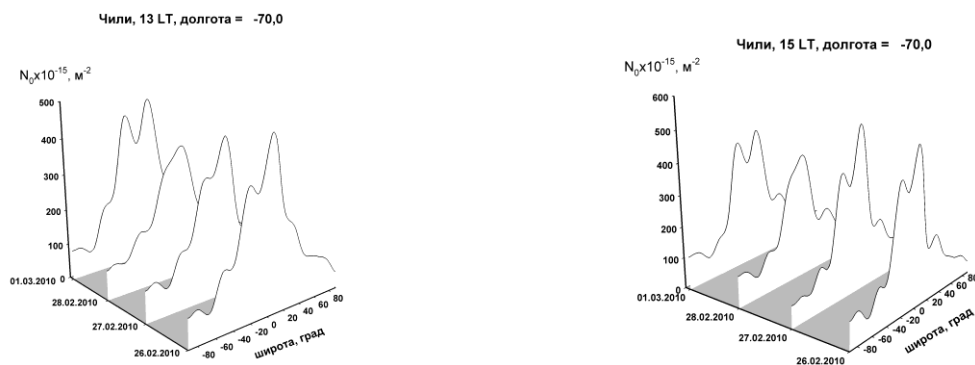


Рис. 5. Широтные зависимости N_0 для периода, включающего землетрясение в Чили, и для долготы, близкой к долготе эпицентра.

Для выяснения вопроса, на каком расстоянии может проявляться эффект отсутствия ЭА, строились широтные зависимости N_0 и для других долгот. Эти зависимости приведены на рис.6.

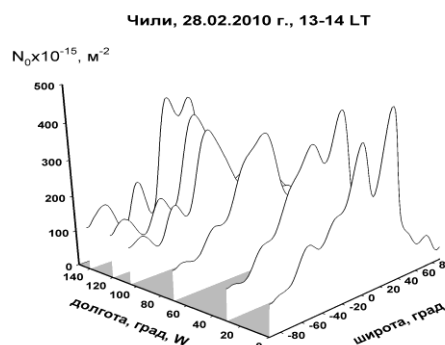


Рис.6. Широтные зависимости N_0 для различных долгот – западнее и восточнее долготы эпицентра землетрясения.

Аналогичный анализ проведен и для периода, включающего землетрясение в Японии. Результаты его иллюстрируются на рис. 7, 8.

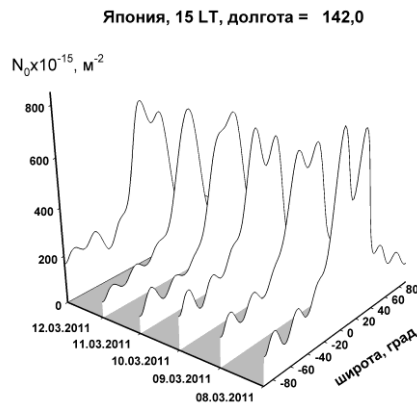


Рис. 7. Широтные зависимости N_0 для периода, включающего землетрясение в Японии, и для долготы, близкой к долготе эпицентра.

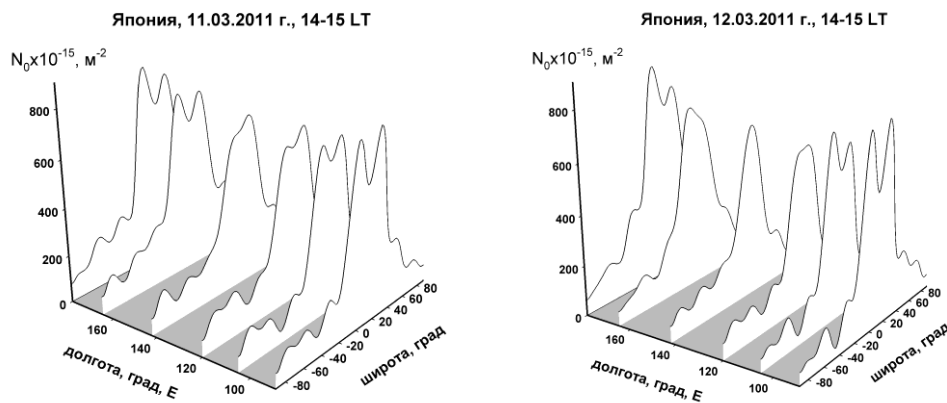


Рис. 8. Широтные зависимости N_0 для различных долгот – западнее и восточнее долготы эпицентра.

Видно, что на долготе эпицентра ЭА в широтном ходе N_0 отсутствует в течение двух дней после землетрясения, однако в эти же дни, но на других долготах, она имеет место – через $\sim 20^\circ$ - 25° западнее и восточнее эпицентра для 11.03 и $\sim 40^\circ$ западнее и восточнее эпицентра для 12.03.

Совсем иной ход имели широтные зависимости N_0 в период 04.04-13.04.2010, включающий землетрясение в Индонезии (7.04 по местному времени) – рис.9. Видно, что ЭА наблюдается весь этот период, хотя глубина заполнения впадины в ЭА изменяется.

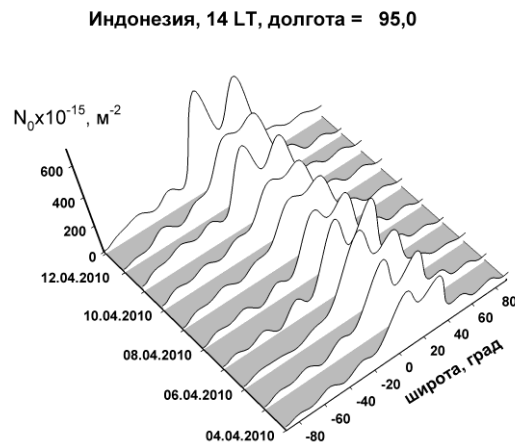


Рис. 9. Широтные зависимости N_0 для периода, включающего землетрясение в Индонезии, и для долготы, близкой к долготе эпицентра.

Представленные данные свидетельствуют о том, что влияние землетрясений на широтный ход N_0 может носить различный характер (экваториальная аномалия может исчезать, а может просто изменяться) и наблюдаться и на больших удалениях от эпицентра (более 6 тыс. км).

Известно, что образование ЭА объясняется так называемым фонтан-эффектом, связанным с дрейфом ионосферной плазмы в скрещенных E и H полях. В [13] углубление или "заполнение" ионосферного провала электронной концентрации на магнитном экваторе в случае сильных низкоширотных землетрясений связывалось с воздействием зонального электрического поля сейсмического происхождения. Наши данные, но полученные и на большом удалении от эпицентра землетрясения и для землетрясений, эпицентр которых расположен вдали от экватора, тоже можно объяснить таким воздействием. При этом следует предположить, что электрические поля сейсмического происхождения могут иметь различные величины и направления для разных землетрясений, чтобы, взаимодействуя с фоновыми полями, приводить или к углублению ионосферного провала или его заполнению (вплоть до полного исчезновения) на расстояниях более 6 тыс. км.

ВЫВОДЫ

1. Вариации ОНЧ излучения в сейсмически спокойном регионе в течение суток и ото дня ко дню имеют особенности, которые коррелируют с изменениями глобальной сейсмической активности. Эффекты в вариациях ОНЧ проявляются как до усиления сейсмической активности с заблаговременностью, пропорциональной магнитуде ЗТ, так и в первые сутки после ЗТ.

В целом, преобладают однотипные изменения ОНЧ по всем каналам, тогда как изменения отношения горизонтальной и вертикальной компонент поля, широко рассматриваемые в литературе, проявляются реже.

Наличие эффекта сейсмической активности далеко за пределами обычно рассматриваемой зоны проявления электромагнитных предвестников и наличие особенностей в соотношении вариаций отдельных компонент указывает на существование механизма, не связанного с выходом на поверхность инертных газов в зоне готовящегося ЗТ. Возможным механизмом усиления ОНЧ в сейсмически спокойном регионе может быть аномально дальнее распространение сигналов от очага ЗТ в земной коре, которое приводит к усилению постоянно существующей спонтанной литосферной эмиссии.

2. Влияние землетрясений на широтный ход N_0 может носить различный характер (экваториальная аномалия может исчезать, а может просто модифицироваться) и наблюдаться на больших удалениях от эпицентра (более 6 тыс. км). Такое поведение ЭА можно объяснить тем, что электрические поля сейсмического происхождения имеют различные величины и направления для разных землетрясений и, взаимодействуя с фоновыми полями, приводят к углублению минимума N_0 на экваторе или его заполнению (вплоть до полного исчезновения).

Авторы благодарят к.т.н. Богданова Ю.А. и Прокопенко С.И. за проведение измерений ОНЧ излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л.Ф. Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет. – Харьков.: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2009. – 386 с.
2. Гоков А.М., Тырнов О.Ф. Экспериментальные исследования методом частичных отражений отклика среднеширотной D-области ионосферы на удаленные старты и полеты космических аппаратов // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2006. – Т.46, №5. – 690-697.
3. Сурков В.В. Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах. – М.: Моск. инж.-физ. ин-т, 2000. – 235 с.
4. Гульельми А.В. Ультранизкочастотные волны в коре и в магнитосфере Земли // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 12. – С. 1257-1276.
5. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М.А. Садовского. – М.: Наука, 1982. – 88 с.
6. Hayakawa M., Molchanov O.A., Nikolaenko A.P. Model Variations in Atmospheric Radio Noise Caused by Pre-Seismic modification of Tropospheric Conductivity Profile // Seismo Electromagnetics. Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling / Ed. by M. Hayakawa and O.A. Molchanov. – Tokyo, TERRAPUB, 2002. – P. 349–352.
7. Электрические и магнитные предвестники землетрясений. – Ташкент: ФАН, 1983. – 136 с.
8. Bogdanov Yu.A., Zakharov I.G., Tyrnov O.F., Hayakawa M. Electromagnetic effects Associated with Regional Seismic Activity in Crimea during the Interval July-August 2002 // J. Atmospheric Electricity. – 2003. – Vol. 23, No. 2. – P. 57-67.
9. Bogdanov, Yu. A., Zakharov I. G. Electromagnetic and acoustic emissions associated with seismic activity // Proceeding of the 6th Int. Conference "Problem of Geocosmos". – St. Petersburg, Petrodvorets, May 23-27, 2006. – P. 357-360.
10. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1991. – 224 с.

11. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. – М.: Наука, 1987. – 101 с.
12. Шуман В.Н. Электромагнитные сигналы литосферного происхождения в современных наземных и дистанционных зондирующих системах // Геофизический журнал. – 2007. – Т. 29, № 2. – С. 3-16.
13. Namgaladze A.A., Zolotov O.V., Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I. // Ionospheric total electron content variations observed before earthquakes: Possible physical mechanism and modeling. – Proc. Of MSTU. – 2009. – Vol.12, No2. – P. 308-315.
14. Пулинец С.А., Цыбуля К.Г. Уникальные вариации полного электронного содержания в период подготовки землетрясения на Гаити (M7,9) 12 января 2010 г. // Геомагнетизм и аэрномия. – 2010. – Т.50, №5. – С. 713-716.
15. Пулинец С.А., Бондур В.Г., Цидилина М.Н., Гапонова М.В. Проверка концепции сейсмо-ионосферных связей в спокойных гелиогеомагнитных условиях на примере Венчуаньского землетрясения в Китае 12 мая 2008 г. // Геомагнетизм и аэрномия. – 2010. – Т.50, №2. – С.240-252.