

УДК 550.34:550.510.533

**ПРОЯВЛЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В
ВАРИАЦИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ В СЕЙСМИЧЕСКИ
СПОКОЙНОМ РЕГИОНЕ****И. Г. Захаров, О. Ф. Тырнов***Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, пл. Свободы, 4, Харьков, Украина
e-mail: giz-zig@ukr.net*

Поступила в редакцию 3 мая 2018 г.

По ежедневным данным за 2007 – 2008 гг., полученным в сейсмически спокойном регионе (Харьковская обл., Украина, {49.7 °N; 36.2 °E}), рассмотрены вариации ОНЧ-излучения в приземной атмосфере в периоды резкой смены глобальной сейсмической активности. Установлено наличие эффектов глобальной сейсмической активности в вариациях ОНЧ-излучения в сейсмически спокойном регионе, в том числе накануне роста активности. Показано важную роль фоновой сейсмичности в этих процессах. Рассмотрены особенности явления в зависимости от магнитуды землетрясения и возможные физические механизмы явления. Важную роль в отклике ОНЧ-излучения на удаленные землетрясения может играть такое нелинейное явление как спонтанная электромагнитная эмиссия Земли, генерация и распространение которой осуществляется за счет непрерывной эманации глубинных флюидов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясение, электромагнитное излучение ОНЧ диапазона, электромагнитные предвестники землетрясений.

За щоденними даними за 2007 – 2008 рр., отриманими у сейсмічно спокійному регіоні (Харківська обл., Україна, {49.7 °N; 36.2 °E}), розглянуто варіації ДНЧ-випромінювання в приземній атмосфері у періоди різкої зміни глобальної сейсмічної активності. Встановлено наявність ефектів глобальної сейсмічної активності у варіаціях ДНЧ-випромінювання у сейсмічно спокійному регіоні, в тому числі напередодні зростання активності. Показано важливу роль фонові сейсмічності у цих процесах. Розглянуті особливості явища залежно від магнітуди землетрусу та можливі фізичні механізми явища. Важливу роль у відгуку ДНЧ-випромінювання на віддалені землетруси може грати таке нелінійне явище як спонтанна електромагнітна емісія Землі, генерация і поширення якої у земних надрах здійснюється за рахунок безперервної еманации глибинних флюїдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: землетрус, електромагнітне випромінювання ОНЧ діапазону, електромагнітні провісники землетрусів.

Variations of VLF emission in the near-Earth atmosphere during periods of sharp change in global seismic activity are considered according to daily data for 2007-2008 in a seismically quiet area in Kharkiv province, Ukraine {49.7 °N; 36.2 °E}. Effects of global seismic activity in the variations of VLF emission in seismically quiet region, including before of activity increase, is established. The important role of background seismicity in these processes is shown. The features of VLF emission variation depending on the earthquake magnitude and possible physical mechanisms of the phenomenon are considered. An important role in the response of VLF emission to remote earthquakes can be played by such a nonlinear phenomenon as spontaneous electromagnetic emission of the Earth, the generation and propagation of which is due to the continuous emanation of deep fluids.

KEY WORDS: earthquake, VLF emission, electromagnetic precursors of earthquakes.

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения (ЗТ) являются одним из наиболее катастрофических явлений природы. Для предотвращения человеческих жертв важными является разработка надежного прогноза ЗТ. Основу такого прогноза составляет, как правило, анализ микросейсмических шумов в предполагаемой зоне подготовки ЗТ. Важными источниками информации о подготовке ЗТ являются также электромагнитные явления накануне ЗТ, прежде всего, ОНЧ-излучение, регистрируемое на земной поверхности, в шахте или на спутнике (см., например, [1-4]). Регистрируются как распространяющиеся сигналы этого диапазона природного (грозы) и искусственного (радиостанции) происхождения, так и литосферное излучение предположительно из гипоцентра ЗТ. Измерения $I_{ОНЧ}$ проводились на расстояниях десятки – сотни км от гипоцентра ЗТ, т.е. в пределах области, которую рассматривают как область проявления предвестников ЗТ [5], размеры которой примерно в 30 раз превышают размер самого очага ЗТ.

Показано (см, например, [4] и список литературы в ней) что накануне 70 – 80 % ЗТ с магнитудой $M > 6$ амплитуда и фаза ОНЧ- и НЧ-сигналов на трассах, проходящих вблизи зон подготовки ЗТ, испытывают значимые флуктуации вблизи моментов утреннего и вечернего солнечного терминатора на высотах нижней ионосферы. Аномалии интенсивности ОНЧ-излучения, $I_{ОНЧ}$, 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 ~ 5 – 150 кГц, в том числе за пределами максимальной амплитуды атмосфериков 7 – 12 кГц [1]. Землетрясение начинается либо на спаде (более сильные ЗТ), либо после окончания аномального увеличения $I_{ОНЧ}$ (более слабые ЗТ). Аномальное увеличение $I_{ОНЧ}$ начинается тем раньше, чем больше

магнитуда предстоящего ЗТ.

Серьезным подтверждением связи ОНЧ-излучения с напряженно-деформированным состоянием горных пород являются его регистрация в шахте на глубине 260 м, где приповерхностный сигнал на этих частотах полностью затухает [6]. Показано, (см., например, [7]), что доля литосферной составляющей в суммарном ОНЧ-излучении на границе "земля – воздух" достигает 20 %.

Как показывают исследования последних лет, сейсмическая активность имеет черты глобального непрерывного самоорганизующегося тектонического процесса с периодами накопления и релаксации тектонических напряжений [8-11], демонстрирующего многочисленные связи с процессами в атмосфере Земли и в геосмосе. Следовательно, совокупность землетрясений, или глобальная сейсмическая активность (ГСА), рассматриваемые в пространстве и во времени с учетом взаимодействия между их очагами, может рассматриваться как вполне определенный глобальный физический процесс.

Можно допустить, что глобальный характер сейсмической активности может обусловить некоторые глобальные перестройки в литосфере, атмосфере, ионосфере и магнитосфере также глобального масштаба, в том числе в сейсмически спокойных регионах. Такая постановка задачи оправдана также тем, что, в свете современных представлений, Земля и ее оболочки образуют единую открытую нелинейную динамическую иерархическую систему, в которой взаимодействие возможно в том числе за счет энергетически слабых (триггерных) механизмов [12].

Цель работы – анализ вариаций ОНЧ-излучения на границе "земля-воздух" в сейсмически спокойном регионе и их возможной связи с глобальной сейсмической активностью.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Измерения интенсивности $I_{ОНЧ}$ в диапазоне частот 2,5 – 50 кГц проводились с 01.04.2007 по 31.12.2008 с интервалом 1 мин в сейсмически спокойном регионе и вдали от источников промышленного шума в Харьковской обл. {49,7° N; 36,2° E}. ГСА оценивалась по максимальной за сутки магнитуде ЗТ (M_{max}) и числу ЗТ (N_{eq}) на земном шаре для нескольких интервалов магнитуд, начиная с $M = 4$. Данные о ЗТ взяты на сайте <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>.

Исследования проведены с использованием метода наложенных эпох с проверкой достоверности результатов расчетов по непараметрическому критерию Фридмана [13]. Результаты принимались к рассмотрению при уровне значимости $p < 0,1$. Для наглядности на графиках выборочно (для наиболее важных моментов времени) приведена также стандартная ошибка среднего σ .

Расчеты проведены для так называемых "изолированных" сейсмических событий, что исключало возможность наложения эффектов от двух близких возмущений. В качестве нулевых дат выбирались дни резкого увеличения M_{max} после продолжительного периода относительного сейсмического затишья, превышающего время проявления предвестников: ΔT [годы] = $10^{0,26M - 3,50}$ [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изменения максимальной магнитуды и числа ЗТ показаны на рис. 1. Видно, что исследуемые интервалы, кроме активного сейсмического периода после нулевой даты, охватывают спокойный период до нулевой даты и период менее существенного предшествующего усиления ГСА в интервале от –20 до –14 суток. Таким образом, расчеты охватывают интервал времени от одного сейсмически активного периода до следующего.

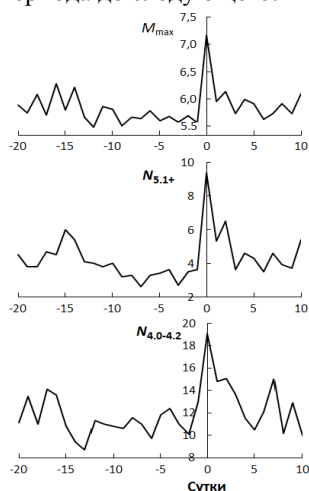


Рис. 1. Средние изменения максимальной магнитуды M_{max} и числа ЗТ N_{eq} с $M > 5,1$ и $4,0 \leq M \leq 4,2$ (сверху вниз) для 10 выбранных периодов резкого усиления ГСА.

Видно, что максимальная магнитуда и число ЗТ с $M > 4,2$ уменьшаются вплоть до нулевой даты, прерываясь резким увеличением указанных показателей. Число более слабых ЗТ незначительно увеличивается вплоть до главного толчка. Таким образом, изменения числа слабых ЗТ имеют особенности, которые будут рассмотрены ниже.

Кроме очевидного усиления ОНЧ-излучения при усилении ГСА (рис. 2), изменения этого показателя имеют некоторые дополнительные особенности. Прежде всего, это экстремум вблизи –10-х суток, который по времени хорошо согласуется с ожидаемым временем появления предвестников [5]. Далее будем называть его краткосрочным предвестником. Отметим также небольшой локальный максимум ОНЧ-излучения непосредственно перед началом активного сейсмического периода (от –3-х до –1-х суток), который можно назвать оперативным предвестником.

Несмотря на небольшую амплитуду, его реальность не вызывает сомнения, так как он зафиксирован перед всеми усилениями ГСА, при этом положение максимума закономерно смещается на более раннее время по мере увеличения максимальной магнитуды ЗТ. Положение краткосрочного предвестника также смещается на более раннее время при увеличении M_{max} , однако, эта тенденция недостаточно строгая, возможно, из-за наложения предвестников и эффектов после предыдущего усиления ГСА.

Как следует из большинства исследований, в том числе рассмотренного, сильные ЗТ происходят на спаде или после уменьшения интенсивности ОНЧ-излучения. Результаты, полученные в данной работе и в более ранних исследованиях, позволяют конкретизировать отмеченную закономерность. Ранее [3, 14] на ограниченном материале для Крымского сейсмического региона было получено, что интенсивность ОНЧ-излучения пропорциональна числу слабых ЗТ (в этом случае с магнитудами $M < 3,6$). По отношению ко всему объему потенциального сейсмического очага слабые ЗТ обеспечивают растрескивание относительно мелких блоков земной коры, при этом тектонические напряжения в сейсмическом регионе в целом продолжают увеличиваться. Напротив, более сильные ЗТ за счет образования магистральных разрывов приводят к снижению напряжений в сейсмическом регионе и, соответственно, к уменьшению интенсивности ОНЧ-излучения. Еще более точным соответствием между ЗТ и интенсивностью ОНЧ-излучения становится при использовании разности числа сильных и слабых ЗТ, что можно рассматривать как оценку остаточных напряжений (рис. 3).

Данные, приведенные на рис. 4, подтверждают эту закономерность: видно, что интенсивность ОНЧ-излучения вблизи нулевой даты для более слабых ЗТ значительна, тогда как для более сильных – невелика. Введем понятие "глобальный уровень тектонического напряжения" (ГУТН); мы пока оставим в стороне вопрос, носит это понятие вполне определенный физический смысл или является условным. Из полученных величин максимума ОНЧ-излучения вблизи нулевой даты (см. пример на рис. 4) и в предположении, что $I_{ОНЧ}$ пропорционально ГУТН, следует, что только ЗТ с магнитудой $M > 7,5$ приводят к снижению ГУТН и, соответственно, к ослаблению ГСА в последующие дни, тогда как после более слабых ЗТ могут последовать новые толчки, так как тектонические напряжения продолжают нарастать.

Таким образом, анализ слабых и сильных ЗТ дает более предметный взгляд на сейсмическую цикличность. В связи с этим обратим внимание на то, что полученные эффекты в ОНЧ-излучении скорее имеют характер не локального всплеска на некотором неизменном фоновом уровне, а скачка с последующим постепенным убыванием $I_{ОНЧ}$ до следующего активного периода (пилообразная кривая). Таким образом, влияние литосферы на электромагнитные сигналы на границе "земля-воздух" (и в целом на вышележащие слои) является непрерывным и носит циклический характер, обусловленный циклическим характером тектонических процессов [15].

Было бы интересно получить зависимость, аналогичную представленной на рис. 3, и для ГСА. Однако пока не ясно, в какой мере правомерно вводить единый критерий деления ЗТ на сильные и слабые в глобальном масштабе. Кроме того, слабые ЗТ являются также афтершоками, так что без разделения слабых ЗТ на предшествующие сильным ЗТ и следующие за ними такие оценки будут малоинформативными.

Тем не менее, для изолированных сейсмических событий имеет смысл рассмотреть поведение числа слабых ЗТ накануне усиления ГСА. Чтобы не касаться вопроса о выборе критерия разделения сильных и слабых ЗТ, рассмотрим ЗТ, которые в глобальном масштабе, несомненно, являются слабыми, а именно с $M = 4,0 - 4,2$ (рис. 5). Видно, что слабые ЗТ появляются тем раньше, чем более сильным оказывается последующий рост ГСА, т.е. число слабых ЗТ, как и уровень ОНЧ/СНЧ-излучений, подвержен общей тенденции изменения времени появления предвестников в зависимости от магнитуды ЗТ [5]. Таким образом, как слабые ЗТ, так и уровень ОНЧ/СНЧ-излучений, могут быть индикатором накопления тектонических напряжений, приводящих к крупному магистральному разрыву.

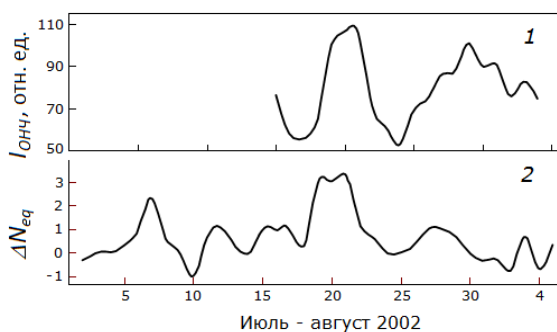


Рис. 3. Изменения интенсивности ОНЧ-излучения (1) и разности между числом слабых и сильных региональных ЗТ (2) по измерениям в Крымском сейсмическом регионе [Bogdanov et al., 2003].

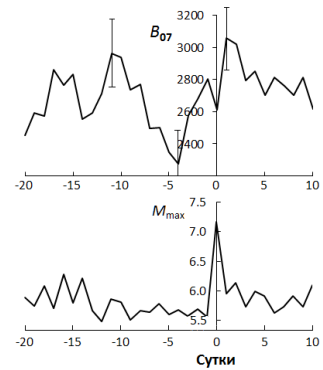


Рис. 2. Средние изменения модуля амплитуды ОНЧ-излучения в 07 LT при резкой смене ГСА.

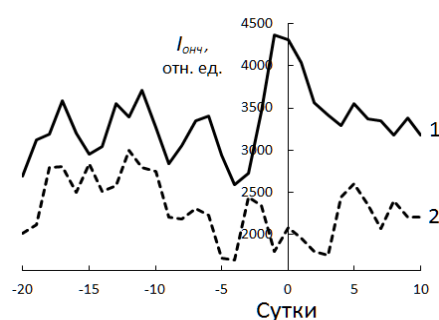


Рис. 4. Пример изменения интенсивности ОНЧ-излучения при разных значениях максимальной магнитуды ЗТ: 1 – $M_{\max} = 6,5$ (13.06.2007), 2 – $M_{\max} = 7,8$ (12.05.2008).

ОБСУЖДЕНИЕ

Во многих работах, в которых установлены определенные связи сейсмической активности (как правило, в некотором регионе) с явлениями в земной атмосфере или в ближнем космосе, часто предлагают методику прогноза ЗТ на основе установленных связей (см., например, [16]). В данном случае также показаны связи, которые мы считаем реальными и заслуживающими в дальнейшем физической интерпретации. В то же время, пока нет достаточных оснований для их использования в прогнозировании ЗТ, так как эти связи, как правило, проявляются только в среднем, тогда как для отдельных событий их индивидуальные особенности могут оказаться преобладающими. Принимая во внимание неустойчивость поведения нелинейных систем, проблема прогноза ЗТ представляется еще более сложной [11].

При прогнозе региональной сейсмической активности по наблюдениям в этом же регионе необходимо также учитывать, что часть обнаруженных эффектов будет обусловлена сейсмическими событиями глобального масштаба. Для разделения регионального и планетарного эффектов необходимо использовать одновременные наблюдения как в регионе, для которого предполагается составлять прогноз, так и в сейсмически спокойном регионе для контроля глобальных процессов. Ранее необходимость такого подхода была обоснована в работах [3, 14] на основе сравнения региональных и глобальных эффектов в вариациях ОНЧ-излучения. В работе [17] также предложено учитывать роль глобальных эффектов при прогнозе региональной сейсмической активности. Таким образом, очевидной становится задача создания глобальной системы прогнозирования сейсмической активности с единым центром обработки и анализа оперативно поступающей информации.

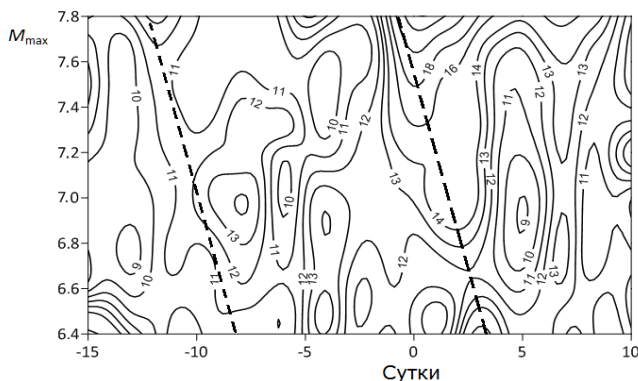


Рис. 5. Изменение числа слабых ЗТ ($4,0 \leq M \leq 4,2$) накануне усиления ГСА при разной максимальной магнитуде ЗТ.

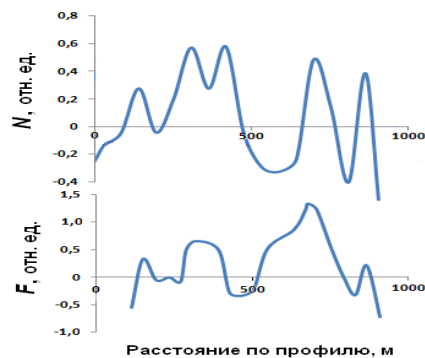


Рис. 6. Пример пространственных вариаций интенсивности СЭМЭЗ (график сверху) и значения интегрального геохимического параметра.

Рассмотрим кратко возможные физические механизмы явления. Хорошо известна (см., например, [4, 18]) роль выхода на поверхность радона и других газов в области подготовки и реализации землетрясения. Важной особенностью процесса глубинной дегазации является его неравномерность во времени и в пространстве. Основной поток глубинных восстановленных газов разгружается в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов, однако, он существует повсеместно (в среднем 10^9 атомов через квадратный сантиметр за секунду [19-21]). Указанный процесс, в принципе, может обусловить как локальные изменения проводимости нижних слоев тропосферы, так и перестройку глобальной электрической цепи в планетарном масштабе [18].

Непрерывная эманация глубинных флюидов лежит в основе еще одного важного явления – спонтанной (по классификации Левшенко [23]) электромагнитной эмиссии Земли (СЭМЭЗ) (литосферная часть приземного ОНЧ-излучения). СЭМЭЗ – это составляющая постоянно существующего акустикосейсмоэлектромагнитного шума литосферы, который имеет диффузионную природу и образуется при просачивании глубинных флюидов через твердотельную компоненту земных недр; подобные нелинейные процессы происходят в открытой неравновесной среде, которой и является литосфера. Указанное нелинейное явление наблюдается в любой точке земного шара, но наиболее интенсивно оно проявляется в напряженно-деформированных областях, где образуется большое число локальных неоднородностей и дефектов горных пород, с которыми взаимодействует восходящий поток флюидов. Явление СЭМЭЗ следует отличать от хорошо известного линейного процесса – вынужденной (по классификации Левшенко [23]) электромагнитной эмиссии Земли, более известного как естественное импульсное электромагнитное поле Земли (А.А. Воробьев).

Фронт концентрации флюида при просачивании (перколяции) через горные породы формирует всплеск комплексной диэлектрической проницаемости, рассеивание которого ведет к генерации электромагнитных и других возмущений [7, 11, 22]. Распространение возмущений в активных диссипативных системах с диффузией описывается системой уравнений типа "реакция – диффузия", в

которой уравнение Максвелла – лишь их составляющая [24]. Получены в общем виде нелинейные уравнения для описания процессов генерации и распространения излучения [24].

Таким образом, несмотря на то, что мы имеем дело с электромагнитным явлением, распространение возмущения в земных недрах контролируется процессами диффузии и потому к нему неприменимо понятие скин-слоя, употребляемое для характеристики дальности распространения плоской монохроматической волны в среде. Перенос возмущения возможен на всех глубинах, где можно предположить наличие процессов диффузии, т.е., с точки зрения классической электродинамики, реализуется возможность для сверхдальнего распространения возмущения [22, 24], что снимает вопрос о возможности выхода излучения из гипоцентра землетрясения к земной поверхности.

Связь электромагнитных процессов и процессов диффузии подтверждена экспериментально. Как известно, восходящий поток флюидов приводит, в частности, к формированию геохимических аномалий в приповерхностном грунте. В 2011 г. был проведен эксперимент [7], в котором сопоставлялись результаты регистрации СЭМЭЗ и геохимического анализа проб приповерхностного грунта на северном борту Днепровско-Донецкой впадины (рис. 6). Видно, что каждому локальному максимуму СЭМЭЗ соответствует максимум геохимического показателя.

Таким образом, при измерениях ОНЧ-излучения в зоне подготовки ЗТ вариации его интенсивности могут быть обусловлены в том числе за счет прихода возмущения непосредственно из гипоцентра ЗТ. При измерениях ОНЧ-излучения в сейсмически спокойном регионе можно допустить, что сейсмический шум, постоянно присутствующий в земной толще и модулируемый сильными ЗТ, при распространении на большие расстояния возмущает дислокации кристаллической решетки горных пород, что приводит к усилению СЭМЭЗ накануне и после сильных ЗТ.

Нелинейные механизмы электромагнитной эмиссии литосферы находятся в стадии изучения, что не позволяет получить надежные количественные оценки, поэтому в качестве подтверждения предложенного механизма приведем результаты одновременных изменений ОНЧ-излучения в Харьковской области и сейсмического фона в Антарктиде на станции им. Ак. Вернадского (рис. 7), которые демонстрируют подобие рассматриваемых характеристик до и после одного из наиболее мощных ЗТ последних десятилетий 26 декабря 2004 г. вблизи о. Суматра. Очевидно также, что для соответствия показателей, измеренных на расстояниях в тысячи километров друг от друга, представления о сейсмичности как о глобальном процессе являются обязательными.

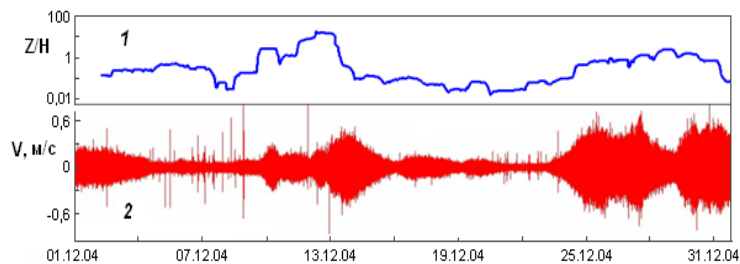


Рис. 7. Связь сейсмических и электромагнитных возмущений в разнесенных пунктах наблюдения: 1 – Харьков (ОНЧ-излучение), 2 – Антарктида (сейсмический фон).

ВЫВОДЫ

1. Вариации ОНЧ-излучения в сейсмически спокойном регионе коррелируют с изменениями глобальной сейсмической активности. Эффекты в вариациях ОНЧ-излучения проявляются как до усиления ГСА с заблаговременностью, пропорциональной магнитуде ЗТ, так и в первые сутки после ЗТ.

2. Подтверждено наличие в вариациях ОНЧ-излучения локальных максимумов, которые соответствуют известным из литературы представлениям о краткосрочном и оперативном предвестниках землетрясений. Положение предвестников смещается на более раннее время перед более сильными ЗТ, при этом амплитуда оперативного предвестника становится менее выраженной, чем перед более слабыми ЗТ.

3. Уровень ОНЧ-излучения, скорее всего, определяется относительно слабыми ЗТ (накануне основного ЗТ), вызывающими растрескивание пород в зоне подготовки ЗТ без формирования магистрального разрыва. Формирование магистрального разрыва приводит к уменьшению ОНЧ-излучения.

4. Наличие эффекта сейсмической активности далеко за пределами обычно рассматриваемой зоны проявления электромагнитных предвестников указывает на существование механизма, не связанного с выходом на поверхность инертных газов в зоне готовящегося ЗТ. Возможным механизмом усиления ОНЧ-излучения в сейсмически спокойном регионе может быть постоянно существующая литосферная эмиссия, реализуемая на основе нелинейных механизмов генерации и распространения излучения, модулируемая сейсмическим шумом.

Авторы благодарят Богданова Ю.А. и Прокопенко С.И. за проведение измерений ОНЧ-излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. – М.: Наука, 1988. – 174 с.
2. Муллаяров В.А., Козлов В.И., Амбурский А.В. Проявление землетрясений на трассах распространения ОНЧ-радишумов и импульсных сигналов по наблюдениям в Якутске // Вулканоология и сейсмология. – 2007. – № 4. – С. 69–78.
3. 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. – V. 23, N. 2. – P. 57–67.
4. Hayakawa M. VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes // Sensours. – 2007. – N. 7(7). – P. 1141–1158. doi:10.3390/s7071141.
5. Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1991. – 224 с.
6. Захаров И.Г., Шуман В.Н. О регистрации спонтанной электромагнитной эмиссии литосферы в протяженной соляной штольне // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36, № 2. – С. 99–110.
7. Шуман В.Н., Коболев В.П., Старостенко В.И., Лойко Н.П., Захаров И.Г., Яцюта Д.А. Метод анализа спонтанной электромагнитной эмиссии Земли: физические предпосылки, полевой эксперимент, элементы теории // Геофизический журнал. – 2012. – Т. 34, № 4. – С. 40–61.
8. Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М. О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли // Докл. АН. Геофизика. – 1994. – Т. 338, № 4. – С. 525–527.
9. Bak P. How nature works: The science of self-organized criticality. – Springer-Verlag, New York, 1996. – 212 p.
10. Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н. Ротационная геодинамическая модель // Методы изучения, строения и мониторинг литосферы. – Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1998. – С.163–165.
11. Шуман В.Н. Нелинейная динамика, сейсмичность и аэрокосмические зондирующие системы // Геофизический журнал. – 2015. – Т. 37, № 2. – С. 38–55.
12. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 59–106.
13. Браунли К.А. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977. – 245 с.
14. 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.
15. Пушаровский Ю.М. Глобальные проблемы общей тектоники. – М.: Научный мир, 2001. – 520 с.
16. Боярчук К.А., Карелин А.В., Пулинец С.А., Тертышников А.В., Узунов Д.П., Юдин И.А. Единая концепция обнаружения признаков готовящегося сильного землетрясения в рамках комплексной системы литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера // Космонавтика и ракетостроение. – 2012. – № 3 (68). – С. 21–31.
17. Широков В.А. Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996–2000 гг. с магнитудой $M = 6–7.8$ по комплексу сейсмологических и геофизических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. – Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. – С. 95–116.
18. Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера – атмосфера – ионосфера – магнитосфера, инициируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 1–19.
19. Войтов Г.И. О холодной дегазации метана в тропосферу Земли // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. Труды Геол. ин-та РАН. Вып. 515. – М.: Наука, 1999. – С. 242–251.
20. Сывороткин В.Л. Глубинная дегазация и глобальные катастрофы. – М.: ЗАО "Геоинформмарк", 2002. – 250 с.
21. Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. – Королёв: ЦНИИМам, 2007. – 160 с.
22. Шуман В.Н. Концепция динамически неустойчивой геосреды и сейсмoeлектромагнитный шум литосферы // Геофизический журнал. – 2010. – Т. 32, № 6. – С.101–118.
23. Левшенко В.Т. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы литосферного происхождения: Автореферат диссертации доктора физ.-мат. наук. – М.: ОИФЗ РАН, 1995. – 36 с.
24. Цифра И.М., Шуман В.Н. Параболические системы типа "реакция – диффузия" при моделировании процессов генерации и распространения электромагнитной эмиссии литосферы и методы их анализа // Геофизический журнал. – 2010. – Т. 32, № 5. – С. 51–60.