

УДК 550.343+550.388+537.874

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГРОЗОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ НА ТРАССАХ, ПРОХОДЯЩИХ НАД ОБЛАСТЯМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2011 г. В. А. Муллаяров, Л. М. Абзалетдинова, В. В. Аргунов, А. А. Корсаков

Учреждение РАН Институт космических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, Якутск

e-mail: ikfia@yusn.ru

Поступила в редакцию 26.07.2010 г.

После доработки 22.11.2010 г.

Рассмотрены особенности методики “радиопросвечивания” нижней ионосферы над эпицентрами землетрясений при помощи низкочастотных электромагнитных сигналов грозовых источников – атмосфериков. В амплитудных характеристиках атмосфериков проявляются эффекты неглубокофокусных землетрясений с магнитудой более 4.0 и их предвестники. Предполагается, что вариации характеристик сигналов связаны с возмущениями в нижней ионосфере. Поперечные размеры возмущенных областей, как следует из результатов азимутального сканирования, обычно соответствуют размерам первых двух зон Френеля для сигналов на частоте 10 кГц. Азимутальное сканирование показало также, что расположение области возмущения как в период землетрясения, так и в период его подготовки может иметь определенную динамику и не совпадать с проекцией на эпицентр землетрясения.

Рассмотрено отношение амплитуд электрической и магнитной компонент сигналов, в вариациях которого также могут проявляться эффекты сейсмической природы перед землетрясением. Анализ отношения позволяет повысить вероятность предсказания землетрясений при использовании характеристик электромагнитных сигналов грозовых разрядов в качестве дополнительного средства комплексного мониторинга возмущений нижней ионосферы, обусловленных сейсмическими процессами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск предвестников землетрясений (ЗТ) ведется во многих геофизических полях. К числу возможных инструментов мониторинга сейсмической активности можно отнести использование наблюдений естественных низкочастотных электромагнитных сигналов и сигналов СДВ-передатчиков для обнаружения возмущений в нижней ионосфере, обусловленных воздействием сейсмических процессов. Изменение профиля электронной концентрации и высоты нижней ионосферы должно проявляться в вариациях амплитуды и фазы сигналов, распространяющихся через области над эпицентрами ЗТ. В достаточно большом количестве работ показано, что вариации фазы сигналов низкочастотных радиопередатчиков, наблюдаемых за несколько дней до землетрясений, могут быть использованы в качестве предвестников ЗТ [Molchanov and Hayakawa, 1998; Gokhberg et al., 1989; Rozhoi et al., 2004]. Для “радиопросвечивания” сейсмически возмущенных областей нижней ионосферы могут быть использованы и естественные электромагнитные сигналы грозовых источников – атмосфериков. В работах [Mullayarov et al., 2007; Муллаяров и др., 2007] показано, что несмотря на нестационарность потока атмосфериков в вариациях их средней амплитуды регистрируются эффекты, кото-

рые могут быть связаны с последующими землетрясениями. В данной работе рассматриваются пространственные и временные особенности данных эффектов.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРИКОВ

Измерения атмосфериков для целей выявления эффектов, обусловленных сейсмической активностью, проводятся в Якутске в зимнее время с помощью однопунктового грозопеленгатора-дальномера [Козлов и др., 1996], у которого для увеличения дальности действия по сравнению с летним периодом повышается чувствительность. Пеленгация грозового разряда осуществляется с помощью трех антенн, принимающих вертикальную электрическую и две горизонтальные магнитные составляющие электромагнитного поля. Усиленный приемными трактами сигнал в диапазоне 0.5–15 кГц оцифровывается с помощью АЦП и вводится в РС. Направление на грозовые разряды определяется по отношению среднеквадратичных значений сигналов, поступающих с магнитных антенн. Неоднозначность пеленга устраняется путем сопоставления знаков взаимной корреляции электрической и магнитной компонент сигнала атмосферика. Максимальная стандартная ошибка измерения пеленга состав-

ляет $\sim 2.5^\circ$. Для грубой оценки расстояния до дальнего грозового разряда используется временная форма сигнала — количество положительных и отрицательных полупериодов электрической компоненты, превосходящих уровень, равный 0.1 максимальной величины сигнала. Коэффициент дальности определяется перерасчетом летних пороговых значений в зимние и уточняется сопоставлением с данными спутниковой системы регистрации грозных разрядов LIS и распределенной наземной сети WWLLN (<http://thunder.msfc.nasa.gov>, <http://wwlln.net/>).

Можно ожидать, что воздействие процессов готовящегося ЗТ на уровень принимаемых в Якутске ОНЧ-сигналов проявится, если размеры возмущенной области в нижней ионосфере будут соответствовать размерам первых зон Френеля трассы распространения сигнала “грозовой источник — пункт приема”. Как известно [Черный, 1972], размер зон Френеля F определяется расстоянием d и длиной волны электромагнитного сигнала λ : $F = (n\lambda d_1 d_2 / d)^{1/2}$, где $d = d_1 + d_2$, d_1 — расстояние от эпицентра до грозового источника, d_2 — расстояние от эпицентра до приемника, n — номер зоны.

В качестве исходных данных рассматривались вариации амплитуды атмосфериков, зарегистрированных в ночные часы (00–02 LT или 15–17 UT), когда из-за слабого затухания имеет место высокий поток атмосфериков. В тоже время, так как в ночное время за счет распространения сигналов в волноводе в виде нескольких мод возможны интерференционные эффекты, дополнительно рассматривались вариации амплитуды атмосфериков и в дневные часы. Однако необходимо учитывать, что в дневное время за счет большего затухания сигналов в волноводе число атмосфериков при неизменном пороге регистрации оказывается, как правило, небольшим (в некоторые дни не удается получить значения амплитуды с небольшой погрешностью). По данной причине обычно выбирались дневные часы с максимальной интенсивностью атмосфериков в грозовом источнике (как известно, максимум грозовой активности для каждой долготы наблюдается приблизительно в 17–18 LT).

Методика анализа заключается в следующем. Для каждого выбранного ЗТ определяется азимут и расстояние до Якутска. Для первоначального анализа выбираются те атмосферики, трассы распространения которых проходят на расстоянии не более пятой зоны Френеля от эпицентра, а дальности их грозовых источников превышают дальность до ЗТ. В качестве центральной частоты спектра атмосфериков для расчета зон Френеля принята частота 10 кГц. Определяется средняя амплитуда атмосфериков, зарегистрированных в течение часа (обычное количество — порядка и

более 1000). Поскольку осуществляется широкополосный прием сигналов, то усредняются среднеквадратичные значения амплитуд. Причем амплитуды сигналов приводятся к амплитуде одного расстояния (дальность до очага ЗТ), используя в первом приближении зависимость коэффициента затухания, обратно пропорциональную расстоянию. Данная процедура проводится для уменьшения влияния “размазанности” и межсубточного смещения источников сигналов (грозовых разрядов). Затем, для уточнения эффективных размеров возмущенных областей в ионосфере осуществляется азимутальное сканирование со сдвигом в одну–две зоны Френеля. Характеристики ЗТ взяты из каталога: neic.usgs.gov/neis/eglists/sigmficant.html.

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В соответствии с результатами работы [Mullayarov et al., 2007], в вариациях среднеквадратичной амплитуды атмосфериков, проходящих над эпицентрами ЗТ, следует ожидать эффекты от землетрясений с магнитудой более 4 и глубиной очага ЗТ, не превышающей 50 км. Эффект ЗТ проявляется в виде усиления амплитуды в день и/или в последующий день после события. В предшествующие ЗТ дни вариации амплитуды атмосфериков, которые могут рассматриваться в качестве предвестников, выражаются также в виде возрастания амплитуды. Следовательно, для ЗТ с “малой” магнитудой или большой глубиной оба эффекта или какой-либо один из них могут отсутствовать. Поэтому для детального анализа вариаций характеристик атмосфериков в данной работе отбирались, прежде всего, события, удовлетворяющие указанным критериям по магнитуде и глубине очага.

Для уменьшения проявлений в вариациях амплитуды изменений условий на трассе распространения сигналов ото дня ко дню следует выбирать трассы прохождения сигналов над сейсмоактивными областями так, чтобы расстояния от эпицентра до пункта приема сигналов (Якутск) составляло, по возможности, меньшую часть общей протяженности трассы сигналов. Для пункта приема сигналов в Якутске к таким сейсмоактивным областям можно отнести Камчатку, северные районы Китая и Японские о-ва.

Азимутальное распределение проявлений сейсмических событий (поперечные размеры области возмущения в нижней ионосфере) рассмотрим на примере ЗТ, которое произошло в Японии (41.892° N; 143.754° E) 11.09.2008 г. Расстояние от эпицентра ЗТ до пункта регистрации составляло 2400 км, а основные грозовые источники сигналов по азимуту на эпицентр регистрировались на дальностях 4200–5600 км от пункта наблюдения. Грозные источники атмосфериков располага-

лись над поверхностью океана, в связи с чем количество атмосфериков за часовые интервалы усреднения было не таким большим, какое обычно наблюдается над сушей.

Вариации средней амплитуды ночных атмосфериков (00–01 LT) показаны на рис. 1а. Хорошо выражен эффект ЗТ (здесь и далее день ЗТ отмечен стрелкой), последовавший на следующий день после события, — пиковая амплитуда атмосфериков в четыре раза превышает уровень в предшествующие три дня. Подобное же возрастание амплитуды, наблюдавшееся 05.09.2008 г., можно рассматривать как предвестник ЗТ. Следует отметить, что за 1.5 суток до предвестника ЗТ наблюдалось кратковременное усиление геомагнитной активности (см. рис. 1б), которое могло бы повлиять на вариации амплитуды атмосфериков. Однако то, что значительное усиление амплитуды атмосфериков 05.09.2008 г. является предвестником ЗТ, а не отражает эффект кратковременного усиления геомагнитной активности, можно убедиться, если рассмотреть вариации амплитуды атмосфериков, принимаемых с соседних азимутов. На рис. 2а, б приведены соответствующие вариации амплитуды атмосфериков для пятой зоны Френеля, принимаемых в этот же часовой интервал с меньших и больших азимутов (через 10 градусов). Хорошо видно, что как эффект ЗТ, так и предвестник выражены только в направлении на эпицентр ЗТ. Отсюда также следует вывод, что оба эффекта проявились в меньшей, чем пятая, зоне Френеля. Действительно, более детальные расчеты вариаций амплитуды атмосфериков для первой зоны Френеля на разных азимутах через 2° относительно направления на эпицентр ЗТ (рис. 2в, г) показывают, что размеры областей возмущений как эффекта ЗТ, так и эффекта предвестника соответствуют первой и второй зонам Френеля. В то же время эти расчеты показали, что оба эффекта имели “тонкую” структуру. Из рис. 2 следует, что фактически зарегистрировано два предвестника: 31.08.2008 г. и 05.09.2008 г. При этом первый предвестник, который дал максимальный эффект восточнее на 4° относительно направления на эпицентр (рис. 2в), был достаточно широкий по азимуту (10°), в то время как второй (05.09.2008 г.) был более узким с максимумом на 4° западнее. На рис. 1в дано азимутальное распределение средней амплитуды атмосфериков для первого предвестника относительно направления на эпицентр ЗТ. Поперечные размеры области возмущения в нижней ионосфере можно оценить по верхней шкале. Для расстояний до источников атмосфериков, вдвое превышающих расстояние до эпицентра, поперечник первой зоны Френеля соответствует 380 км. Эффект собственно ЗТ оказался “размазан” по времени и пространству: 12.09.2008 г. (на следующий день после события) максимум возмущения амплитуды

атмосфериков зарегистрирован на азимутальном направлении +6° относительно направления на эпицентр (западнее, без захвата эпицентра), а на следующий день (13.09.2008 г.) в эти же часы эффект наблюдался уже в направлении на эпицентр и восточнее его. Приблизительно такие же поперечные размеры области возмущения в период предвестника (первая зона Френеля) наблюдались и в других рассмотренных событиях.

Проявления сейсмоэффектов в вариациях средней амплитуды атмосфериков от более дальних ЗТ рассмотрим на примере события, произошедшего в Турции 08.03.2010 г. в 02:32:35 UT, с магнитудой 5.9. Данное событие выбрано исходя из того, что в данном направлении (на запад от пункта приема сигналов: азимут 290.5° дальность 6240 км) имелась возможность “прокалибровать” основную часть трассы, т.е. попытаться разделить вариации амплитуды атмосфериков по месту их возникновения на трассе распространения. В качестве калибровочного сигнала использовался сигнал СДВ-радиопередатчика в Краснодаре. Разность азимутов на эпицентр ЗТ и радиопередатчик составляет всего 6°, а расстояние от Краснодара до границы пятой зоны Френеля для центральной трассы — ~400 км. При этом положение радиопередатчика попадает приблизительно на середину трассы распространения атмосфериков от наиболее далеких грозовых источников. На рис. 3а положение радиопередатчика обозначено квадратиком, а размеры пятой зоны Френеля на середине трассы — кружками).

Вариации амплитуды ночных атмосфериков, проходящих на область эпицентра ЗТ, приведены на рис. 3б. Как показал анализ, основной вклад в сигналы с данного направления и с дальностей, превышающих дальность до эпицентра ЗТ, вносили атмосферики от грозового очага вблизи западного приэкваториального побережья Африки. Эффект ЗТ выразился в усилении сигнала на следующие сутки после события. В то же время, в отличие от ранее рассмотренных случаев более близкого расположения ЗТ, предшествующие событию вариации амплитуды атмосфериков носили сложный характер.

В рассматриваемый интервал времени в западном направлении от пункта регистрации (в секторе на эпицентр рассматриваемого ЗТ) произошло еще три ЗТ. Однако эпицентры этих ЗТ в Иране (18.02.2005 г., 23.02.2005 г.) и в Греции (28.02.2005 г.) находились на расстоянии более 1000 км от центральной трассы, проходящей через эпицентр ЗТ в Турции, т.е. на расстоянии не менее десятой зоны Френеля, поэтому воздействие указанных ЗТ на амплитуду сигналов, принимаемых с азимута 290°, если и было возможным, то не значительным.

Вариации сигнала радиопередатчика на протяжении полумесячного периода были слабыми (не

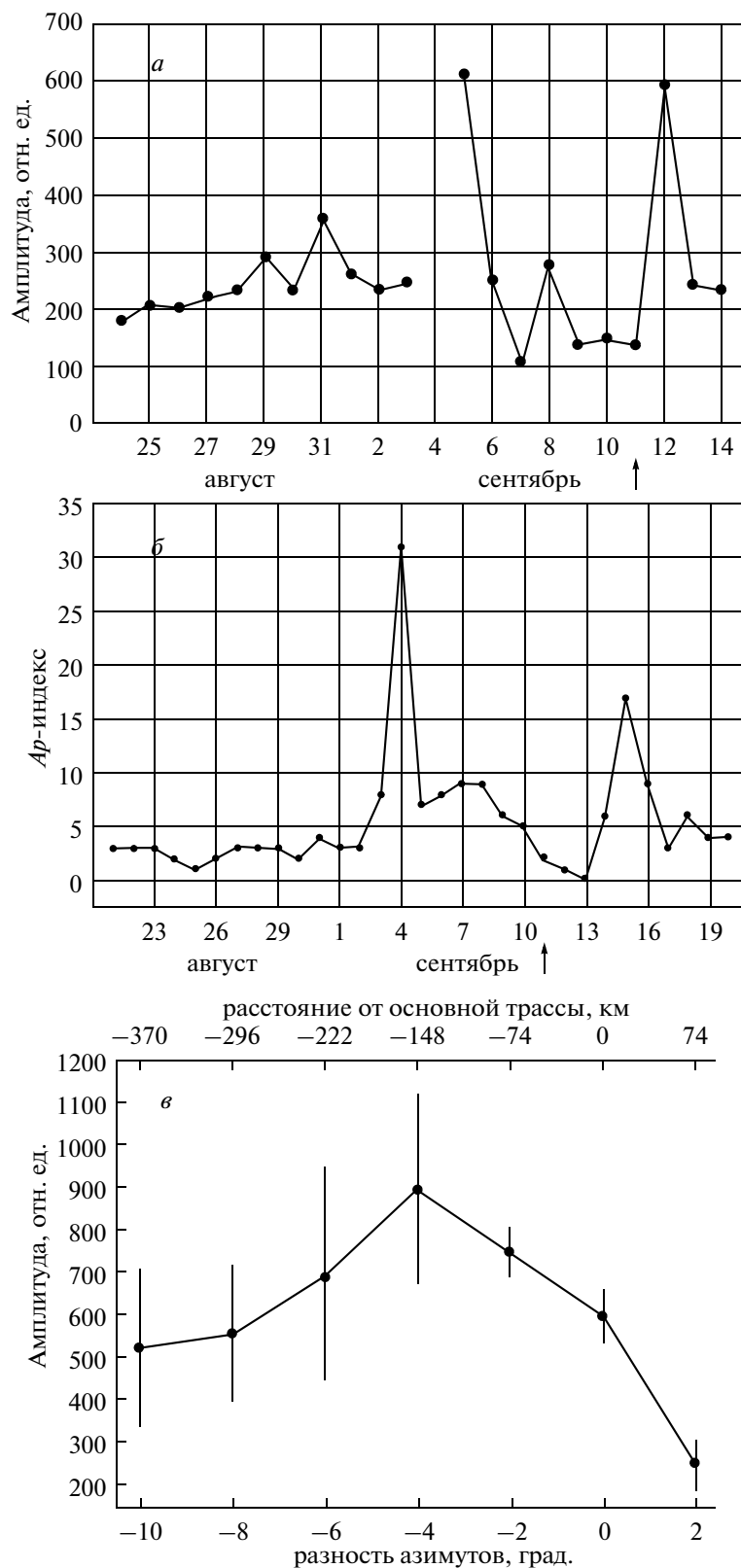


Рис. 1. Вариации средней амплитуды ночных атмосфериков в событии ЗТ 11.09.2008 г. (а); вариации геомагнитного *Ap*-индекса (б); азимутальное распределение средней амплитуды атмосфериков для предвестника 31.08.2008 г. (в). Здесь и далее стрелками указаны моменты землетрясений.

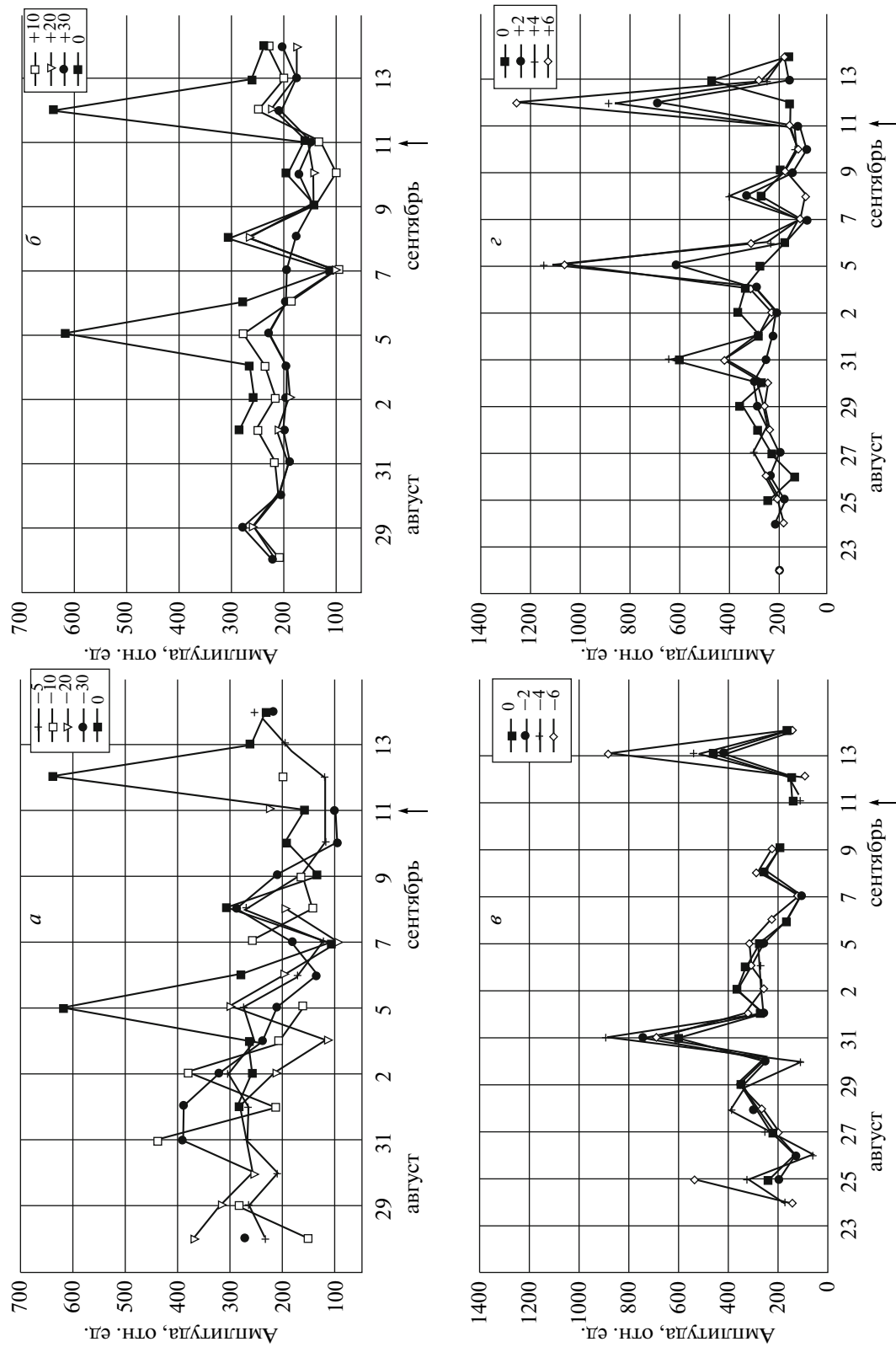


Рис. 2. Вариации средней амплитуды ночных атмосфериков, принимаемых с меньших и больших азимутов относительно азимута на эпицентр землетрясения (отмечен как 0°) 11.09.2008 г. (а, б — через 10°, в, г — через 2°).

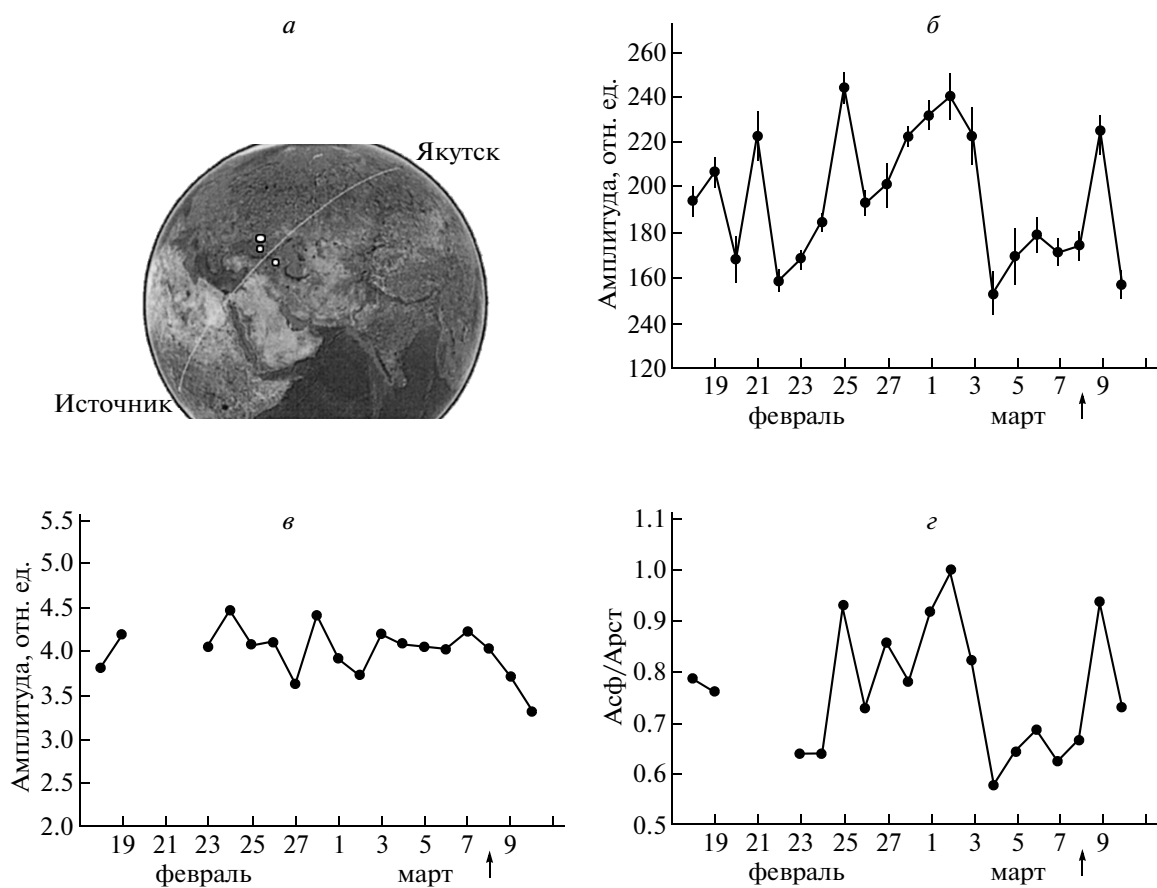


Рис. 3. *a* – расположение радиостанции (квадрат) и размеры пятой зоны Френеля на середине трассы (кружки); *б* – вариации амплитуды атмосфериков; *в* – вариации амплитуды радиостанции; *г* – вариации отношения амплитуды атмосфериков к амплитуде сигнала радиостанции.

более 25%), в интервале 20–22.02.2010 г. сигнал отсутствовал. Следовательно, в амплитуде сигнала радиопередатчика никаких эффектов от ЗТ и никаких предвестников ЗТ, как и ожидалось, не проявилось. На рис. 3г, на котором представлено поведение амплитуды атмосфериков, нормированной на амплитуду сигнала радиопередатчика, все вариации атмосфериков сохранились. Следовательно, так как трасса сигнала радиопередатчика и выбранные трассы распространения атмосфериков очень близки, то можно полагать, что все изменения в амплитуде сигналов атмосфериков происходили над эпицентром или в грозном очаге. В качестве вероятного предвестника на рис. 3б можно рассматривать значительное усиление амплитуды с максимумом 02.03.2010 г. и однодневный максимум 25.02.2010 г. Однако, анализ вариаций амплитуды атмосфериков с соседних азимутальных секторов 275°, 260° показывает, что максимум 02.03.2010 г. таковым не является, так как на соседних азимутах присутствуют подобные вариации, хотя и с максимумом на один день раньше – 01.03.2010 г. Однодневный максимум

25.02.2010 г. присутствует только на “ближнем” азимуте (275°). А максимум 21.02.2010 г. наблюдался только с азимута на эпицентр ЗТ, т.е. именно его, по-видимому, можно рассматривать в качестве предвестника.

Вариации амплитуды атмосфериков в период, предшествующий ЗТ, не были связаны с геомагнитной активностью, – до 03.03.2010 г. возмущенность была очень слабой, усиление до умеренной возмущенности наблюдалось 03–04.03.2010 г.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные результаты анализа вариаций амплитуды атмосфериков, распространяющихся над эпицентрами ЗТ, а также результаты работы [Mullayarov et al., 2007] показывают, что в день ЗТ или на следующий день амплитуда может возрастать. За несколько дней до ЗТ (в среднем, за пять–десять дней) также может регистрироваться усиление амплитуды атмосфериков, которое трактуется как предвестник ЗТ. Обычно данное усиление амплитуды носит кратковременный характер

(один—два дня). Непосредственно перед ЗТ (за два—пять дней до события) амплитуда атмосфериков не только возвращается к невозмущенному уровню, но может даже опуститься ниже уровня сигнала, наблюдаемого перед предвестником. Это можно поставить в соответствие с подобными эффектами ослабления амплитуды сигналов низкочастотных радиостанций за несколько дней до ЗТ [Biagi et al., 2001, 2004]. Азимутальное сканирование областей над эпицентрами показывает, что предшествующие ЗТ процессы приводят к возмущению, размеры которого обычно соответствуют размерам первой—второй зон Френеля для частоты 10 кГц (например, радиус первой зоны Френеля на дальности эпицентра 2500 км и источника атмосфериков 5000 км соответствует 195 км). В тоже время эффект ЗТ, по-видимому, может быть и больше (в работе [Mullayarov et al., 2007] получено, что ЗТ в Корякин регистрировалось в амплитуде атмосфериков, принимаемых с азимутов, соответствующих пятой зоне Френеля). Область возмущения может быть несколько смещена от направления на эпицентр и при этом испытывать некоторые колебания от суток к суткам. Отметим, в работе [Molchanov et al., 2004] вариации амплитуды сигналов радиостанций наблюдались в пределах первой зоны Френеля даже для сильных ЗТ ($M > 7$).

Усиление амплитуды атмосфериков, распространяющихся над эпицентром ЗТ, отражает вариации параметров нижней ионосферы, происходящих под воздействием сейсмических процессов. Обычно рассматривается повышение концентрации электронов, что может трактоваться как повышение коэффициента отражения волн. Если рассматривать трассы средней протяженности (2000—4000 км) с небольшим числом “отражений” волн от ионосферы (реально следует рассматривать волновой механизм распространения), то с учетом граничных условий можно ожидать, что сейсмические процессы в период подготовки ЗТ должны проявляться не только в вариациях амплитуды атмосфериков, но и в изменении отношения $E_z/H\tau$, где E_z — вертикальная составляющая электрического поля (регистрируется в эксперименте), $H\tau$ — тангенциальная (горизонтальная) составляющая магнитного поля волны, принимаемая двумя скрещенными рамочными антеннами. Действительно, исходя из известного условия $E_z/E = \sqrt{\epsilon'}$, где ϵ' — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость, зависящая от проводимости среды σ (в нашем случае от концентрации электронов), при изменении концентрации электронов в период “предвестника” можно ожидать изменения отношения $E_z/H\tau$ и, соответственно, отношения принимаемых компонент поля атмосфериков $E_z/H\tau$ (предполагая, что импеданс подстилающей поверхности в пункте приема не изменяется на

временном интервале наблюдения сейсмoeffектов). Для проверки такой возможности наряду с амплитудой атмосфериков анализировалось отношение $U_{Ez}/U_{H\tau}$, где U_{Ez} — напряжение, снимаемое с вертикальной электрической антенны, $U_{H\tau}$ — суммарное напряжение, снимаемое с горизонтальных магнитных антенн. Перед началом измерений дальних атмосфериков коэффициенты усиления измерительных трактов устанавливались таким образом, чтобы отношение $U_{Ez}/U_{H\tau} \approx 1$. Напомним, что рассматриваются вариации амплитуды сигналов атмосфериков, чьи грозовые источники располагаются далее очага ЗТ.

На рис. 4а приведены вариации отношения $E_z/H\tau$, в рассмотренном событии ЗТ 02.12.2005 г. За семь—восемь дней до ЗТ происходит падение значения данного отношения, после чего следует, соответственно, возрастание $E_z/H\tau$. Еще один пример вариации отношения $E_z/H\tau$ показан на рис. 4б для события 04.03.2010 г. на Тайване. Такое поведение отношения $E_z/H\tau$ наблюдается в большинстве рассмотренных событий ЗТ (см. рис. 4в, на котором приведен средний ход данного отношения для девяти ЗТ, полученный методом наложенных эпох, в качестве нулевого дня рассматривается день ЗТ). За пятнадцать—двадцать дней до дня ЗТ на рис. 4в видно превышение отношения $E_z/H\tau$ на 15—20% невозмущенного уровня (нормировано на 1), однако большая среднеквадратическая ошибка определения среднего не позволяет считать этот результат значимым. Величина падения же отношения $E_z/H\tau$ за три—восемь дней до ЗТ значима вероятностью 95%.

Таким образом, за несколько дней до ЗТ возможно наблюдение двух взаимосвязанных процессов в вариациях параметров электромагнитных сигналов грозовых разрядов, проходящих над областью эпицентра ЗТ: возрастание средней амплитуды и падение отношения компонент сигнала $E_z/H\tau$. Следует отметить, что эффект в вариациях амплитуды сигналов от возмущения на верхней стенке волновода будет зависеть от вида высотного профиля дополнительной концентрации электронов в данном возмущении (см. напр. [Poulsen et al, 1993]). В частности, наиболее сильные изменения в амплитуде сигналов можно ожидать, когда изменение концентрации электронов происходит на высотах, где выполняется условие $\omega_{He} > \nu_{en}$, где ω_{He} — гирочастота электронов, ν_{en} — эффективная частота соударений электронов с нейтральными частицами, (выше 70 км). Это неравенство соответствует ночным условиям, в которых проводятся наши основные измерения. Однако, мы имеем в определенном смысле противоречащие друг другу вариации в характеристиках сигналов, так как, если возрастание амплитуды сигнала связать с повышением коэффициента отражения за счет увеличения электронной концен-

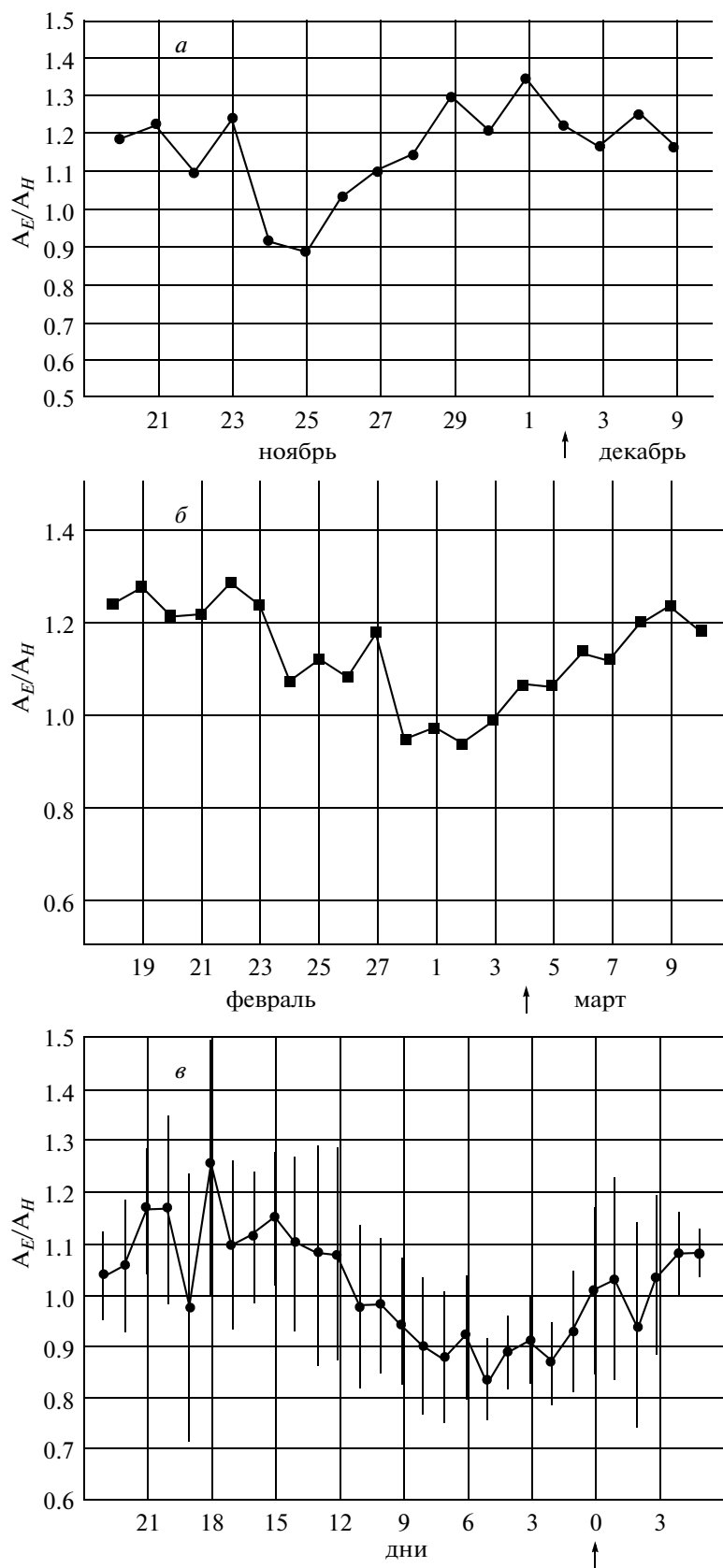


Рис. 4. а – вариации отношения $Ez/H\tau$ в событии ЗТ 02.12.2005 г.; б – вариации отношения $Ez/H\tau$ в событии 04.03.2010 г.; в – усредненный ход отношения $Ez/H\tau$.

трации в нижней области ионосферы, то в соответствии с приведенным граничным условием следовало бы ожидать такого же повышения отношения $E_z/H\tau$. Тем не менее существует сценарий возмущения в нижней ионосфере, которому могут удовлетворять оба явления в сигналах. Следует допустить, что сейсмические процессы предвестника ЗТ проявляются, в основном, в разогреве нижней ионосферы и, как следствие, в понижении, наоборот, электронной концентрации в нижней части E -области ионосферы. В этом случае уменьшение отношения $E_z/H\tau$, объясняется уменьшением проводимости плазмы (комплексной диэлектрической проницаемости), а повышение средней амплитуды атмосфериков – уменьшением степени затухания волны в нижней части ионосферы, когда они распространяются в ионосфере до “точки отражения” и обратно (см., например, [Cummer and Inan, 2000]). Подобная ситуация рассмотрена в работе [Marshall et al., 2008] применительно к сигналам СДВ-радиостанций, в которых наблюдаются амплитудно-фазовые возмущения, обусловленные воздействием грозových разрядов на ионосферу. Модельными расчетами показано, что воздействие на ионосферу в виде электромагнитного шумового импульса, состоящего из последовательности электрических полей большого числа грозových внутриоблачных разрядов, может привести к уменьшению электронной концентрации на высотах около 90 км и, как следствие, к уменьшению затухания волн в нижней ионосфере – к возрастанию амплитуды сигнала радиостанции. В этой связи можно отметить работы [Liperovskaya et al., 2003, Liperovsky et al., 2005], в которых получено, что за три дня до ЗТ увеличивается уровень турбулентности в спорадическом E_s -слое ионосферы, что указывает на нагрев атмосферы.

К разогреву нижней ионосферы могут привести несколько причин. Это, в частности, акустические волны в диапазоне частот 0.01–1 Гц, генерирующиеся в области ЗТ, которые достигая высот ионосферы, могут вызывать локальные электрические поля и токи, а те, в свою очередь, разогревают ионосферу [Liperovsky et al., 1997, Haldoupis et al., 1997]. Электрические поля могут также возбуждаться непосредственно в очагах. А в работе [Molchanov et al., 2004] считается, что за косвенное воздействие ЗТ на ионосферные параметры ответственны акустико-гравитационные волны (АГВ) [Nekrasov et al., 1995, Liperovsky et al., 2000].

Таким образом, эффекты возрастания амплитуды атмосфериков в момент/после ЗТ и в предшествующие периоды (предвестники) обусловлены, по-видимому, разными вариациями электронной концентрации в ионосфере. Если эффект собственно ЗТ, возможно, связан с возрастанием электронной плотности в нижней

ионосфере, то эффект предвестника, наоборот, – с понижением.

Следует отметить, что на расстояниях больше 2000 км до источников сигналов – грозových разрядов, характер проявления в амплитуде ночных атмосфериков эффектов воздействия сейсмических процессов на ионосферу может зависеть от расположения интерференционной картины поля вдоль земной поверхности (интерференция нескольких мод). Однако, как следует из результатов азимутального сканирования, это не исключает вероятности проявления сейсмических процессов в вариациях средней амплитуды атмосфериков (наличие предвестников и эффекта собственно ЗТ).

Мониторинг рассмотренных предвестников ЗТ в амплитудных вариациях атмосфериков можно попытаться использовать как один из дополнительных способов комплексного краткосрочного прогнозирования ЗТ. Для проверки такой возможности проведен тестовый анализ имеющегося массива данных по атмосферикам, проходящих над одним из сейсмоактивных регионов – над Камчатским полуостровом. Результат анализа заключался в выработке “алертов” (“тревог”) без предварительной привязки к каталогам ЗТ. Использованы результаты регистрации дальних атмосфериков в зимние сезоны 2004–2006 гг. Так как размеры области проявления предвестника, соответствующие первой зоне Френеля над Камчаткой для атмосфериков, возникающих на дальностях до 6000 км от приемника в Якутске, могут составлять порядка 400 км, то для теста достаточно было задать один–два виртуальных эпицентров. В качестве одного такого виртуального эпицентра была выбрана точка с координатами 53° N, 160° E (“середина” полуострова, азимут в Якутске на данную точку относительно северного направления –100°, дальность – 1900 км).

Простейший алгоритм выработки возможного “алерта” заключался в следующем. В выбранный часовой интервал суток (около полуночи) день ото дня рассчитывались среднеквадратические вариации амплитуды атмосфериков и если в очередные сутки следовало превышение амплитуды атмосфериков над уровнем среднеквадратических вариаций более 2σ , то этот день начинал рассматриваться в качестве возможного дня алерта. Алерт вырабатывался, если затем следовало понижение средней амплитуды атмосфериков, превышающее уровень среднеквадратических вариаций, не менее двух дней подряд (как отмечалось, предвестники наблюдаются за три–восемь дней до ЗТ). Следующие десять дней после выработки алерта пропускались, чтобы исключить эффекты ЗТ и возможных афтершоков. После анализа всего массива данных (создания списка алертов) проведено сопоставление с каталогом реально за-

Параметры землетрясений, произошедших в окрестности тестового виртуального эпицентра на Камчатке

№ п/п	Дата	Время, УТ	Широта град, N	Долгота град, E	Глубина, км	Магнитуда, <i>M</i>	Алерт
1	15.02.2004	16:51:29.53	54.83	164.61	30	4.4	+
2	25.02.2004	08:56:06.50	54.62	162.81	19	5.5	o
3	03.03.2004	15:55:28.28	54.55	162.53	52	4.3	+
4	20.03.2004	08:53:15.11	53.83	160.47	52	5.8	o
5	14.04.2004	01:54:09.22	55.23	162.66	51	6.2	+
6	16.11.2004	11:57:28.14	53.06	160.13	48	5.5	+
7	11.11.2005	14:54:50.74	55.13	164.65	11	4.2	+
8	13.12.2005	19:01:39.74	55.99	161.47	87	4.4	+
9	06.02.2006	05:51:33.07	56.19	164.20	24	5.7	o
10	12.04.2006	01:06:58.69	56.40	163.99	28	6.0	+

регистрованных ЗТ в выбранном регионе. Результаты сопоставления приведены в таблице (учитывались неглубокофокусные ЗТ с магнитудой более 4.0, наличие алерта обозначено “+”, а отсутствие – “o”). Следует отметить, что имеющийся массив данных имеет, к сожалению, очень много пропусков, что исключило из анализа значительную часть временного ряда. В таблице учтены ЗТ, у которых расстояние их эпицентров до трассы, проходящей через виртуальный эпицентр, составляло не более одного–двух зон Френеля. В качестве примера отсутствия алерта на ЗТ, располагающегося на большем расстоянии, чем указанные зоны Френеля, приведено ЗТ под номером 9. За исключением лишь одного события (номер 4) ЗТ пришлось на область севернее основной трассы распространения сигналов (проходящих через виртуальный эпицентр). Как следует из таблицы, из восьми ЗТ в этой области пропущено два события. При этом, пропуск ЗТ под номером 2 возможно, связан с тем обстоятельством, что за десять дней до него (15.02.2004 г.) зарегистрировано другое ЗТ (алертное ЗТ под номером 1). Отметим, что ЗТ под номером 7 было более глубоко фокусным по сравнению с принятым значением критерия отбора. Таким образом, несмотря на малое количество рассмотренных событий получены предпосылки для дальнейших исследований возможности использования мониторинга вариаций характеристик атмосфериков в качестве одного из дополнительных способов комплексного краткосрочного прогнозирования ЗТ.

5. ВЫВОДЫ

В качестве одного из средства комплексного мониторинга возмущений нижней ионосферы, обусловленных неглубокофокусными сейсмическими процессами, могут быть использованы наблюдения низкочастотных электромагнитных сигналов грозных разрядов – атмосфериков. Не-

глубокофокусные ЗТ с магнитудой более 4.0 и предшествующие им литосферные процессы проявляются в амплитудных характеристиках атмосфериков. Это дает принципиальную возможность использования характеристик электромагнитных сигналов грозных разрядов в качестве дополнительного средства комплексного мониторинга возмущений нижней ионосферы, обусловленных сейсмическими процессами.

Поперечные размеры области сейсмических возмущений в нижней ионосфере соответствуют размерам первой зоны Френеля для сигналов на частоте 10 кГц. Из результатов азимутального сканирования следует, что расположение ионосферной области возмущения как в период ЗТ, так и в период предвестника может отличаться от проекции на эпицентр ЗТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козлов В.И., Муллаяров В.А., Лантев А.Д. Грозная активность в Якутии по наблюдениям с помощью однопунктового грозопеленгатора-дальномера // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 32. № 2. С. 216–221. 1996.
- Муллаяров В.А., Козлов В.И., Амбурский А.В. Проявление землетрясений на трассах распространения ОНЧ-радиозумов и импульсных сигналов по наблюдениям в Якутске // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 69–78. 2007.
- Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М: Сов. радио. 464 с. 1972.
- Biagi P.F., Piccolo R., Ermini A., Martelucci S., Belecci C., Hayakawa M., Capozzi V., Kingsley S.P. Possible earthquake precursors revealed by LF radio signals // Nat. Haz. Earth Sys. Sci. № 1. P. 99–104. 2001.
- Biagi P.F., Piccolo R., Castellana L., Ermini A., Martelucci S., Belecci C., Capozzi V., Perna G., Molchanov O., Hayakawa M. Variation in a LF radio signal on the occasion of the recent seismic and volcanic activity in Southern Italy // Phys. Chem. Earth. V. 29. P. 551–557. 2004.

- *Cummer S.A., Inan U.S.* Ionospheric E region remote sensing with ELF radio atmospherics // *Radio Science*. V. 35. P. 1437. 2000.
- *Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoi A.A., Marenko V.F., Yampolshy V.S., Ponomarev E.* A Study of seismic influence on the ionosphere by superlong wave probing of the Earth-ionosphere waveguide // *Phys. Earth Planet. Inter.* V. 57. P. 64–67. 1989.
- *Haldoupis C., Farley D.T., Schlegel K.* Type-1 E-region ionosphere // *Ann. Geophysicae*. V. 15. P. 908–917. 1997.
- *Liperovsky V.A., Meister C.-V., Schlegel K., Haldoupis Ch.* Currents and turbulence in and near mid-latitude sporadic E layers caused by strong acoustic impulses // *Ann. Geophysicae*. V. 15. P. 767–773. 1997.
- *Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Liperovskaya E.V., Parrot M., Meister C.-V., Alimov A.* Modification of sporadic E layers caused by seismic activity // *Surveys in Geophysics*. V. 21. P. 449–486. 2000.
- *Liperovskaya E.V., Pokhotelov O.A., Hobara Y., Parrot M.* Variability of sporadic E layer semi transparency ($foEs - fbEs$) with magnitude and distance from earthquake epicenters to vertical sounding stations // *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* № 3. P. 279–284. 2003.
- *Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Vasil'eva N.E., Alimov O.* On spread Es effects in the ionosphere before earthquakes // *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* № 5. P. 59–62. 2005.
- *Marshall R.A., Inan U.S., Chevalier T.W.* Early VLF perturbations caused by lightning EMP driven dissociative attachment // *Geophys. Res. Lett.* V. 35. P. 21807. 2008.
- *Molchanov O.A., Hayakawa M.* Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes // *J. Geophys. Res.* V. 103. P. 17489–17504. 1998.
- *Molchanov O.A., Fedorov E., Schekotov A., Gordeev E., Chebrov V., Surkov V., Rozhnoi A., Andreevsky S., Judin D., Yanga S., Lutikov A., Hayakawa M., Biagi P.F.* Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere // *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* № 4. P. 757–767. 2004.
- *Mullayarov V.A., Karimov R.R., Kozlov V.I.* Variations in thunderstorm VLF emissions propagating over the epicenters of earthquakes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69/13. P. 1513–1523. 2007.
- *Nekrasov A.K., Shalimov S.L., Shukla P.K., Stenflo L.* Nonlinear disturbances in the ionosphere due to acoustic gravity waves // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 57. P. 737–741. 1995.
- *Poulsen W.L., Inan U.S., Bell T.F.* A Multiple-Mode Three-Dimensional Model of VLF Propagation in the Earth-Ionosphere Waveguide in the Presence of Localized D Region Disturbances // *J. Geophys. Res.* V. 98. P. 1705–1717. 1993.
- *Rozhnoi A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Hayakawa M.* Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions // *Phys. Chem. Earth*. V. 29. P. 589–598. 2004.