

## Эффекты проявлений возмущений ионосферы над очагами подготовки румынских землетрясений

© А. П. Сливинский<sup>1,2</sup>, Ф. И. Бушуев<sup>1</sup>, Н. А. Калюжный<sup>1,2</sup>, А. В. Шульга<sup>1</sup>, 2008

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев, Украина

<sup>2</sup>Украинский радиотехнический институт, Николаев, Украина

Поступила 27 ноября 2007 г.

*Представлено членом редколлегии В. Г. Бахмутовым*

Встановлено кореляцію зменшення амплітуди сигналів НДХ передавачів у пункті реєстрації НДІ МАО зі збільшенням повного електронного вмісту за даними вимірювань перманентних GPS станцій Євразійського континенту в дні, що передували сильним румунським землетрусам 2004 і 2005 рр. Виявлені напередодні цих землетрусів кореляційні поля з від'ємними значеннями коефіцієнтів кореляції, меншими за  $-0,7$ , віднесено до їх іоносферних провідників. У дні, що передували землетрусам, підтверджено аномальні зміщення часу проходження НДХ радіотрас уранішнім термінатором. Підтверджено результати досліджень з виявлення перед землетрусами акустичних гравітаційних хвиль з періодами коливань в інтервалі 20—30 хв. У складі амплітуди сигналу передавача DCF-77 в умовах відсутності промислових перешкод і грозової діяльності виявлено інтенсивні перешкоди типу імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП), що передували землетрусу.

Correlation of amplitude decrease of signals of SLW transmitters in registration point of RI NAO with the increase of total electron contents according to measurements of Eurasian permanent GPS stations in days previous to strong Romanian earthquakes of 2004 and 2005 has been found. The correlation fields with negative coefficients of correlation, smaller than  $-0.7$ , that were detected before these earthquakes are related to their ionosphere precursors. Abnormal displacements of the times of passage of SLW radio lines by morning terminator are confirmed in days previous to the earthquakes. Results of researches on detection before earthquakes of acoustic gravity waves (AGW) with the fluctuation period range 20-30 minutes are confirmed. Before the earthquake the intensive noises of a pulse electromagnetic field (PEMF) type are detected in the signal amplitude structure of the transmitter DCF-77 and in the conditions of absence of industrial noises and lightning activity.

**Введение.** Исследования предвестников землетрясений остаются одной из основных проблем современной геофизики. Проводятся широкие поиски признаков подготовки землетрясений и предшествующих им сейсмических, деформационных и электромагнитных аномалий. К настоящему времени на основе данных перманентных GPS-станций накоплен достаточный материал по возмущениям  $F$ -слоя ионосферы над очагами подготовки землетрясений [1 — 4]. В некоторых исследованиях японских и украинских авторов [5 — 7] по данным амплитуд сигналов СДВ-радиостанций обнаружено смещение терминаторного времени, а также генерация акустико-гравитационных волн для радиотрас вблизи очагов подготовки землетрясений. Первые наблюдения возмущений импульсного электро-

магнитного поля (ИЭМП) перед землетрясениями начаты под руководством проф. А. А. Воробьева [8] в районах оз. Байкал, Камчатки и Средней Азии. Интенсивность ИЭМП измерялась методом подсчета импульсов. В сборнике работ [9] отмечалось уменьшение амплитуды сигналов СДВ-станций для радиотрас, проходящих над очагами подготовки землетрясений. Целью настоящей работы является исследование возможности выделения и объединения указанных феноменов перед некоторыми румынскими землетрясениями.

**Корреляция возмущений амплитуды сигнала СДВ и полного электронного содержания ионосферы.** В сейсмоактивном районе Вранча на интервале сентябрь 2004 г. — май 2005 г. произошло четыре землетрясения, характеристики которых взяты с сайта <http://>

**Характеристики землетрясений, произошедших в интервале времени сентябрь 2004 г. — май 2005 г. в сейсмоактивной зоне Вранча**

Дата	Время UT	Координаты, град		H, км	M	D, км
		θ	φ			
27.09.04	09:16:23	45,69	26,4	146	4,7	265
03.10.04	09:02:03	45,2	29,02	5	5,1	260
27.10.04	20:34:36	45,7	26,5	95	5,9	270
14.05.05	20:37:00	45,8	26,6	140	5,2	250

Примечание: θ, φ — северная широта и восточная долгота эпицентра землетрясения, H — глубина эпицентра, M — магнитуда, D — расстояние эпицентра до радиотрассы НАО — DCF-77.

[www.neic.cr.usgs.gov/neis/general/handouts/general\\_seismicity.html](http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/general/handouts/general_seismicity.html) и приведены в таблице.

По методике, изложенной в работе [10], коэффициент корреляции  $\rho_i$ , возмущений амплитуды сигнала СДВ и возмущений ПЭС рассчитывался по формуле

$$\rho_i = \frac{\sum_{M1}^{M2} (\Delta A_m - \overline{\Delta A})(\Delta E_{i,m} - \overline{\Delta E_i})}{(M2 - M1)\sigma_A \sigma_{E_i}}, \quad (1)$$

где  $M1, M2$  — начальный и конечный номера отсчетов времени, соответствующие заданному интервалу времени в течение суток;  $\overline{\Delta A}$ ,  $\sigma_A$ ,  $\overline{\Delta E_i}$ ,  $\sigma_{E_i}$  — средние и среднеквадратичные возмущения амплитуды сигнала СДВ ( $\Delta A_m$ ) и возмущения ПЭС ( $\Delta E_{i,m}$ ) соответственно на интервале времени  $[M1, M2]$ ;  $i$  — порядковый номер GPS-станции;  $m$  — порядковый номер временной выборки.

Оценки возмущений  $\Delta A_m$  и  $\Delta E_{i,m}$  проводились с темпом 5 мин.

Для ионосферного предвестника землетрясений характерна отрицательная корреляция

(антикорреляция) возмущений — увеличение полного электронного содержания с синхронным уменьшением амплитуды сигнала СДВ. Исходные 30-секундные значения псевдодальностей  $P2$  и  $P1$ , пропорциональные  $\Delta E_{i,m}$ , брались из RINEX (Receiver Independent Exchange Format) файлов перманентных GPS-станций, расположенных в евразийском регионе на различных удалениях от эпицентров землетрясений и СДВ-радиотрасс, а сами RINEX-файлы скачивались с сайта <http://sopac.ucsd.edu>. На рис. 1 представлена карта дислокации перманентных GPS-станций. Линиями отмечены радиотрассы DCF-77 — Николаев и РБУ — Николаев. Передатчик РБУ расположен в г. Москва и излучает на частоте 66.(6) кГц. Ближайшие к нему GPS-станции ZWE2 и ZWEN находятся в г. Звенигород. Ближайшими GPS-станциями к месту дислокации передатчика DCF-77 являются FFMG и KLOP (г. Франкфурт-на-Майне), а GPS-станция MIKL находится в г. Николаев на территории НИИ НАО.

На рис. 2 приведены карты коэффициентов корреляции для тех суток, когда абсолютное значение  $|\rho_i| > 0,7$ , а само значение  $\rho_i$  отрицательное. Оценки  $\rho_i$  были получены на интервале времени с 09:00 до 12:00 UTC.

В соответствии с данными таблицы, ионосферным предвестником землетрясений 27.09.2004 г. и 03.10.2004 г. может быть корреляционное поле 21.09.2004 г. (рис. 2 а). В то же время корреляционные поля 18.10.2004 г. (рис. 2, б) и 25.10.2004 г. (рис. 2, в) можно отнести к ионосферным предвестникам события 27.10.2004 г.

Корреляционные поля ионосферных возмущений, предшествующих землетрясению

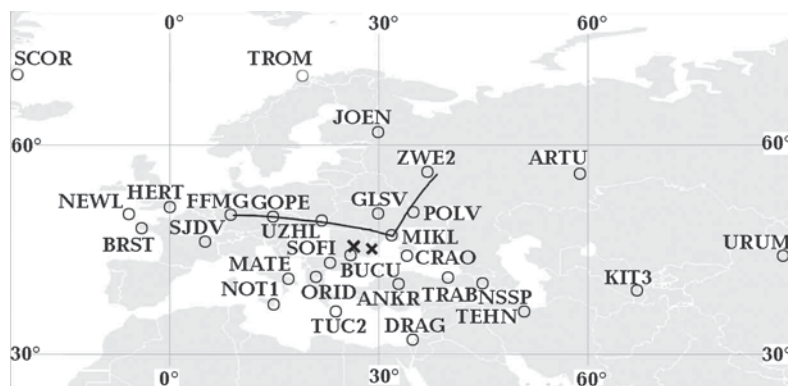


Рис. 1. Карта радиотрасс DCF-77 — Николаев, РБУ — Николаев и дислокации перманентных GPS-станций. Крестиками отмечены эпицентры землетрясений из таблицы.

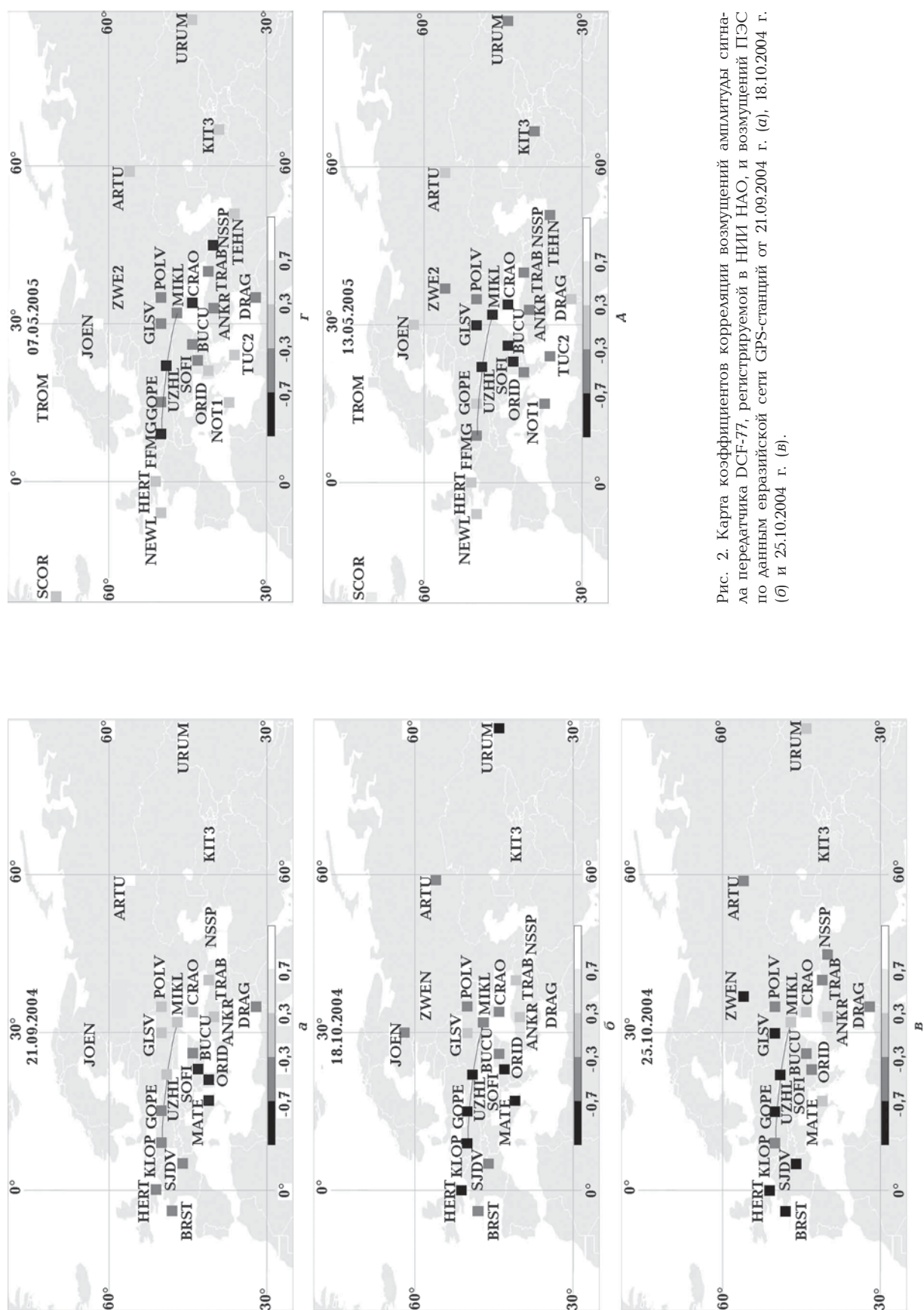


Рис. 2. Карта коэффициентов корреляции возмущений амплитуды сигнала передатчика DCF-77, регистрируемой в НИИ ИАО, и возмущений ПЭС по данным евразийской сети GPS-станций от 21.09.2004 г. (а), 18.10.2004 г. (б) и 25.10.2004 г. (в).

14.05.2005 г., представлены на рис. 2, *г* (07.05.2005) и рис. 2, *д* (13.05.2005).

В работе [11] отмечено, что 25.10.2004 г. регистрируемая на комплексе приемной аппаратуры НИИ НАО амплитуда сигнала передатчика РБУ снизилась до уровня шумов. В этой же работе для объяснения такого феномена было высказано предположение, состоящее в том, что особенности поведения сигнала передатчика РБУ могут быть связаны с достаточно сильной пространственной анизотропией возмущения ионосферы. Радиотрасса Николаев — Москва простирается практически вдоль меридиана, тогда как радиотрасса Николаев — Майнфлинген — приблизительно вдоль параллели. Если ионосферное возмущение вытянуто преимущественно вдоль меридиана, то понятно, что сигналы на радиотрассе Николаев — Москва были подвергнуты наиболее сильному искажению. Действительно, подобное предположение находит свое экспериментальное подтверждение. Согласно данным, приведенным на карте корреляционного поля от 25.10.2004 (см. рис. 2, *г*), в этот день ионосферное возмущение простирается от г. Николаев (MIKL) до г. Москва (ZWE2).

Следовательно, масштабы  $F$ -области ионосферы, подверженной возмущению, лежат в пределах от  $10^\circ$  до  $20^\circ$  по широте и от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  по долготе и возрастают с увеличением магнитуды готовящегося землетрясения, что

подтверждает оценки величин масштабов возмущений  $F$ -слоя ионосферы из работ [1 — 4].

**Метод селекции возмущений времени прохождения терминатором СДВ- радиотрасс.** В работах [5 — 7] японские исследователи совместно с украинскими учеными анализировали терминаторные времена (ТВ) или экстремальные точки суточных вариаций амплитуды СДВ-сигналов в вечернее и утреннее время. Формирование минимума амплитуды в ТВ обусловлено интерференцией нескольких волновых мод. ТВ являются физически измеряемыми величинами и содержат полезную информацию о долгосрочном изменении верхней атмосферы на пути распространения СДВ-радиоволн. В работе [6] утверждается, что, в то время как среднемесячные оценки ТВ хорошо коррелируют с восходом и заходом Солнца, их отклонения от средних могут быть связаны с сейсмическими процессами. Там же были проанализированы данные ТВ на интервалах времени от трех до восьми месяцев, центрированных на датах 11 сильных землетрясений. Были обнаружены статистически значимые отклонения (превышающие стандартные  $2\sigma$ ) в характеристиках ТВ, начиная с двух-трех дней перед главным ударом и продолжавшиеся в течение нескольких недель после него.

В настоящей работе также подвергались анализу ежесуточные ТВ для радиотрасс DCF-

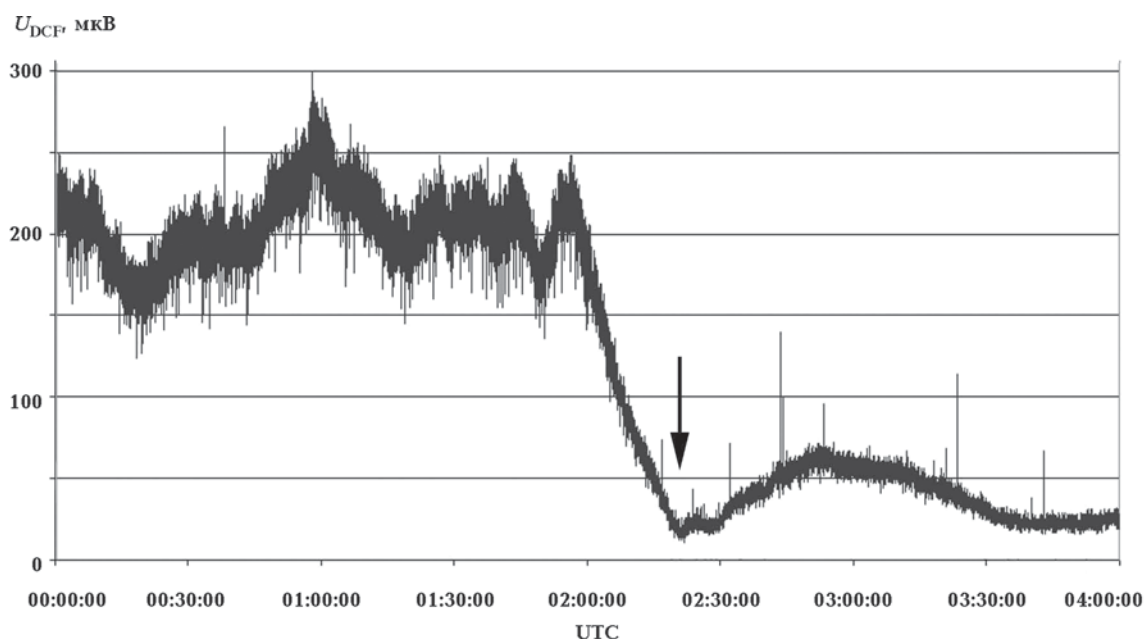


Рис. 3. Посекундная временная последовательность амплитуды сигнала DCF-77 на интервале времени 00:00—03:00 UTC 13.05.2005 г. Стрелкой отмечено положение терминатора на оси времени.

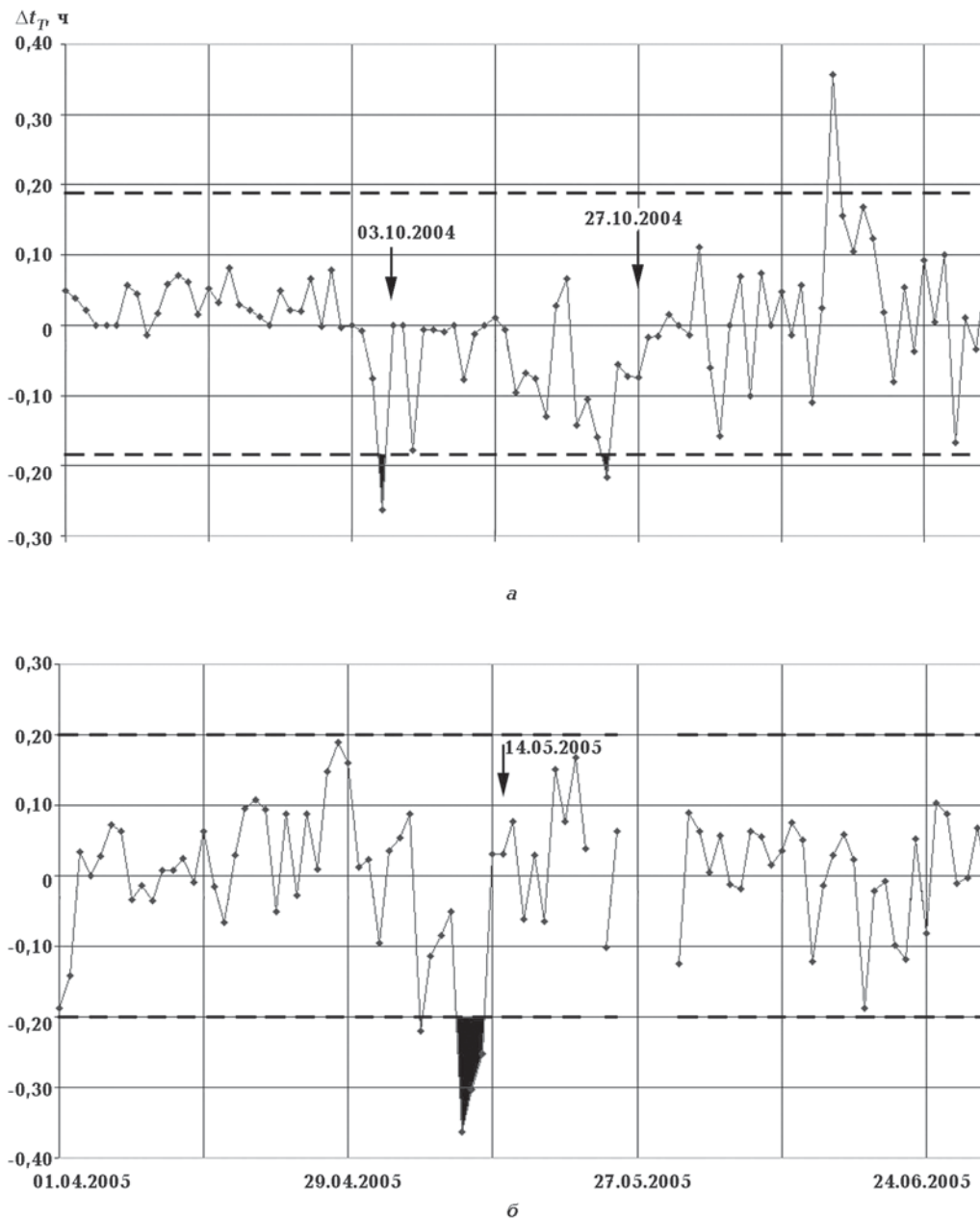


Рис. 4. Графики отклонений ( $\Delta t_T$ ) времени прохождения терминатором радиотрассы DCF-77 — Николаев в период: *а* — с 01.09.2004 г. по 30.11.2004 г., *б* — с 01.04.2005 г. по 30.06.2005 г. Пунктиром показаны отклонения, соответствующие двум СКО и принятые в работе [6] в качестве граничных значений.

77 — Николаев и РБУ — Николаев. Из рис. 1 видно, что линия терминатора квазиортогональна радиотрассе DCF-77 — Николаев и квазипараллельна радиотрассе РБУ — Николаев. Терминаторные времена определялись по минимальному значению амплитуды СДВ сигнала в предрассветное время. На рис. 3 приведена посекундная временная последовательность величины амплитуды сигнала DCF-77 на интервале времени 00:00—03:00 UTC 13.05.2005 г.

Ежесуточные значения утренних ТВ сглаживались методом наименьших квадратов, таким образом определялся регулярный или средний ход утреннего терминатора на анализируемом интервале времени. Вычислялось среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) ТВ и строились графики отклонений ( $\Delta t_T$ ) ТВ от регулярных значений. В соответствии с этой методикой для двух трехмесячных интервалов времени, включающих румынские землетрясения, были построены графики измене-

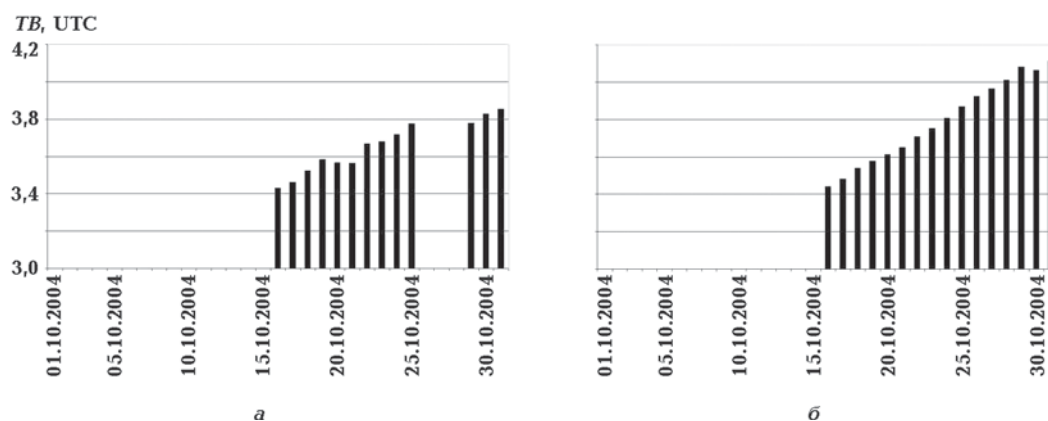


Рис. 5. Графики изменения времени прохождения терминатором радиотрассы РБУ — Николаев: *а* — с 16.10.2004 г. по 31.10.2004 г., *б* — с 16.10.2006 г. по 31.10.2006 г.

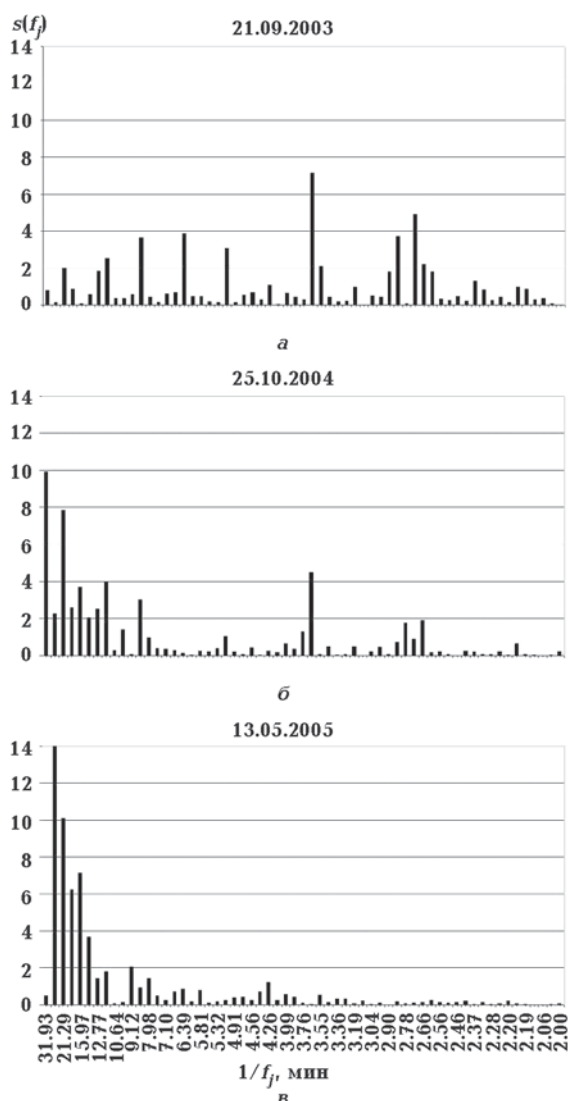


Рис. 6. Нормированные спектральные плотности для ночных условий распространения СДВ: *а* — 21.09.2003 г. в спокойных геогеофизических условиях задолго до землетрясений, *б* — 25.10.2004 г. за два дня до землетрясения 27.10.2004 г., *в* — 13.05.2005 г. за день до землетрясения 14.05.2005 г.

ния отклонений  $\Delta t_T$  для радиотрассы DCF-77 — Николаев (рис. 4).

На рис. 4, *а* можно выделить два аномальных отклонения ТВ: первое — 02.10.2004 г. перед землетрясением 03.10.2004 г. и второе — 25.10.2004 г. перед землетрясением 27.10.2004 г. При этом максимальная девиация положения ТВ превышала 20 мин. На рис. 4, *б* хорошо видны два аномальных отклонения ТВ: 06.05.2005 г. и с 10.05.2005 г. по 12.05.2005 г. перед землетрясением 14.05.2005 г. В этом случае максимальная девиация составила около 35 мин. Фактически, указанные аномальные смещения положения терминатора приводят к укорочению локальной ночи на ионосферных высотах. Такой феномен мог быть обусловлен турбулизацией и нагревом ионосферы перед землетрясениями, механизм которого обсуждался в работе [12].

Для квазипараллельной терминатору радиотрассы регулярная регистрация амплитуды сигналов РБУ-66 началась с 16.10.2004 г. На рис. 5, *а* приведена гистограмма изменения ТВ с 16.10.2004 г. по 31.10.2004 г.

Положения терминатора 20.10.2004 г. и 21.10.2004 г. отклонились от регулярного хода в сторону уменьшения локальной ночи. Максимальная девиация положения терминатора при этом не превышала 5 мин. Для сравнения на рис. 5, *б*, приведена гистограмма динамики терминатора спустя два года за тот же период времени.

Для радиотрассы квазипараллельной терминатору смещение положения терминатора оказалось менее выраженным, чем для квазиортогональной радиотрассы, на что указывалось в работе [10]. К сожалению, в апреле и мае 2005 г. режим работы станции РБУ не позволял получать данные по положению терминатора.

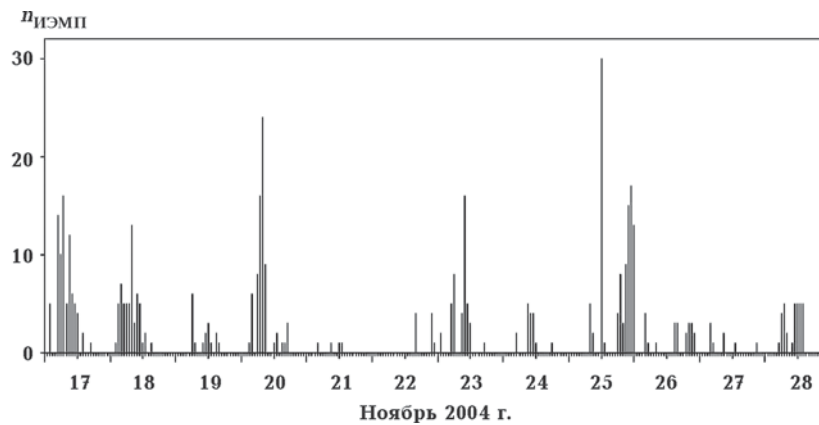


Рис. 7. Диаграмма плотности импульсных помех ( $n_{\text{ИЭМП}}$ ) на частоте передатчика DCF-77 (число импульсов в час) с 17.10.2004 г. по 28.10.2004 г. Полночь отмечена на оси абсцисс длинным штрихом, а полдень — коротким. Время — UTC.

**Акустические гравитационные волны, предшествующие румынским землетрясениям.** В работах [6, 7, 10 — 13] приведены данные по обнаружению колебаний плотности ионосферной плазмы над очагами подготовки землетрясений с периодами в диапазоне 20—25 мин, за механизм возникновения которых, по мнению авторов, ответственны акустические гравитационные волны (АГВ), «генерируемые сейсмогравитационными осцилляциями Земли с периодами от десятков минут до часов». Для подтверждения факта генерации АГВ, предшествующей румынским землетрясениям, спектральной обработке был подвергнут двухлетний массив наблюдаемых данных по амплитуде сигнала передатчика DCF-77 (ночные и дневные 128-минутные временные последовательности). При этом исходные спектральные плотности  $S(f_j)$ , полученные после ДПФ, нормировались к средней мощности в анализируемой полосе частот:

$$s(f_j) \frac{S(f_j)}{\bar{S}},$$

где  $f_j$  — средняя частота  $j$ -го фильтра ДПФ, изменяющаяся с шагом  $1/(128 \cdot 60)$  Гц и принимающая значения, соответствующие анализируемой полосе частот от  $5,2 \cdot 10^{-4}$  до  $8,4 \cdot 10^{-3}$  Гц, или в периодах колебаний от 31,93 до 2,00 мин,  $\bar{S}$  — среднее значение спектральной плотности  $S(f_j)$  в анализируемой полосе частот.

На рис. 6 для ночных условий распространения СДВ-сигналов представлены как нормированные спектральные плотности  $s(f_j)$ , полученные в спокойных геогелиофизических

условиях задолго до рассматриваемых румынских землетрясений (рис. 6, а), так и  $s(f_j)$ , вычисленные за два дня до землетрясения 27.10.2004 г. (рис. 6, б) и за день до землетрясения 14.05.2005 г. (рис. 6, в).

Из сравнения данных, приведенных на рис. 6, следует, что спектры, вычисленные по ионосферным данным, избранным задолго до землетрясений, существенно отличаются от спектров, полученных за два дня и за день перед событиями, наличием у последних спектральных составляющих в области колебаний с периодами 20—30 мин.

**Возмущения импульсного электромагнитного поля.** В работах [9, 14, 15] и приведен достаточно обширный список публикаций по описанию этого феномена и изложены результаты исследований в этом направлении, согласно которым аномальный ход ИЭМП наблюдался за трое или менее суток перед землетрясениями. На основании этого была предпринята попытка поиска возмущений ИЭМП на частоте передатчика DCF-77. С этой целью по сигнальной информации амплитуды передатчика DCF-77 проводились исследования частоты появления импульсных помех на отрезках времени постоянной длины. В связи с тем, что исследования характеристик ИЭМП сеймотектонического происхождения проходят в условиях естественных и искусственных помех, анализу подвергалась амплитуда сигнала на интервале времени, предшествующем землетрясению 27.10.2004 г., когда сводилась к минимуму вероятность появления импульсных помех, связанных с грозовой деятельностью. Для анализа избирались

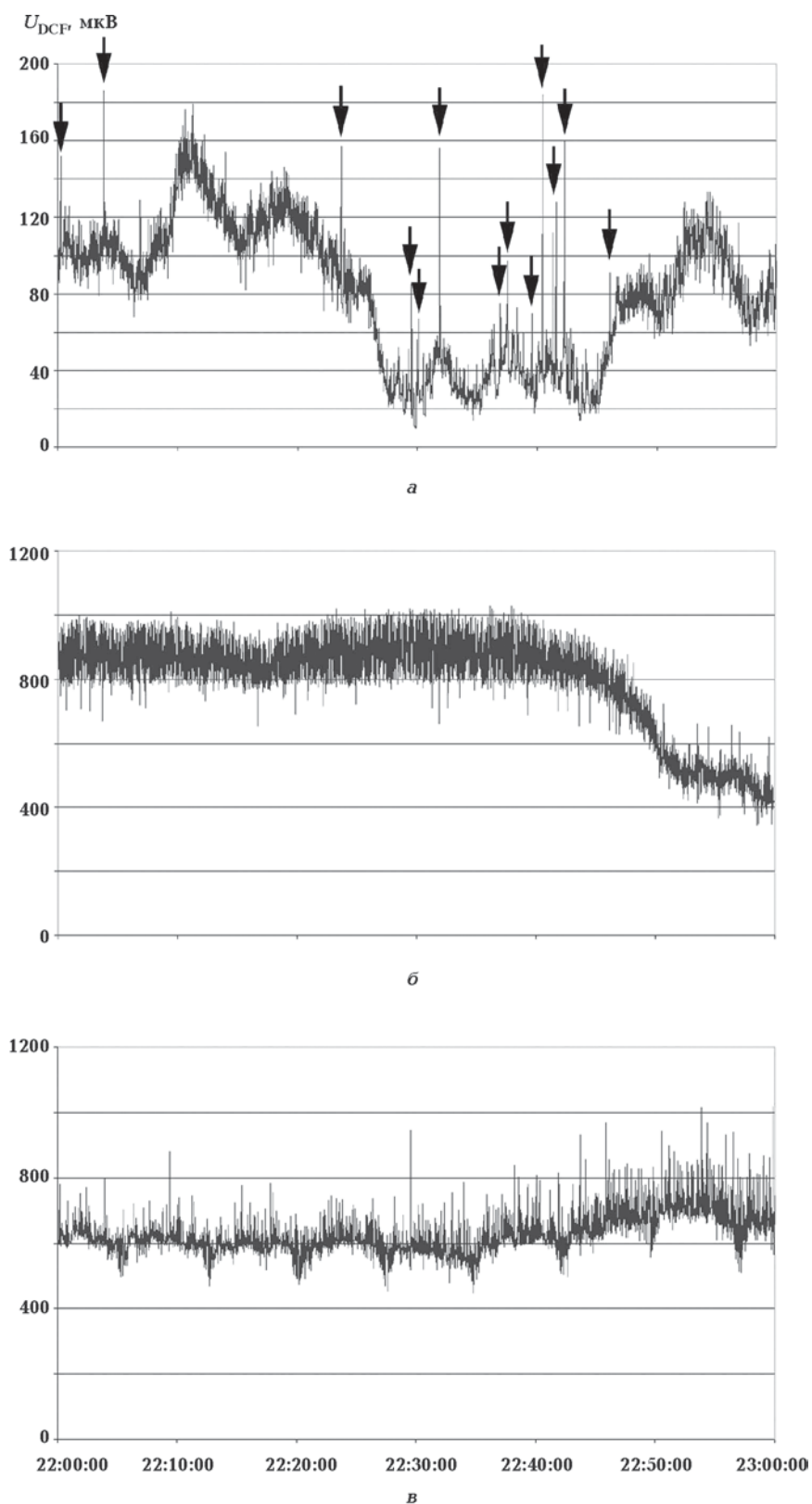


Рис. 8. Секундные реализации амплитуды сигнала на частоте передатчика DCF-77, наблюдавшиеся в течение одного часа с 22:00 до 23:00 UTC: а — 25.10.2004 г., б — 04.07.2005 г., в — 23.07.2007 г.

импульсные сигналы в 1,5 раза превышающие амплитуду сигнала передатчика DCF-77. На рис. 7 для каждого часа суток приведено число таких импульсов, наблюдавшихся в период с 17.10.2004 г. по 28.10.2004 г.

Практически ежесуточные импульсные помехи в дневное время суток связаны, по-видимому, с промышленными помехами, так как очаги гроз в это время отсутствовали на всей длине радиотрассы. По ночам с 22.10.2004 г. на 23.10.2004 г., с 25.10.2004 г. на 26.10.2004 г. и с 26.10.2004 г. на 27.10.2004 г. наблюдались помеховые импульсные сигналы (особенно многочисленные 25.10.2004 г.) в те же сутки, когда был выделен ионосферный предвестник на корреляционном поле (см. рис. 2, в). Подобные импульсные помехи могут быть обусловлены распадом короткоживущих контрастных плазменных образований (КПО) в атмосфере над очагом подготовки землетрясения. В экспериментальных условиях КПО наблюдались на высотах до 35 км на экранах радаров метрового диапазона радиоволн над спитакским очагом подготовки землетрясения [16].

На рис. 8, а приведена временная посекундная реализация сигнала и импульсной помехи на частоте передатчика DCF-77, наблюдавшаяся 25.10.2004 г. на интервале времени один час с 22:00 до 23:00 UTC в условиях отсутствия грозовой деятельности и промышленных помех. Импульсы, вошедшие в статистику, представленную на рис. 7, отмечены стрелками. Для сравнения на рис. 8, б приведена реализация временной последовательности для того же интервала времени в период активной летней грозовой деятельности, но при отсутствии достаточно близких оча-

гов гроз, а на рис. 8, в — во время ночной грозы 23.07.2007 г., редкой для этого времени суток (отчетливо просматриваются отдельные молниевые разряды).

Таким образом, наблюдаемые импульсные помехи в амплитуде принимаемого сигнала (см. рис. 8, а) с большой степенью вероятности обусловлены ИЭМП, предшествующими землетрясению 27.10.2004 г., и могут в дальнейшем учитываться в качестве дополнительного признака предвестника землетрясения.

**Заключение.** В результате проведенных исследований по возмущениям амплитуд сигналов СДВ-передатчиков DCF-77 и РБУ, регистрируемых в НИИ НАО, и по данным наблюдений системы перманентных станций GPS обнаружена достаточно высокая корреляция возмущений, предшествующих землетрясениям в зоне Вранча. Оценки масштабов областей возмущений ионосферы составляли порядка 1000 км, что согласуется, например, с результатами оценок масштабов в работах [5 — 7]. Перед румынскими землетрясениями выделены колебания плотности ионосферной плазмы с периодами в интервале 20—30 мин, что подтверждает результаты работ японских исследователей по генерации АГВ [6, 7], а также выводы этих авторов об аномально больших смещениях времени прохождения терминатора в предшествующие землетрясениям дни. В качестве дополнительных признаков ионосферных предвестников землетрясений, значительно увеличивающих их достоверность, могут выступать дополнительно обнаруженные импульсные помехи в составе амплитуды сигналов СДВ-передатчиков в дни, предшествующие землетрясениям.

## Список литературы

1. Horie T., Yamauchi T., Yoshida M., Hayakawa M. The wave-like structures of ionospheric perturbation associated with Sumatra earthquake of 26 December 2004, as revealed from VLF observation in Japan of NWC signals // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* — 2007. — **69**, issue 9. — P. 1021—1028.
2. Захаренкова И. Е., Шагмуратов И. И., Лаговский А. Ф., Ефшиов И. И. Ионосферные предвестники землетрясений, полученные по данным GPS-наблюдений // Тез. докл. IX регион. конф. по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 28—30 окт. 2003 г.). — <http://radio4.niirf.spbu.ru/conf/nine/26.doc>.
3. Pulnits S. A., Leyva Contreras A., Bisiacchi-Giral-di G., Ciraolo L. Total electron contents variations in ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003 // *Geofis. Int.* — 2005. — **44**, № 4. — P. 369—377. — <http://www.openjgate.com/results.asp>.
4. Zakharenkova I. E., Krankowski A., Shagimuratov I. I. Modification of the low-latitude ionosphere before the 26 December 2004 Indonesian earthquake // *Natural Hazards Earth System Sci.* — 2006. — **6**. — P. 817—823. — <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/6/817/2006/>.
5. Hayakawa M., Molchanov O. A., Ondoh T., Kawai E.

- Precursory signature of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signal // *J. Atmos. Electr.* — 1996. — **16**. — P. 247—257.
6. *Molchanov O. A., Hayakawa M.* Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes // *J. Geophys. Res.* — 1998. — **103**(A8). — P. 17489—17504.
7. *Hayakawa M., Shvets A. V., Maekawa S.* Subionospheric LF monitoring of ionospheric perturbations prior to the Tokachi-oki earthquake and a possible mechanism of lithosphere-ionosphere coupling // *Adv. Polar Upper Atmos. Res.* — 2005. — **19**. — P. 42—54.
8. *Воробьев А. А.* О возможности электрических разрядов в недрах Земли // *Геология и геофизика.* — 1970. — № 12. — С. 3—13.
9. *Поиск электромагнитных предвестников землетрясений* // Под ред. М. Б. Гохберга — Москва: Изд-во ИФЗ, 1988. — 243 с.
10. *Сливинский А. П., Бушуев Ф. И., Калюжный Н. А., Шульга А. В.* Корреляция сигнальной информации СДВ- и GPS-приемников перед румынским землетрясением 14.05.2005 г. // *Геофиз. журн.* — 2008. — **30**, № 2. — С. 116—122.
11. *Сливинский А. П., Бушуев Ф. И., Калюжный Н. А., Образцов Ю. М., Шульга А. В.* О возможности краткосрочного прогноза разрушительных землетрясений по сигнальной информации сверхдлинноволновых передатчиков // *Геофиз. журн.* — 2006. — **28**, № 2. — С. 109—117.
12. *Cervone G., Maekawa S., Singh R. P., Hayakawa M., Kafatos M., Shvets A.* Surface latent heat flux and nighttime LF anomalies prior to the Mw=8.3 Tokachi-Oki earthquake // *Natural Hazards Earth System Sci.* — 2006. — **6**. — P. 109—114.
13. *Rozhnoi A., Solovieva M. S., Molchanov O. A., Hayakawa M., Maekawa S., Biagi P. F.* Anomalies of LF signal during seismic activity in November—December 2004 // *Natural Hazards Earth System Sci.* — 2005. — **5**. — P. 657—660.
14. *Моргунов В. А.* Об электромагнитном излучении при сейсмической активности // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.* — 1985. — № 3. — С. 77—85.
15. *Toshi Asada, Hisatoshi Baba, Mamoru Kawazoe, Masahisa Sugiura.* An attempt to delineate very low frequency electromagnetic signals associated with earthquakes // *Earth Planets Space.* — 2001. — **53**. P. 55—62.
16. *Воинов В. В., Гуфельд И. Л., Крутчиков В. В., Леговский И. С., Маренко В. Ф., Миранян Ф. П., Панагьян В. Г., Ямпольский В. С.* Эффекты в ионосфере и атмосфере перед спитакским землетрясением 7 декабря 1988 г. // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли.* — 1992. — № 3. — С. 98—101.