

## ОНЧ/НЧ МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В КУРИЛО-КАМЧАТСКОМ РЕГИОНЕ

*Рожной А.А.<sup>1</sup>, Соловьева М.С.<sup>1</sup>, Молчанов О.А.<sup>1</sup>, Чебров В.Н.<sup>2</sup>, Воронаев В.Ф.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт Физики Земли РАН, г. Москва, [roznoi@ifz.ru](mailto:roznoi@ifz.ru)*

<sup>2</sup>*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

### Введение

Применение метода ОНЧ/НЧ мониторинга для анализа вариаций сигнала, связанных с сейсмической активностью, началось около 25 лет назад в России, когда были обнаружены ночные «бухтообразные» возмущения в амплитуде и фазе сигнала перед несколькими сильными землетрясениями на длинных трассах [1, 2, 6]. В дальнейшем помимо ночных возмущений было найдено изменение положения характерных минимумов в ежедневном ходе фазы и амплитуды сигнала во время восхода и захода солнца (терминаторов) за несколько дней до сильных землетрясений в Японии [7, 8]. Первые результаты были получены при анализе сигналов от радионавигационной системы “Омега”, которая транслировала сигналы на частотах 10.2, 11.9 и 13.6 кГц. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что наиболее чувствительным к возмущениям в связи с землетрясениями, является фаза сигнала на частоте 10.2 кГц.

Современное развитие этого метода началось после развертывания сети принимающих станций в Японии и установки Omnipol приемника в июне 2000 г. на Камчатке в рамках российско-японского проекта МНТЦ. Приемник измеряет одновременно амплитуду и фазу ОНЧ/НЧ сигналов от 4 передатчиков: JJY (40 кГц) и JJI (22.2 кГц) в Японии, NWC (19.8 кГц) в Австралии и NPM (21.4 кГц) на Гавайских островах (рис. 1). В работе представлены результаты многолетних наблюдений связи вариаций субионосферных низкочастотных сигналов, принимаемых в Петропавловске-Камчатском и в Японии, с процессами подготовки сильных землетрясений.

### Методика наблюдений

Сигнал от каждого из передатчиков оценивался для землетрясений, эпицентры которых попадали в третью зону Френеля. Координаты проекции первой зоны на поверхность Земли рассчитывались по формуле:  $y = [\lambda^2/4 + \lambda x(1-x/D)]^{1/2}$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $x$  – координата вдоль трассы распространения сигнала и  $D$  – расстояние между приемником и передатчиком.

Поскольку ОНЧ/НЧ сигналы имеют суточные и сезонные вариации, для анализа использовался разностный сигнал амплитуды и фазы, определяемый как разница между наблюдаемым и среднемесячным сигналом:  $dA(t) = A(t) - \langle A \rangle$ ,  $dP(t) = P(t) - \langle P \rangle$ . В связи с тем, что в дневное время сигнал сильно подвержен внезапным ионосферным возмущением, вызываемым рентгеновскими вспышками, и он менее чувствителен к слабым воздействиям, для анализа был выбран ночной интервал времени.

При анализе поведения амплитуды и фазы сигнала принимались в рассмотрение следующие параметры: индексы активности магнитного поля  $K_p$  и  $Dst$ ; данные с геостационарного спутника ГОЕС-10, который находится над Тихим океаном на высоте  $6Re$ , по рентгеновским и протонным вспышкам и потокам релятивистских электронов ([www.spidr.ngdc.noaa.gov](http://www.spidr.ngdc.noaa.gov)); значения X-компоненты магнитного поля Земли по данным геомагнитных обсерваторий Мошири и Магадан, расположенных на ближайшем к изучаемому району  $210^\circ$  магнитном меридиане; данные о землетрясениях из каталога USGS/NEIC ([http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic\\_global.html](http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html)).

### Результаты ОНЧ/НЧ мониторинга

Основная сложность при использовании этого метода состоит в выделении предвестниковых эффектов на фоне глобальных возмущений в нижней ионосфере, вызванных магнитными бурями и суббурями, протонными вспышками и высыпаниями релятивистских электронов, а также циркуляцией атмосферы. Поэтому в первую очередь были проанализированы возмущения ОНЧ/НЧ сигналов несейсмического происхождения [3-5, 10]. Семилетний анализ данных, полученных по наблюдениям на Камчатке и в Японии, показал, что аномалии в сигнале во время магнитных бурь и суббурь наблюдаются только, когда внезапное начало и основная стадия бури приходится на ночное время. При этом величина аномалий сигнала не зависит линейно от силы магнитной бури, и возмущения сигнала одной частоты не всегда одновременно наблюдаются на всех приемных

станциях. Также величина возмущений сигналов, принимаемых на одной и той же станции, может быть различна для различных частот. Аномалии могут наблюдаться одновременно в амплитуде и



фазе сигнала, либо только в одной из характеристик. Для сети ОНЧ/НЧ станций была получена статистическая зависимость между вариациями амплитуды и фазы НЧ сигнала в ночное время и Dst индексом магнитной активности, протонными вспышками и потоками релятивистских электронов, зарегистрированных на геостационарном спутнике GOES-10.

Было найдено, что значения амплитуды и фазы НЧ сигнала в ночное время подвержены квазипериодическим колебаниям, период которых совпадает с периодом планетарных волн. Была обнаружена зависимость между изменениями значений амплитуды НЧ сигнала в ночное время и вариациями атмосферного давления.

Рис. 1. Положение приемника в Петропавловске-Камчатском (РТК) и ОНЧ/НЧ передатчиков: JJY, JJL, NWC и NPM

Полученные результаты принимались во внимание при анализе поведения ОНЧ/НЧ сигналов в связи с сейсмической активностью. В основном анализировался сигнал от японского JJY

передатчика, поскольку эпицентры почти всех сильных коровых землетрясений в Дальневосточном регионе попадают в зону чувствительности радиотрассы JJY - Петропавловск-Камчатский. За 7 лет мониторинга в зоне чувствительности было зарегистрировано 153 землетрясения с  $M \geq 5.5$  и 7 землетрясений с  $M \geq 7.0$ . Ночные “бухтообразные” аномалии НЧ сигнала наблюдались в случае сильных изолированных землетрясений в течение 5-6 дней до землетрясения. Пример такого рода аномалий показан на рис. 2. Эффект считался достоверным, если сигнал оставался возмущенным в течение нескольких дней перед землетрясением на фоне спокойного магнитного поля, и сигналы на контрольных трассах находились в пределах среднеквадратических отклонений. Амплитудные аномалии во всех случаях были отрицательные, в фазе сигнала наряду с отрицательными нередко наблюдались аномалии переменных знаков.

Полученные результаты принимались во внимание при анализе поведения ОНЧ/НЧ сигналов в связи с сейсмической активностью. В основном анализировался сигнал от японского JJY

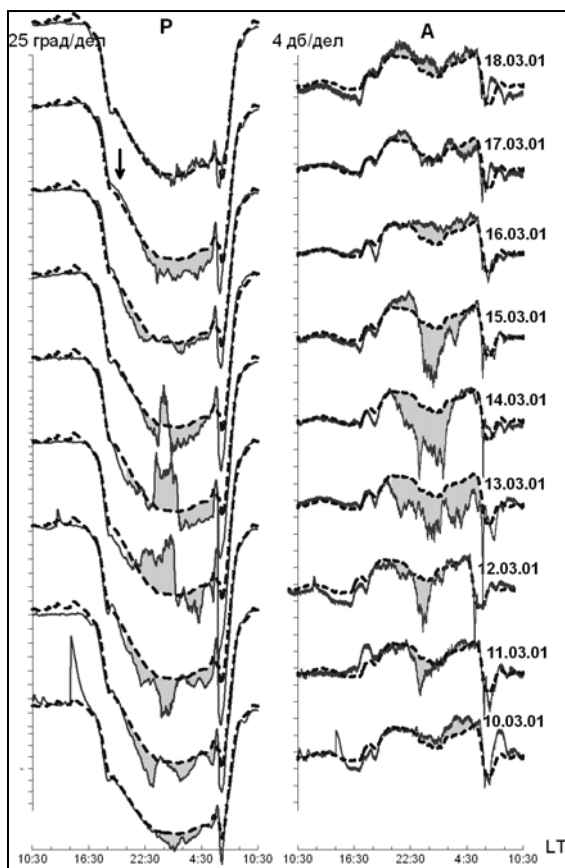


Рис. 2. Фазовые (P) и амплитудные (A) аномалии НЧ сигнала (40 кГц), наблюдавшиеся в Петропавловске-Камчатском перед землетрясением 17 марта 2001 г. ( $M = 5.5$ ). Стрелкой отмечен момент землетрясения. Пунктирная линия - средний уровень сигнала для невозмущенных дней. Закрашенные области показывают отклонение текущих значений от средних.

Наиболее явные и длительные аномалии в поведении сигнала наблюдались во время периодов сильной сейсмической активности, когда несколько землетрясений, эпицентры которых располагались в одной области, следовали один за другим в течение небольшого промежутка времени. Аномалии такого типа в отсутствии сейсмической активности не были зарегистрированы. Всего было три серии сильных землетрясений (с максимальной  $M \geq 7$ ): в ноябре 2004 г., в августе 2005 г. и в ноябре 2006 г.

Поведение ОНЧ/НЧ сигналов во время серии землетрясений в августе 2005 г. вблизи северной части о-ва Хонсю (Япония) представлено на рис. 3. Эпицентры трех землетрясений с  $M = 6-7.2$  находились в зоне чувствительности трасс JJY - Петропавловск-Камчатский и JJL - Петропавловск-Камчатский и очень близко к зоне чувствительности трасс JJY - Мошири и NWC - Петропавловск-Камчатский. Станция Мошири

расположена на о-ве Хоккайдо в Японии. Результаты анализа поведения сигнала в период с 1 июля по 15 сентября 2005 г. для 5 наземных трасс показали, что на всех трассах, кроме контрольной гавайской (NPM-РТК), заметно появление аномалий в сигнале во время периода сейсмической активности. При этом характер аномалий несколько различен. На камчатских трассах от двух японских передатчиков аномалии появляются за 2 дня до первого землетрясения и длятся до конца серии землетрясений. Наиболее отчетливо заметно общее понижение величины фазы НЧ сигнала. Аномалии на двух других трассах менее длительные.

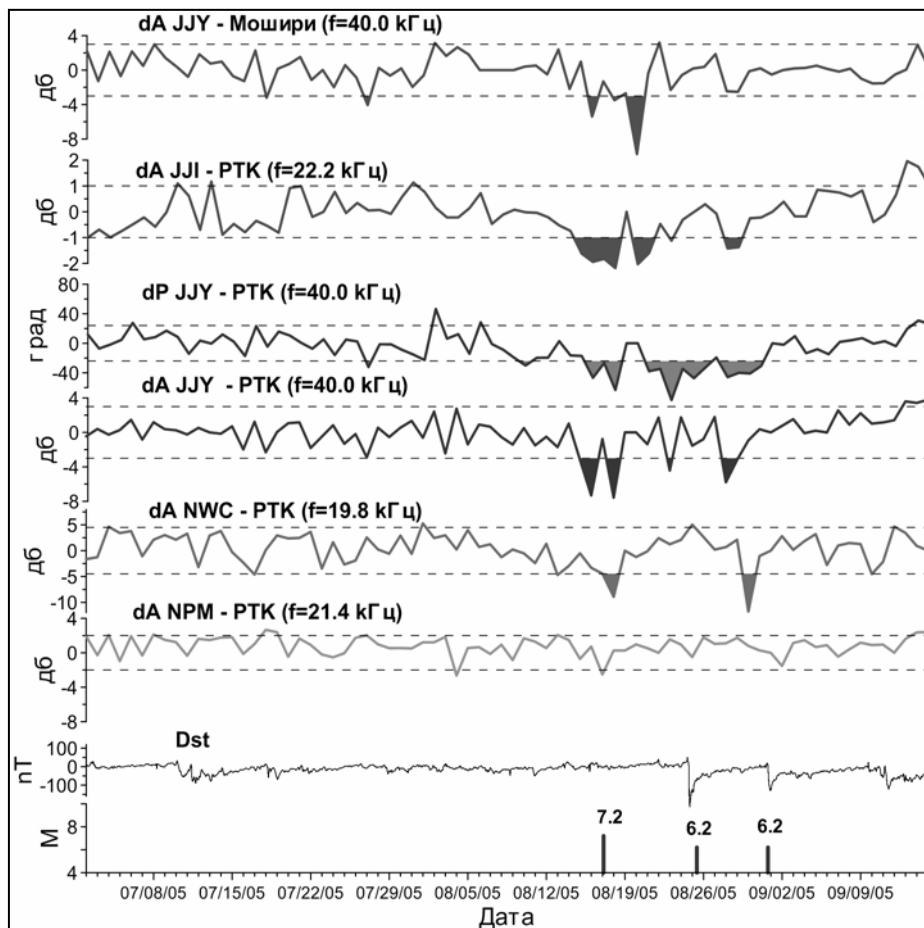


Рис. 3. Средние ночные разностные значения амплитуды (dA) и фазы (dP) ОНЧ/НЧ сигналов для 5 радиотрасс за период 1 июля-15 сентября 2005 г. Пунктирные линии на графиках –  $\pm 2\sigma$ . Закрашенные области показывают превышение двух стандартных отклонений (аномалии сигнала). На двух нижних графика представлены Dst индекс и магнитуда землетрясений.

Поскольку 3 из 7 землетрясений с  $M \geq 7$ , зарегистрированных за весь период наблюдения в зоне чувствительности трассы JJY – Петропавловск-Камчатский, произошли в ноябре месяце, был проведен анализ поведения сигнала в этом месяце за семь лет наблюдения (рис. 4).

Стрелками на рисунке показаны даты сильных землетрясений ( $M > 6$ ). В ноябре 2000 и 2001 гг. сейсмическая активность была низкой, и сигнал в ночное время оставался спокойным. 3 ноября 2002 г. произошло землетрясение с  $M = 6.4$ , и заметно появление некоторого возмущения вблизи даты этого землетрясения. В ноябре 2004 г. хорошо видны две серии возмущений в сигнале в связи с 2 сериями сейсмической активности вблизи японского о-ва Хоккайдо ( $M = 5.6-7.1$ ). В ноябре 2005 г. сильные возмущения в сигнале появляются перед землетрясением 14 ноября с  $M = 7.0$ , которое произошло на севере о-ва Хонсю. Наиболее сильные и длительные возмущения сигнала отчетливо прослеживаются в течение всего ноября 2006 г. во время периода очень сильной сейсмической активности. 15 ноября 2006 г. произошло землетрясение с  $M = 8.3$  в районе Северных Курильских островов, после этого землетрясения сильные афтершоки с  $M = 5.6-6.5$  наблюдались в течение нескольких месяцев. Аномалии в НЧ сигнале на трассе JJY – Петропавловск-Камчатский начались за две недели до первого толчка и продолжались в течение всего периода афтершоковой активности.

Всего из семи землетрясений с  $M \geq 7.0$ , зарегистрированных в зоне чувствительности трассы JJY-Петропавловск-Камчатский, аномалии в НЧ сигнале предшествовали шести землетрясениям. Однако природа аномалий, наблюдавшихся в двух случаях, имеет, скорее всего, не сейсмическое происхождение. Наиболее неоднозначным является случай землетрясения с  $M = 8.3$ , которое произошло 25 сентября 2003 г. вблизи западного побережья острова Хоккайдо. Этот случай рассматривается некоторыми исследователями, как проявление возмущений перед землетрясением. Аномалии в амплитуде и фазе НЧ сигнала на камчатской трассе от JJY передатчика наблюдались в течение 5 дней с 18 по 22 сентября во время необычайно сильной протонной вспышки и потока релятивистских электронов. Возможно, что в данном случае аномалии от электронов существенно превышают по интенсивности сейсмические аномалии, и последние невозможно выделить на их

фоне. Землетрясение 31 октября 2003 г. совпало по времени с сильнейшей магнитной бурей «Хэллуин» ( $Dst > 400$ нТ), которая значительным образом деформировала суточный ход сигнала.

Для определения порога чувствительности сигнала к магнитуде землетрясений и выявления наиболее возможных периодов наблюдения аномалий, вызванных сейсмичностью, был выполнен статистический анализ [9]. Результаты анализа показали, что чувствительность НЧ сигнала к сейсмическим процессам становится значимой, начиная с магнитуды  $M > 5.5$ . Для таких землетрясений аномалии в сигнале наблюдались в 15-20% случаев. При этом наиболее вероятно появление аномалий в сигнале от 2 до 7 дней перед землетрясением и до 7 дней после него.

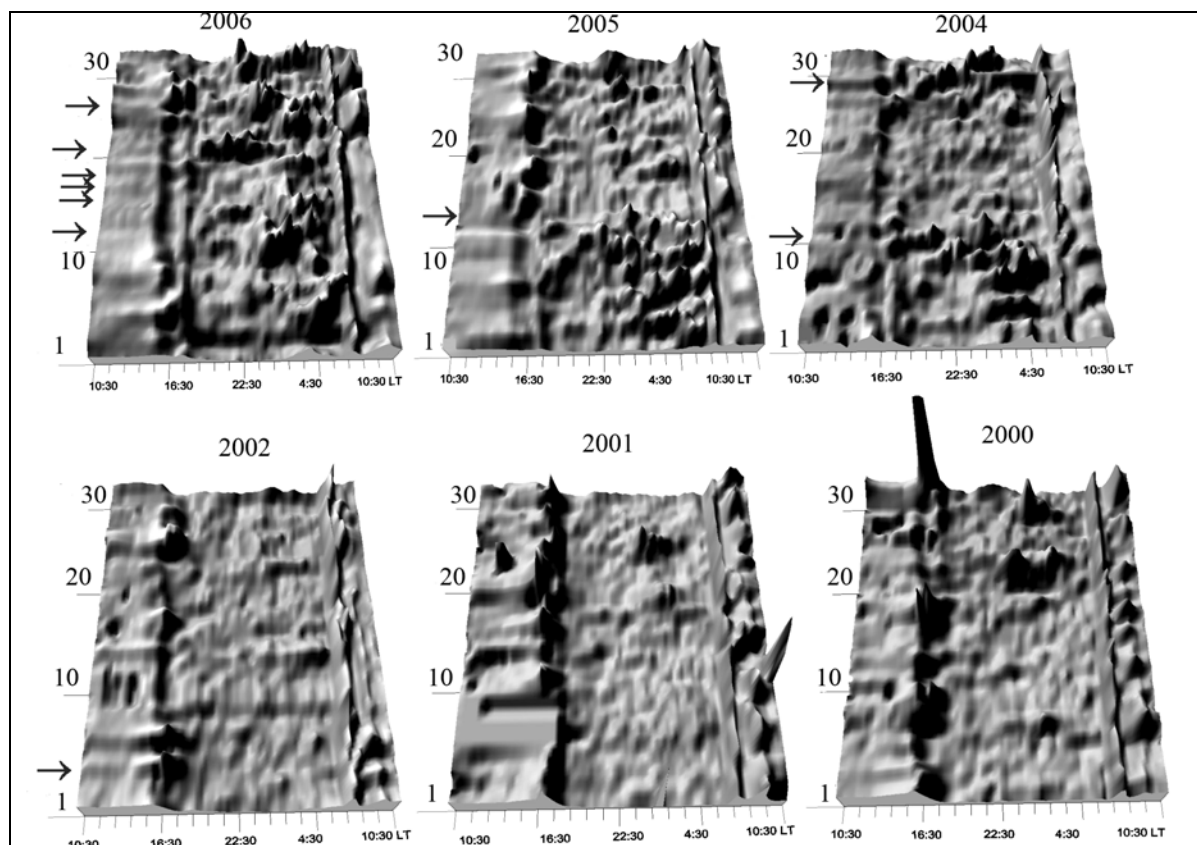


Рис. 4. Трехмерное изображение суточных вариаций амплитуды НЧ сигнала в течение ноября 2000, 2001, 2002, 2004, 2005 и 2006 гг. Стрелками показаны даты землетрясений с  $M > 6$ .

Анализ спектра амплитуды и фазы НЧ сигнала для трех серий сильных землетрясений ( $M \geq 7$ ) представлен на рис. 5. Для каждой серии землетрясений были рассчитаны накопленные спектры амплитуды и фазы НЧ сигнала, фильтрованного в частотном диапазоне 0.28-15 мГц (1-60 мин). Анализ выполнялся только для ночного интервала времени. Для расчета были отобраны дни, когда фильтрованный сигнал превышал фоновый более чем на  $3\sigma$ , при этом магнито-возмущенные дни были исключены из рассмотрения. Для каждой серии землетрясений было отобрано 12-15 дней с аномалиями в сигнале, наблюдавшимися как до первого землетрясения в серии, так и в течение всего периода сейсмической активности. Так как возмущения в сигнале следуют непрерывно, не всегда можно разделить аномалии на пресейсмические возмущения, относящиеся к следующему землетрясению и постсейсмический эффект после предыдущего сейсмического толчка. В любом случае эти аномалии являются проявлением влияния землетрясения на границу атмосферы и ионосферы, которая определяет параметры распространяющегося НЧ сигнала.

Для сравнения были рассчитаны суммарные спектры амплитуды и фазы сигнала 19 дней, отобранных для периодов спокойных магнитных и сейсмических условий. Как в спектрах спокойных, так и в спектрах аномальных дней основной максимум приходится на период 30-35 минут, однако в спектрах сейсмо-возмущенных дней во всех случаях выделяются максимумы с периодами 20-25 минут и 10-12 минут, что совпадает с периодами атмосферных гравитационных волн, движущихся вверх. При анализе спектров во время магнитных бурь и суббурь подобного эффекта не обнаружено.

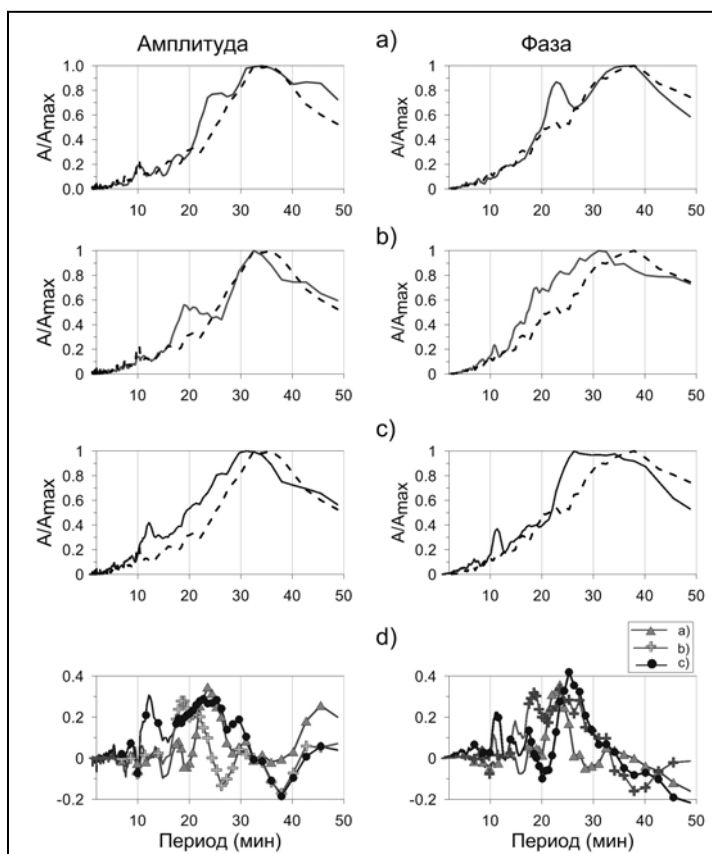


Рис. 5. Суммарные нормализованные спектры амплитуды и фазы НЧ сигнала для трех серий сильных землетрясений: а) ноябрь-декабрь 2004 г.; б) август 2005 г.; в) ноябрь 2006 г. Пунктирная линия на графиках – суммарный спектр для 19 невозмущенных дней. На графике d) показана разница между суммарными спектрами сейсмически активных и спокойных дней.

### Заключение

Результаты проведенных исследований дают возможность сделать вывод об эффективности использования этого метода для краткосрочного прогноза сильных землетрясений. Для локализации области, связанной с источником возмущения, необходимо использовать сеть ОНЧ/НЧ станций с взаимно пересекающимися трассами. Такой анализ был сделан на европейской сети станций в период землетрясения в Аквиле 6 апреля 2009 г. [11]. Анализ сигналов от одних и тех же передатчиков на пересекающихся трассах впервые дал возможность локализовать область подготовки землетрясения.

### Список литературы

1. Гохберг М.Б., Гуфельд И.Л., Маренко В.Ф., Пономарев Е.А., Рожной А.А., Ямпольский В.С. Исследование возмущений естественных и искусственных электромагнитных полей источниками сейсмического происхождения // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1987. № 2. С. 17-24.
2. Гуфельд И.Л., Рожной А.А., Тюменцев С.Н., Шерстюк С.В., Ямпольский В.С. Возмущения радиоволновых полей перед Рудбарским и Рачинским землетрясениями // Изв. АН, сер. Физика Земли. 1992. № 3. С. 102-106.
3. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Рожной А.А., Соловьева М.С. Вариации параметров СДВ сигналов на радиотрассе Австралия-Камчатка во время магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. Т. 44. № 3. С. 385-393.
4. Рожной А.А., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Молчанов О.А., Соловьева М.С. Ночные среднеширотные вариации параметров ДВ (40 кГц) сигналов и геомагнитные пульсации P<sub>13</sub> // Геомагнетизм и аэрномия. 2003. Т. 43. № 4. С. 553-560.
5. Рожной А.А., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Соловьева М.С. Влияние неоднородностей солнечного ветра и ММП на параметры ДВ (40 кГц) сигналов на среднеширотной трассе // Геомагнетизм и аэрномия. 2005. Т. 45. № 4. С. 459-466.
6. Gokhberg M.B., Gufeld I.L., Rozhnoy A.A., Marenko V.F., Yampolsky V.S., Ponomarev E.A. Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere wave guide // Phys. Earth Planet. Inter. 1989. V. 57. P. 64-67.
7. Hayakawa M., Molchanov O. A., Ondoh T., and Kawai E. Precursory Signature of the Kobe Earthquake on VLF Subionospheric Signal // J. Atmos. Electr. 1996. V.16. No. 3. P. 247-257.
8. Molchanov O. A. and Hayakawa M. Subionospheric VLF signal perturbation possibly related to earthquakes // J.G.R. 1998. V. 103 (A8). P. 17489-17504.
9. Rozhnoi A., M.S. Solovieva, O.A. Molchanov, M. Hayakawa. Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions // Physics and Chemistry of the Earth. 2004. V. 29. P. 589-598.
10. Rozhnoi A.A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Hayakawa M., Maekawa S. and Biagi P.F. Sensitivity of LF signal to global ionosphere and atmosphere perturbations in the network of stations // Physics and Chemistry of the Earth. 2006. V. 31. P. 409-415.
11. Rozhnoi A., M. Solovieva, O. Molchanov, K. Schwingenschuh, M. Boudjada, P. F. Biagi, T. Maggipinto, L. Castellana, A. Ermini, and M. Hayakawa. Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M=6.3) on 6 April 2009 // Natural Hazard and Earth System Sciences. 2009. V. 9. P. 1727-1732.