

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ВАРИАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ E_s ИОНОСФЕРЫ
THE INFLUENCE OF THE PROCESSES OF EARTHQUAKE PREPARATION ON
VARIATIONS OF PARAMETERS OF THE IONOSPHERE SPORADIC E_s LAYER**

А.С.Силина¹, Е.В.Липеровская¹, Н.Э.Васильева¹, О.А.Алимов²

¹Институт физики Земли РАН, liper@ifz.ru

²Институт Астрофизики Таджикской АН

In connection to earthquake preparation the probability of ionospheric parameter E_s -spread increases 1-3 days before crust events with depths $H < 80$ km. The effect corresponds to the increasing of plasma turbulization in the E- region of the ionosphere. The effect takes place before midnight hours and if the distance from epicenter to the station is less than $R_0 + 150$ km, where $R_0 = \exp(M)$ km, according to Dobrovolsky's formula. The data of vertical sounding stations Petropavlovsk-Kamchatsky and Duchanbe we used. The days with the Solar and geomagnetic disturbances were excluded from the analysis.

Введение

В связи с процессами подготовки землетрясений в ряде работ исследовалось E_s -рассеяние, которое наблюдается как диффузность, расплывчатость следа спорадического слоя E_s на ионограммах вертикального зондирования и отражает процессы турбулизации спорадических слоёв E [1, 2]. Наблюдается E_s -рассеяние довольно редко [1] и, в основном, ночью, примерно с 22 ч и до 03 ч локального местного времени. Появление спорадического E -слоя зависит от сезона, и явление E_s -рассеяния также зависит от сезона (чаще наблюдается летом) и года солнечного цикла (чаще наблюдается в годы минимума 11-летнего цикла солнечной активности).

Первые исследования сейсмоионосферных связей, проведенные около 20 лет назад для нескольких сильных землетрясений, показали, что частота наблюдения E_s -рассеяния в периоды подготовки и сразу после землетрясений увеличивалась по сравнению с фоновым временем [3, 4]. Возникла идея, что частота наблюдения E_s -рассеяния может быть использована в качестве предвестника землетрясений. Предполагалось, что акустические и электромагнитные возмущения, возникающие в процессе подготовки землетрясений, могут быть существенной причиной турбулизации ионосферы в диапазоне масштабов от десятков метров до десятков километров и характерных времен существования порядка нескольких десятков минут и, как следствие, E_s -рассеяния.

В работах [5, 6] были исследованы вероятности наблюдения E_s -рассеяния за 1-3 дня до сильных (с магнитудами $M > 5.5$) землетрясений в Средней Азии. Получено, что на расстояниях до 300 км от эпицентров готовящихся землетрясений наблюдалось увеличение числа наблюдений E_s -рассеяния. При этом не исследовалось, в какие именно часы явление E_s -рассеяния сильнее реагирует на процессы подготовки землетрясений.

В работе [7] исследовались ионосферные эффекты землетрясений с эпицентрами в море в окрестности станции вертикального зондирования Петропавловск-Камчатский. При рассмотрении землетрясений с магнитудами $M > 4.0$ и глубиной эпицентра до 50 км (20 событий) было показано, что частота появлений E_s -рассеяния возрастает в предполуночные часы за 1-3 суток до землетрясений по сравнению с фоновыми днями.

Цель данной работы - исследование суточного хода интенсификации E_s -рассеяния в периоды подготовки землетрясений по ионограммам станции вертикального зондирования Душанбе и сравнение с результатами, полученными по данным станции Петропавловск-Камчатский.

Экспериментальные данные и результаты наблюдений

В работе анализировались вечерние и ночные (с 16 до 04 h LT) 15-минутные данные о E_s -рассеянии (49 измерений за ночь), полученные на ионосферной станции вертикального зондирования Душанбе ($\varphi = 38.5^\circ$ $\lambda = 68.8^\circ$) за 1987-1990 гг.

E_s -рассеяние — достаточно редко наблюдаемое событие. Так, например, в 1987 году по данным ст. Душанбе E_s -рассеяние — диффузность следа спорадического слоя E_s наблюдалась на ионограммах в 14% случаев наблюдения слоя E_s (1532 из 11137). см. Рис.1. При этом учитывались данные, соответствующие широкому диапазону частот $fbE_s = 1,1-3,1$ МГц (случаи наблюдения E_s -рассеяния при более высоких значениях fbE_s единичны).

В статье [1] было отмечено, что E_s -рассеяние чаще наблюдалось при небольших значениях fbE_s (1–2 МГц). Для получения представления о распределении количества случаев E_s -рассеяния при разных значениях fbE_s количество случаев диффузности в определенных частотных

интервалах наблюдений $fbEs$ (по данным ст. Душанбе) было отнесено к количеству случаев наблюдений слоя Es в этих интервалах. Результаты представлены на гистограмме (Рис. 2).

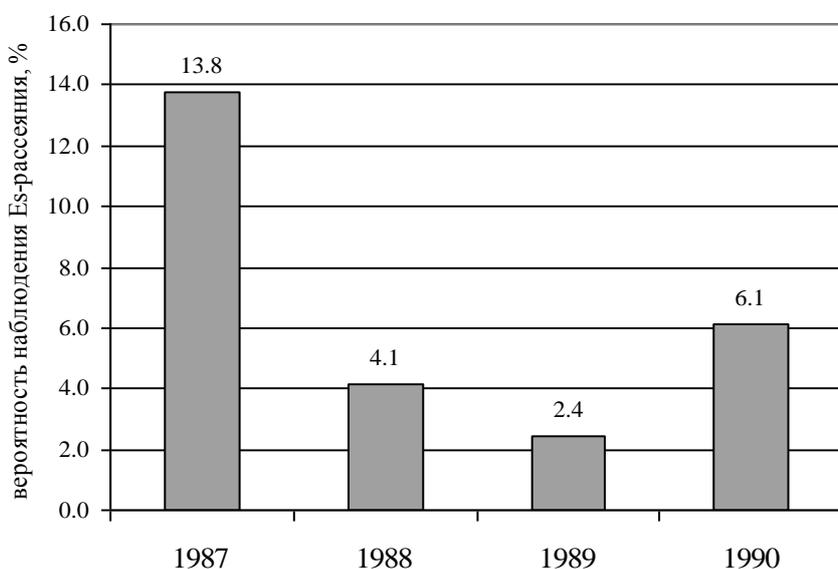


Рис.1. Среднегодовая вероятность наблюдения Es -рассеяния.

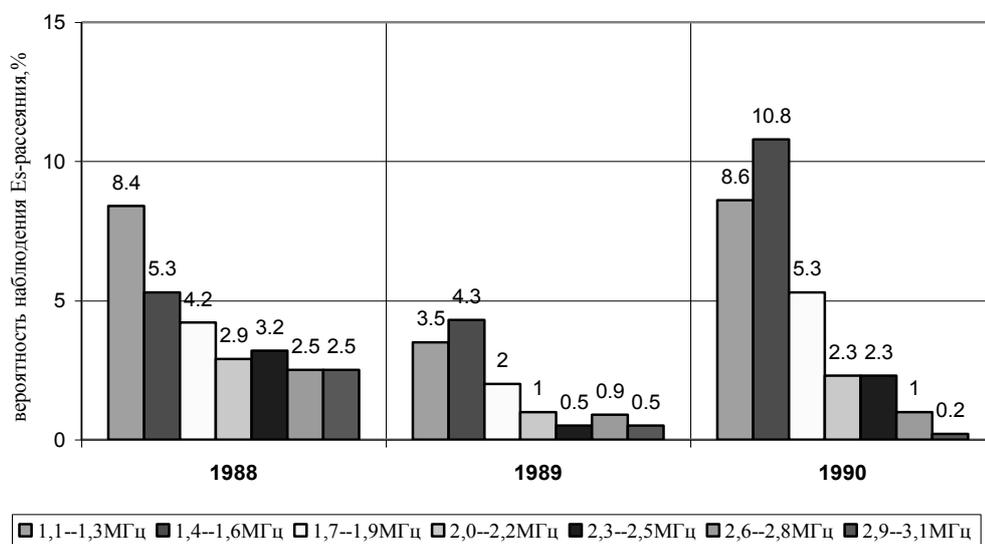


Рис.2. Вероятность наблюдения Es -рассеяния при различных значениях частоты $fbEs$.

При увеличении солнечной активности к году максимума 11-летнего солнечного цикла (1989г.) число случаев наблюдения Es -рассеяния уменьшается. Можно предположить, что возможность появления рассеяния зависит от температуры нейтральных частиц. Можно видеть, что Es -рассеяние зависит от максимальной плотности слоя Es (т.е. от частоты $fbEs$). Как правило, при низких значениях $fbEs$ слои тоньше. Наиболее часто рассеяние наблюдалось при низких значениях $fbEs=1,1-1,6$ МГц.

Es -рассеяние имеет ярко выраженный суточный ход (см.Рис.3а,б). Летом наблюдается резкое увеличение рассеяния с 23 часов LT, далее рассеяние существует примерно до 3 часов ночи, затем число случаев наблюдения рассеяния резко уменьшается. Зимой число случаев наблюдения Es -рассеяния увеличивается примерно с 22 часов и затем уменьшается примерно с 4 ночи. Это самое темное и холодное время суток, соответствующее минимуму амплитуды

рассеянного геокороной излучения, приносящего дополнительную энергию в ночную E -область ионосферы. Минимум температуры нейтралов наблюдается приблизительно в 3 часа ночи.

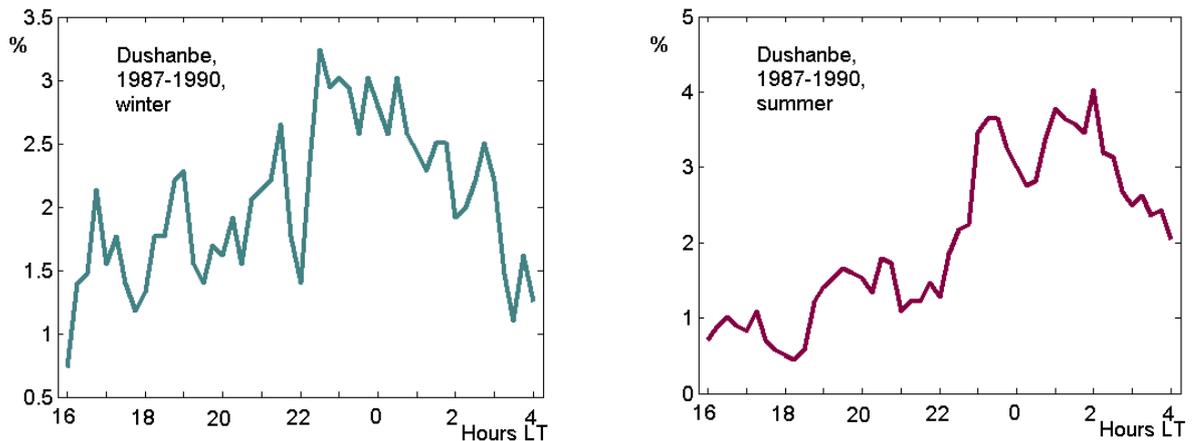


Рис.3а,б. Суточный ход E_s -рассеяния в вечерние и ночные часы (а-зимой) и (б-летом) по данным ст. Душанбе за 1987-1990 г

Если предположить, что фоновое E_s -рассеяние возникает при активизации в ионосфере акустико-гравитационных волн, то становится понятным, почему оно чаще наблюдается летом, а зимой реже. Из-за преобладающей системы ветров зимой АГВ не проходят в ионосферу.

Примерно в 18 часов число наблюдений E_s -рассеяния увеличивается за счет прихода суточной ВГВ – гармоника [8]. Летом, в нагретой ионосфере приход этой гармоника прослеживается хуже, чем зимой.

В настоящей работе проведено сравнение суточной зависимости появления E_s -рассеяния на ионограммах в сейсмоактивные дни по сравнению с остальными днями. При этом, используя результаты предыдущих исследований [7,9], было принято считать «сейсмоактивными» интервалы времени за 1-3 сут до землетрясения. Учитывались только землетрясения с магнитудой $M \geq 4,0$. Изучение достаточно слабых землетрясений было связано с тем, что спорадические слои достаточно близко расположены к поверхности Земли ($h \sim 100$ km) и сейсмоионосферные эффекты могут проявляться и от слабых землетрясений.

Радиус области подготовки землетрясения можно оценить, исходя из формулы Добровольского: $R_d \sim \exp(M)$ км, где M - магнитуда землетрясения [10]. Из геометрических соображений понятно, что слабые возмущения, распространяющиеся от поверхности Земли, могут вызвать изменения в ионосфере, если размер области подготовки - порядка расстояния от поверхности Земли до E области, т.е. $H \sim d = 2R_d$, следовательно, магнитуды землетрясений должны превышать $M=4$, $\exp(4)=50$ км.

Авторы исходили из предположения, что E_s -рассеяние в спорадическом слое E может быть вызвано акустическими волнами с периодами от 20 с до 5 мин. Максимальной амплитуда акустических возмущений от поверхности Земли будет при их распространении, близком к вертикальному. В работе [7] по данным ст. Петропавловск-Камчатский было получено, что за 1-3 дня до землетрясения E_s -рассеяние активизируется в предполуночные часы. Эффект наблюдался перед землетрясениями с глубинами $h < 50$, эпицентры которых были расположены на расстояниях $R < R_d + 100$ км. Исходя из этого, в настоящей работе авторы предлагают рассматривать землетрясения, области подготовки которых также расположены не слишком далеко от станции вертикального зондирования, $R < R_d + 150$ км.

В настоящей работе этот эффект предполагалось исследовать, используя данные ст. Душанбе. За «сейсмоактивные интервалы времени» также были выбраны (-3, -2, -1) ночи. Остальные ночи полагались «фоновыми». Время наблюдения с 16 до 04 LT, вертикальное зондирование каждые 15 мин. Далее подсчитывалось число наблюдений E_s -рассеяния в каждый из 49 моментов измерений как для «сейсмоактивного времени», так и для «фоновом времени». Такой подход позволил выяснить, в какое время суток наблюдаются увеличение E_s -рассеяния, связанное с процессами подготовки землетрясений.

Оказалось, что за 1-3 суток до землетрясений в окрестности Душанбе также наблюдается предполуночное увеличение E_s -рассеяния. Землетрясения рассматривались с глубинами до 80 км. На Рис.4а,б представлены результаты по ст. Душанбе. Наложение эпох за интервалы за 1987 г. и

за 1988-1990 гг проводилось отдельно. Разбиение на два интервала 1987 г. и 1988-1990 гг проведено так, чтобы на каждом интервале число наблюдений E_s рассеяния было достаточно для обоснованных выводов. На рис. 4а,б число наблюдений E_s -рассеяния представлено в зависимости от локального времени для «сейсмоактивных» ночей (-3,-2,-1)-сплошная линия и для «фоновых» ночей –пунктирная линия). По оси ОУ показано число наблюдений E_s -рассеяния в моменты времени, кратные 15 минутам. Кривые нормированы на сумму значений с 16 до 4 LT. Из рис. 4а,б можно видеть, что увеличение E_s -рассеяния за 1-3 дня до землетрясения в предполуночные часы наблюдается и в 1987, и в 1988=1990 гг.

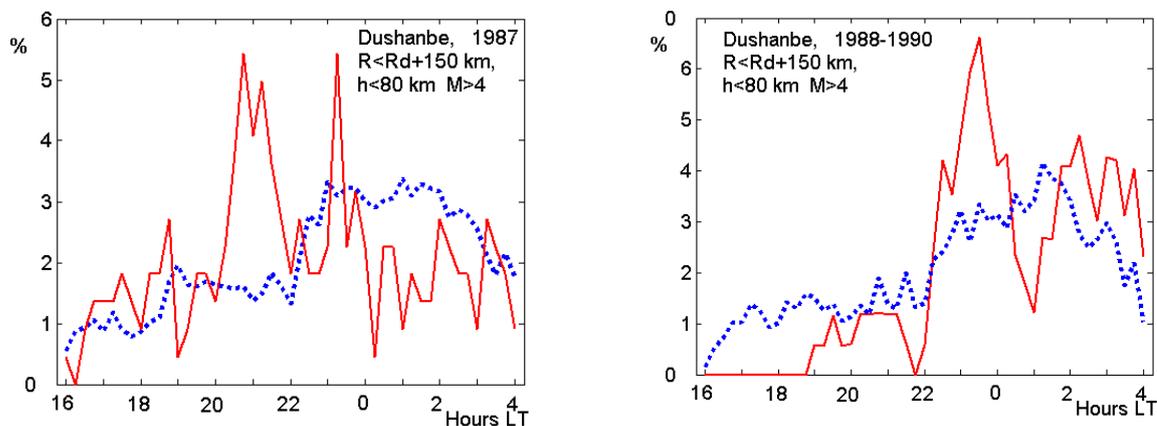


Рис. 4а,б. Суточный ход E_s -рассеяния в вечерние и ночные часы для «сейсмоактивных» и «фоновых» ночей (сплошная и пунктирная линии соответственно), полученный методом наложения эпох для интервалов времени за 1987г. и 1988-1990гг.

Далее было проведено исследование, на каких расстояниях от эпицентра и при каких глубинах очага эффект предполуночного увеличения E_s -рассеяния исчезает. Для этого было проведено наложение эпох для землетрясений с магнитудами $M>4$, на расстояниях $R<\exp(M)+150$ км от станции зондирования и эпицентрами на глубине $80<h<200$ км. Было получено, что предполуночное увеличение не наблюдается. (см. Рис.5а)

Аналогично были исследованы пространственные масштабы наблюдения эффекта предполуночного увеличения E_s -рассеяния. Было проведено наложение эпох для землетрясений с магнитудами $M>4$, на расстояниях $\exp(M)+150<R<\exp(M)+300$ км от станции зондирования и эпицентрами на глубине $h<80$ км, при этом было получено, что предполуночное увеличение также не наблюдается. (см.рис.5б)

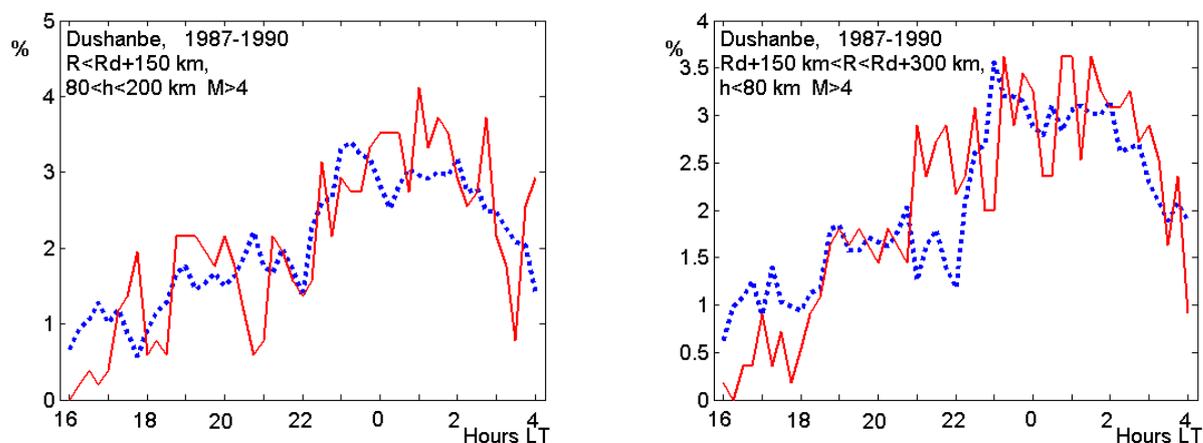


Рис.5(а,б). Суточный ход E_s -рассеяния в вечерние и ночные часы для «сейсмоактивных» и «фоновых» ночей (сплошная и пунктирная линии соответственно), полученный методом наложения эпох для землетрясений с эпицентрами на глубинах больше 80 км (рис.5а); и для землетрясений на расстояниях более $\exp(M)+150$ (рис.5б).

Обсуждение и выводы

Анализ данных, полученных на станции вертикального зондирования Душанбе, показал, что за 1-3 суток до коровых землетрясений с глубиной $h < 80$ км в предполуночные часы возрастает частота появлений *Es*-рассеяния, характеризующая увеличение турбулизации плазмы в *E*-области ионосферы. Показано, что увеличение количества случаев *Es*-рассеяния имеет место для землетрясений, для которых магнитуда землетрясения M и расстояние от эпицентра до станции вертикального зондирования R связаны соотношением $R < \exp(M) + 150$ км, при этом $M > 4$. Авторы предполагают, что этот эффект вызван усилением активности акустических импульсов с частотами меньше 0.05 Гц (с периодом от 20 с до нескольких минут), которые распространяются почти вертикально от области подготовки землетрясений до нижней ионосферы [11].

Для землетрясений с эпицентрами на больших расстояниях и для землетрясений с очагами на больших глубинах предполуночный эффект отсутствует.

Обращаясь к вопросу о возможных механизмах описанных процессов, можно предположить, что *Es*-рассеяние в значительной степени обусловлено акустическими возмущениями нейтральной атмосферы с периодом 20–100 сек, распространяющимися от Земли вверх в диапазоне прозрачности акустической атмосферы [12].

Можно отметить корреляцию увеличения вероятности наблюдения *Es*-рассеяния в связи с землетрясениями с уменьшением амплитуды ULF вариаций магнитного поля в диапазоне (0.005–0.2 Гц), наблюдавшимися на Камчатке и описанной в работах [13, 14]. Авторы этих публикаций предполагают, что пульсации магнитного поля сильнее поглощаются в турбулизованной ионосфере, и, следовательно, их амплитуда уменьшается.

Литература

1. Bowman G.G., Some aspects of middle-latitude spread Es and its relationship with spread F, Planet. Space Sci., 33 (9), 1081-1089, 1985.
2. Whitehead J.D., Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E, J. Atmos. Terr. Phys., 51 (5), 401-424, 1989.
3. Alimov O.A., Gokhberg M.B., Liperovskaya E.V., Gufeld I.L., Liperovsky V.A., Roubtsov L.N. Anomalous characteristics of the middle latitude E_s layer before earthquakes // Phys. Earth and Planet. Inter. Vol. 57. P. 76–81. 1989.
4. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
5. Liperovsky V.A., Meister C.-V., Liperovskaya E.V., Vasil'eva N.E., Alimov O., On Es-spread effects in the ionosphere before earthquakes, Natural Hazards and Earth System Sciences, 5 (1), 59-62, 2005.
6. Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.-V., Ionospheric phenomena before strong earthquakes, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1, 1-6, 2001.
7. Liperovskaya E. V., Meister C.-V., Pokhotelov O.A., Parrot M., Bogdanov V. V., and Vasil'eva N. E. On Es-spread effects in the ionosphere connected to earthquakes // Natural Hazard and Earth System Sciences, №6 P.740-744, 2006.
8. Кореньков Ю.Н. Влияние движений в нейтральной атмосфере на сезонно-суточное поведение слоя *Es* // Геоматематизм и Аэрономия. 1979. N 1. С.27-34.
9. 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, 21, 449-486, 2000.
10. Dobrovolsky I. R., Zubkov S. I., Myachkin V. I., Estimation of the size of earthquake preparation zones, Pageoph., 117, 1025-1044, 1979.
11. Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Meister C.V., Liperovskaya E.V. Physical Models of Coupling in the lithosphere-atmosphere-ionosphere system before earthquakes// Geomagnetism and Aeronomy, V.48. №6. P.795-806, 2008.
12. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: A summary // Ann. Geophys. V. 3. N 6. P. 673. 1985.
13. Molchanov, O. Schekotov, A. Fedorov, E. Belyaev, G. and Gordeev E. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka// Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 3, 203-209, 2003.
14. Molchanov O., Schekotov A., Solovieva M., Fedorov E., Gladyshev V., Gordeev E., Chebrov V., Saltykov D., Sinitsin V.I., Hattori K., Hayakawa M., Near-seismic effects in ULF fields and seismo-acoustic emission: statistics and explanation// Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 1-10, 2005.