

УКД 550.388.2

## Сильные землетрясения и их влияние на полярную нижнюю ионосферу

Н.Г. Сергеева, О.Ф. Оглоблина, С.М. Черняков

*Полярный геофизический институт КНЦ РАН*

**Аннотация.** Для выявления откликов землетрясений анализировались экспериментальные данные установок частичных отражений и вертикального зондирования ионосферы, полученные на Кольском полуострове и в Скандинавии. Были рассмотрены сильные землетрясения, которые произошли 17 июля 2006 г. в 08:19:25 UT на западном побережье Индонезии при очень спокойных условиях в геомагнитном поле и 26 декабря 2004 г. в 00:58:53 UT на о. Суматра при возмущенных гелиогеофизических условиях. Реакция ионосферы на эти землетрясения проявилась в основном в параметрах нижней ионосферы. В спектрах амплитуд обыкновенной компоненты частично-отраженных сигналов и других параметров нижней ионосферы обнаружены внутренние гравитационные волны с периодами несколько часов, связанные с землетрясениями.

**Abstract.** The experimental data obtained by a partial reflections radar and a vertical ionospheric sounder located at the Kola Peninsula (Tumanny, Russia) and the Northern Scandinavia (Sodankyla, Finland) have been analyzed with the aim to detect the ionosphere response to earthquakes. A violent earthquake with the magnitude of 7.7 on the Richter scale occurred on 17.07.2006 at 08:19:25 UT on the western shore of Indonesia under the very quiet geomagnetic field ( $\Sigma K_p=5$ ). Another earthquake with the magnitude of 9.3 occurred on 26.12.2004 at 00:58:53 UT on Sumatra. On that day the geomagnetic field was disturbed. Before the earthquake on July 17 the amplitude of the ordinary component of a partially-reflected signal at the height of 101 km sharply decreased, whereas the period of signal fluctuations increased. Periods of several hours (3 to 6 hours) are derived from the spectra of the daily amplitudes of the ordinary component of the partially-reflected signal on July 17. The amplitude of frequency fluctuations  $f_{min}$ , which occurred several hours before the beginning of the earthquake increased from 1.0 MHz to 2.2 MHz. The period of 3 to 4 hours for these fluctuations has been derived. Such a period is also found in fluctuations of two other ionospheric parameters, the critical frequency of the sporadic layer ( $f_oE_s$ ), and the  $E_s$  layer altitude ( $h-E_s$ ). On the disturbed day, 26.12.04, the amplitude fluctuations with periods of 2 to 5 hours of the signal ordinary component were revealed. From this finding we conclude that the amplitude fluctuations of the ordinary component of the partially-reflected signal and of the other parameters of the lower ionosphere having periods of several hours are produced by the internal gravity waves which are related to the earthquakes.

**Ключевые слова:** землетрясения, нижняя ионосфера, частично-отраженный сигнал, внутренние гравитационные волны  
**Key words:** earthquakes, lower ionosphere, partially-reflected signal, internal gravity waves

### 1. Введение

Исследование воздействия землетрясений на окружающую среду с целью выявления закономерностей протекания этого грозного природного явления проводится давно. В связи с проблемой прогноза землетрясений необходимо экспериментальное изучение электромагнитных полей, возбуждаемых в ионосферной плазме на различных фазах подготовки землетрясений. Исследование их интересно с научной точки зрения, но и прежде всего необходимо для нахождения предвестников землетрясений, поскольку наиболее мощные землетрясения сопровождаются природными катаклизмами: сдвигами и поднятиями поверхности земли, трещинами, а в отдельных случаях появлением цунами. Все это приводит к разрушению строений, коммуникаций, гибели людей, животных. Недавнее землетрясение в Китае 12 мая 2008 г. вызвало многочисленные разрушения, жертвами землетрясения стали более 50 тыс. человек.

Известно, что существует связь между процессами в литосфере Земли и возмущениями в ионосфере. Сейсмическая активность в земной коре сопровождается не только геодинамическими процессами, но и интенсивным гидродинамическим, электромагнитным, радиоактивным, химическим воздействием очага землетрясения на ионосферу (Сорокин, Чмырев, 2002). В результате такого воздействия за несколько дней или часов до начала землетрясения возникают многочисленные аномальные изменения параметров среды и электромагнитного поля. При этом ионосфера в большинстве случаев представляет собой "экран", на котором можно увидеть своеобразную картину развития землетрясения. Поэтому рассмотрение воздействия землетрясений на ионосферу и поиск предвестников в параметрах ионосферы ведется давно, и имеется большое количество работ, посвященных этой проблеме. Приведем лишь некоторые из них (Гохберг и др., 1984; Липеровский и др., 1992; Пулинец и др., 1998; Rishbeth, 2006a; 2006b).

Возмущения в нижней ионосфере на высотах 60-85 км, вызванные мощными удаленными землетрясениями, исследованы методом частичных отражений ВЧ-радиосигналов (Гоков и др., 2003). При этом наблюдалось усиление отраженного сигнала от крупной неоднородности, возникающей на расстоянии 11000 км от эпицентра. В нижней атмосфере наблюдались аномальные аэрозольные поля, в результате чего происходил нагрев атмосферы и резкое изменение ее параметров. Во время землетрясений может увеличиваться проводимость приземного слоя атмосферы (Мартыненко и др., 1994), что приводит к возмущениям в нижней ионосфере.

По данным регистрации вертикальной компоненты атмосферного электрического поля  $E_z$  в сейсмоактивном регионе (Камчатка) за период 1997-2002 гг. найдены аномалии  $E_z$  в суточных вариациях. Они проявляются преимущественно в бухтообразных понижениях поля за 1-24 час до землетрясения (Смирнов, 2003; Михайлов и др., 2002; 2004; Руленко, 2003). Перед землетрясением 18 сентября 1999 г. наблюдалось (Михайлов и др., 2002) расширение спектров атмосферных помех в область более коротких периодов и уменьшение  $E_z$ . Регистрируемые возмущения  $E_z$  в атмосфере могут быть интегральным эффектом потока импульсного электромагнитного излучения (ЭМИ) (Моргунов, 1998). Во время землетрясений и до его начала могут возбуждаться слабые переменные электромагнитные поля в диапазоне частот от единиц герц до десятков килогерц (Гохберг и др., 1982; 1985; Gokhberg et al., 1982; Неновски, Бойчев, 2004). Отмечена тенденция увеличения числа землетрясений после геомагнитных бурь. Обычно амплитуда вариаций магнитного поля перед землетрясением составляет 1-10 нТл. Однако, в литературе отмечен ряд наблюдений очень сильных возмущений геомагнитного поля длительностью несколько часов и даже суток (Мороз и др., 2002).

В данной работе анализировались экспериментальные данные радара частичных отражений (Туманный) и вертикального зондирования ионосферы (Соданкюля) для выявления откликов сильных землетрясений 26 декабря 2004 г. и 17 июля 2006 г. в параметрах высокоширотной ионосферы. Оба землетрясения сопровождалось разрушительными цунами.

## 2. Анализ экспериментальных данных

Сильное землетрясение с магнитудой 7.7 произошло 17 июля 2006 г. в 08:19:25 UT на западном побережье Индонезии (9.33°S, 107.26°E) на глубине 10 км при спокойных условиях в геомагнитном поле ( $\Sigma K_p=5.7$ ) (рис. 1). В результате мощного взрыва в литосфере, вызванного землетрясением, образовалась гигантская волна с высотой 5 метров и выше (цунами), которая накрыла о. Пангандаран.

Наблюдение вариаций потоков солнечного рентгеновского излучения с длиной волны 0.05-0.4 нм и 0.1-0.8 нм на геостационарном спутнике GOES-12 показало, что в рассматриваемый день 17 июля 2006 г. поток X-лучей был незначительным, кроме небольших всплесков класса А (рис. 2). Такой спокойный период с редкими всплесками А класса продолжался с 10 до 18 июля. По данным риометра на частоте 29.9 МГц, в Ивало (68.56°N, 27.29°E) наблюдалось небольшое поглощение космического радиоизлучения, меньше 0.6 дБ (рис. 3).

Рис. 1. Вариации X компоненты геомагнитного поля 17 июля 2006 г. на магнитных обсерваториях LOP – Лопарская (68.63°N, 33.25°E); IVA – Ивало (68.56°N, 27.29°E); SOD – Соданкюля (67.37°N, 26.63°E) ▼ – время начала землетрясения

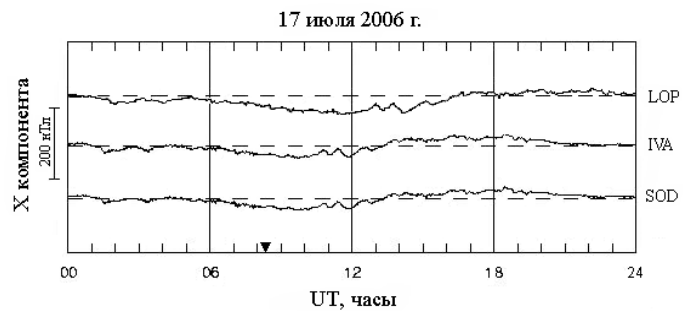


Рис. 2. Поток солнечных рентгеновских лучей 17 июля 2006 г., измеренный на спутнике GOES-12 ▼ – время начала землетрясения

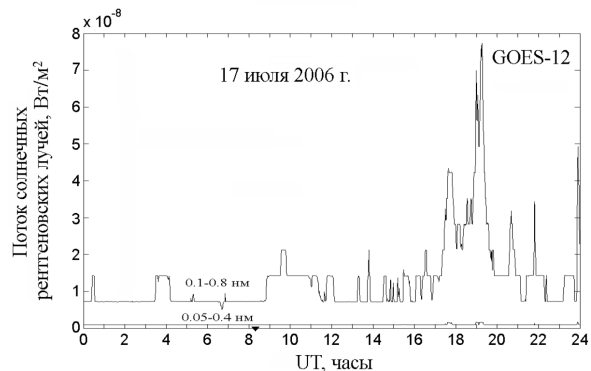


Рис. 3. Риометрическое поглощение на станции Ивало 26 декабря 2004 г.  
▼ – время начала землетрясения

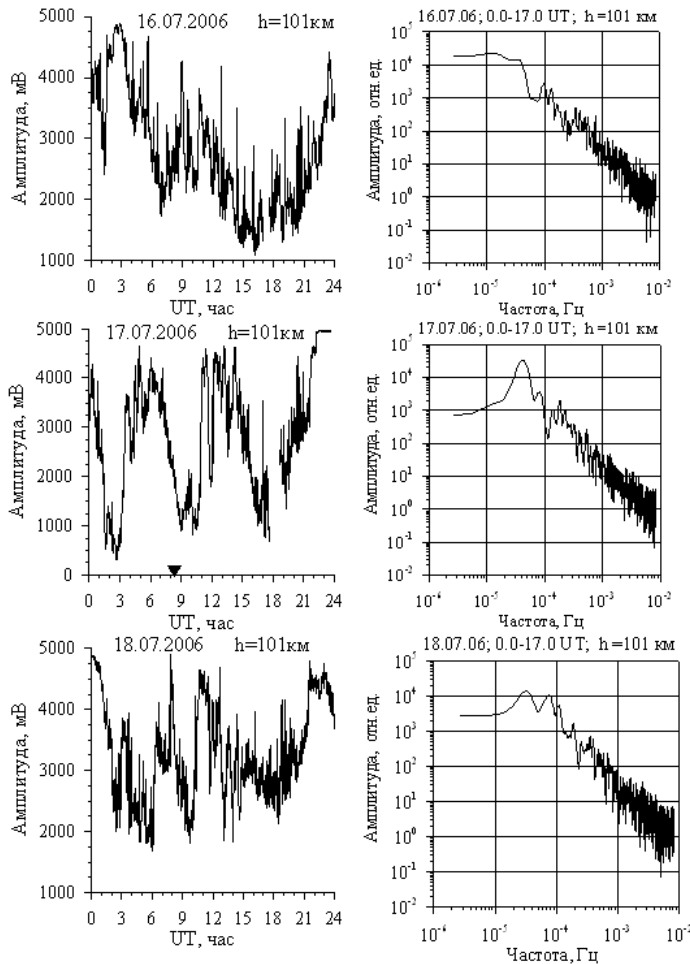
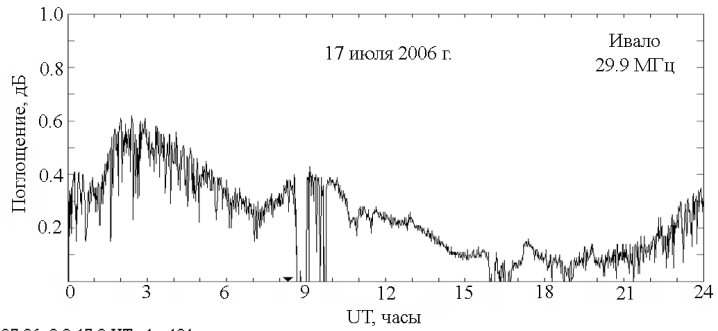


Рис. 4. Суточные вариации амплитуды обыкновенной компоненты 16-18 июля 2006 г. в Е-области на высоте 101 км (слева) и спектры амплитуд в обсерватории Туманный (справа)

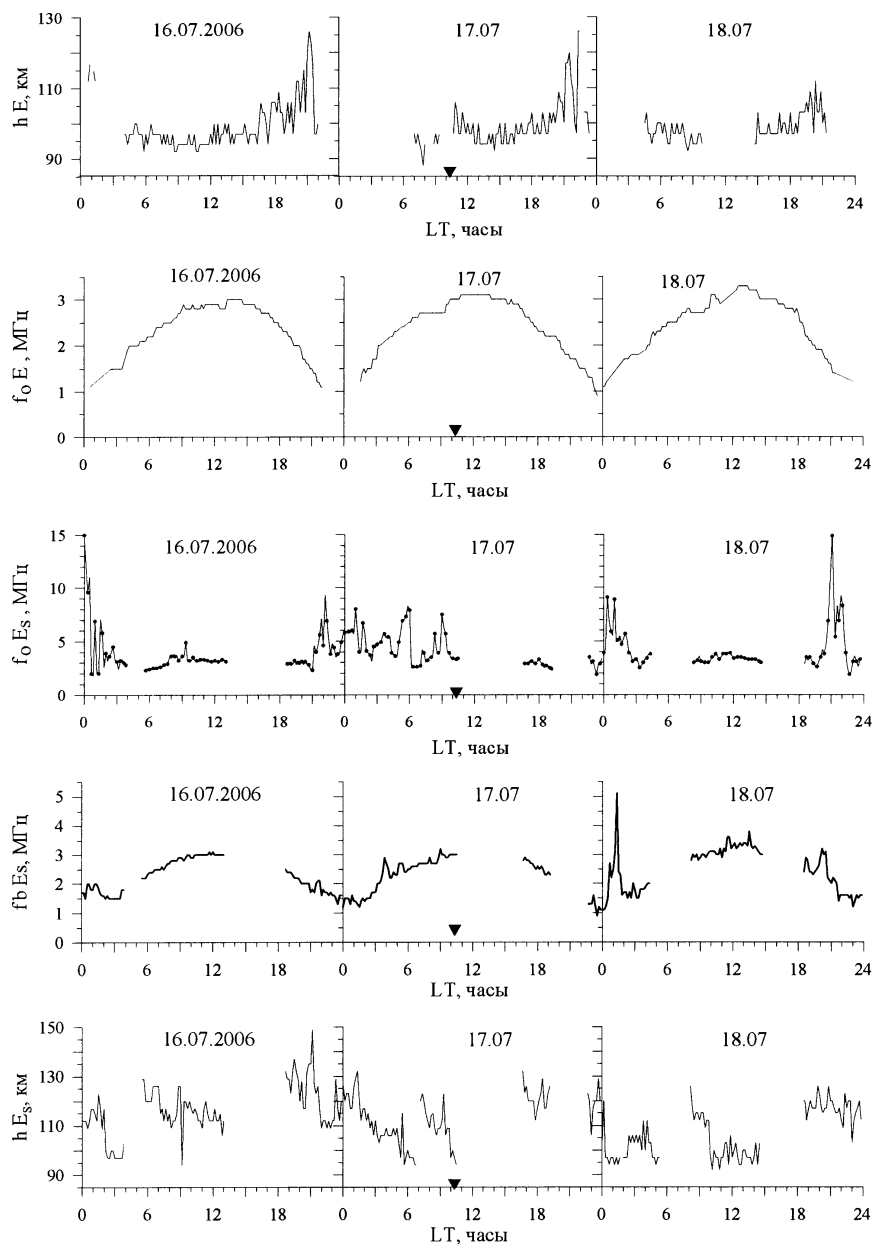
▼ – время начала землетрясения

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные методом частичных отражений в обсерватории Туманный (69.0°N, 35.7°E). На рис. 4 (слева) представлены суточные вариации амплитуды обыкновенной компоненты частично-отраженного сигнала 16-18 июля 2006 г. на высоте 101 км. Из рисунка видно, что 17 июля перед началом землетрясения (08:19:25 UT) и после наблюдаются квазисинусоидальные колебания амплитуды с периодом от 3 час. до 6 часов, при этом величина амплитуды изменяется от 300 мВ до 5000 мВ. В суточных вариациях амплитуды обыкновенной компоненты 16 и 18 июля колебаний с таким периодом нет. Суточные спектры амплитуд представлены на рис. 4 (справа). В день землетрясения 17 июля наблюдается спектр с хорошо выраженным максимумом. В последующий день после землетрясения 18 июля в спектре наблюдаются два основных максимума, примерно равных по величине. Из спектров амплитуд колебаний обыкновенной компоненты частично-отраженного сигнала были найдены соответствующие им периоды колебаний. Оказалось, что 17 июля они увеличиваются до 3-6 час по сравнению с 16 июля, когда наблюдались 2-3 часовые периоды.

В эти дни на станции вертикального зондирования в Соданкюля (67.37°N, 26.63°E) регистрировались спорадические слои ( $E_s$ ) разных типов. В утренние часы 16 и 18 июля наблюдались  $E_s$  типа ( $h, c, r, a$ ) и в вечерние часы  $E_s$  типа ( $h$  и  $a$ ). На рис. 5 приведены суточные изменения ионосферных

параметров в нижней ионосфере в E-области для 16-18 июля 2006 г. Время дано в LT, поскольку все данные ионосферной станции обсерватория представляет в этом времени (для обсерватории Соданкюля LT = UT + 2 часа). В день, когда произошло землетрясение 17 июля, в период от 2.0 LT до 10.30 LT наблюдались спорадические слои типа (*a*, *l*, *h*, *r*) и в 16.00-19.10 LT, 22.40-23.45 LT тип (*h*). Критическая частота спорадических слоев  $f_oE_s$  в утренние и вечерние часы изменялась от 15.0-8.0 МГц до 4.0 МГц. В дневные часы  $f_oE_s$  изменялась от 2.7 МГц до 3.8 МГц. Перед землетрясением 17 июля 2006 г. с 06.10 LT наблюдались изменения амплитуды критической частоты спорадического слоя типа *h* от 7.5 МГц до 3.4 МГц. Спорадический слой наблюдался до 10.40 LT. Высота спорадического слоя в период времени 6.00-7.30 LT увеличилась от 100 км до 120 км, затем высота слоя в 8.0 LT уменьшилась до 94 км и затем снова увеличилась в 9.20 LT до 123 км. В период землетрясения 10.33 LT высота спорадического слоя типа (*r*) снова уменьшилась до 94 км. Экранирующая частота  $f_bE_s$  является параметром спорадической ионизации в ионосфере и характеризует электронную плотность в нижней ионосфере. Довольно плотные спорадические слои типа *h* наблюдались в дневные часы 16 и 18 июля ( $f_bE_s = f_oE_s$ ). В ночные часы 16-18 июля и перед землетрясением 17 июля  $f_bE_s$  значительно меньше  $f_oE_s$ , т.е. изменяется плотность концентрации в спорадических слоях. Перед землетрясением наблюдаются колебания амплитуд критической частоты ( $f_oE_s$ ) и высоты ( $hE_s$ ) спорадического слоя с периодом 3-6 часов.

Рис. 5. Суточные вариации ионосферных параметров в нижней ионосфере 16-18 июля 2006 г. в обсерватории Соданкюля  
 ▼ – время начала землетрясения, LT = UT + 2 часа



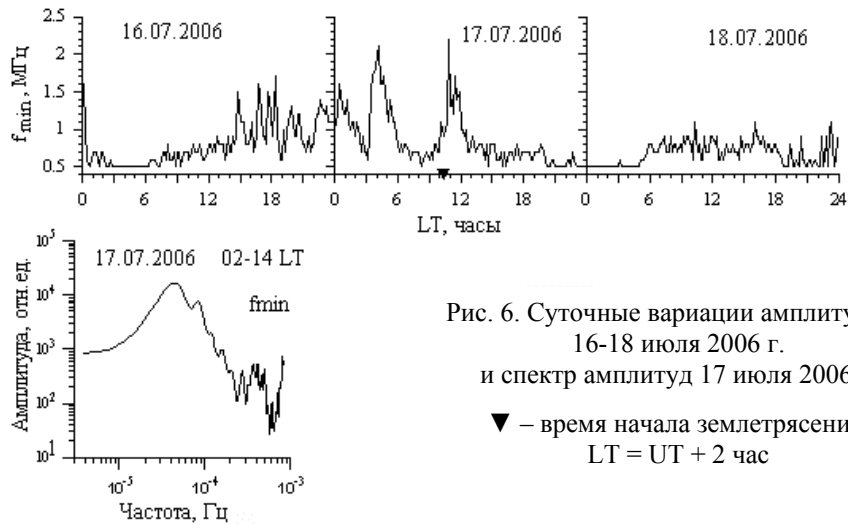
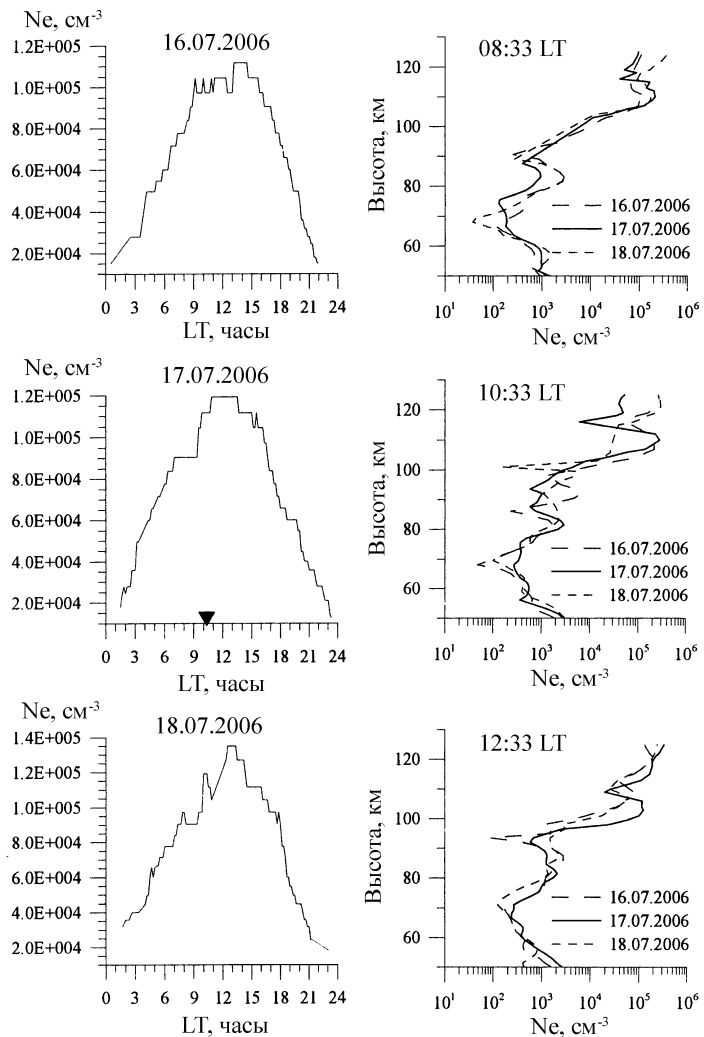


Рис. 6. Суточные вариации амплитуд  $f_{\min}$  16-18 июля 2006 г. и спектр амплитуд 17 июля 2006 г.  
 ▼ – время начала землетрясения, LT = UT + 2 час

На рис. 6 (вверху) представлены суточные изменения наименьшей частоты ( $f_{\min}$ ), при которой наблюдаются отражения от ионосферы, для 16-18 июля. На этом рисунке видны колебания за двадцать часов до начала землетрясения (16 июля 2006 с 14.00 LT). Перед землетрясением 17 июля 2006 г. амплитуда колебаний увеличилась с 1.0 МГц до 2.2 МГц. Из спектра амплитуд  $f_{\min}$  период колебаний составляет 3-6 часа (рис. 6, внизу).

Рис. 7. Электронная концентрация в E-области 16-18 июля 2006 г. в обсерватории Соданкюля (слева) и профили электронной концентрации в обсерватории Туманный (справа)

▼ – время начала землетрясения, LT = UT + 2 часа



Регулярный слой E-области наблюдался с 2.0 LT до 23.00 LT. Высота регулярного слоя в течение дня изменялась от 94 км до 106 км. После начала землетрясения в 10.50 LT высота регулярного слоя увеличилась на 9 км (с 97 до 106 км). Для расчета электронной концентрации в E-области ионосферы использовались 10-минутные значения  $f_oE$  (рис. 5). Амплитуда колебаний электронной концентрации в Туманном 17 июля 2006 г. на высоте 101 км после начала землетрясения в 11.0 LT увеличивается до  $2.2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ . Электронная концентрация в Соданкюля в момент начала землетрясения увеличивается до  $1.1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  на высоте 97 км (рис. 7, слева). Профили электронной концентрации, полученные из данных частичных отражений с усреднением 10 минут, представлены на рис. 7 (справа) для 16-18 июля в разные моменты времени. В момент землетрясения (10.33 LT) 17 июля высота максимума электронной концентрации в E-области повысилась на 1.5 километра, и затем в 12.33 LT понизилась на 5 километров и появились дополнительные максимумы.

Как отмечается в работе (Гвишвили, Мигулин, 1999), параметры регулярного ионосферного слоя  $f_oF2$  и его толщина обладают особой чувствительностью, связанной с аномальными процессами в земной коре. Перед сейсмическим толчком в суточном ходе критической частоты ( $f_oF2$ ) 17 июля 2006 г. наблюдаются изменения. Околополуночный максимум сместился на 2 часа к вечерним часам (на 16.07.2006, 23.40 LT). В суточных изменениях действующей высоты слоя F2 ( $h'F$ ) во временном интервале 3.40-4.10 LT наблюдался максимум (335 км), возможно вызванный высыпанием энергичных электронов (рис. 8).

Суточные вариации электрического поля в E-области, вычисленные по измерениям дрейфовых скоростей в обсерватории Туманный, 16 и 17 июля 2006 г. представлены на рис. 9. Для расчета напряженности магнитного поля использовались магнитные данные обсерватории Тромсе (69,6°N; 19,2°E). Амплитуда колебаний электрического поля начинает увеличиваться с 6 часов 16 июля и особенно перед началом землетрясения.

Рис. 8. Суточные вариации ионосферных параметров слоя F2

▼ – время начала землетрясения, LT = UT + 2 часа

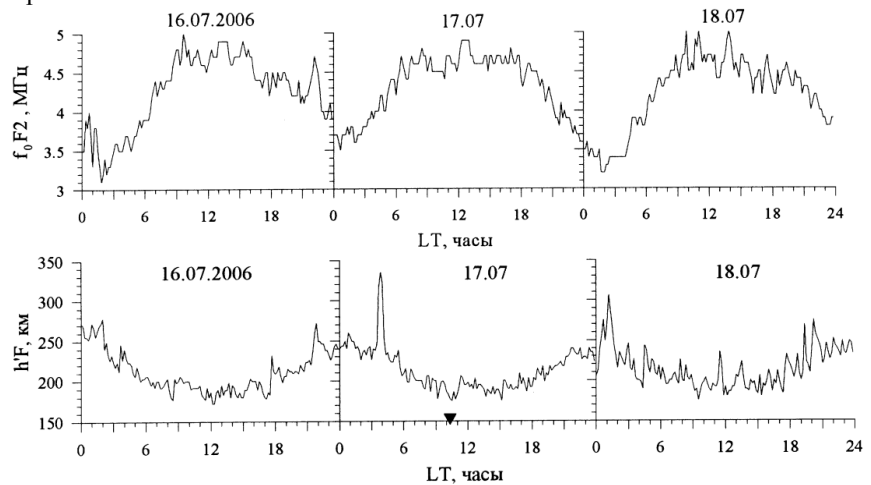
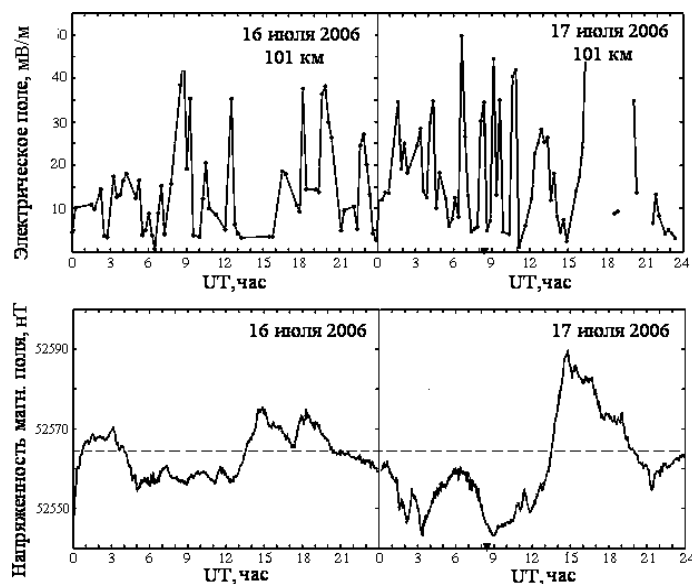


Рис. 9. Суточные вариации электрического поля в E-области 16 и 17 июля 2006 г. (вверху) и напряженности магнитного поля (внизу)

▼ – время начала землетрясения



Таким образом, реакция ионосферы на сильное землетрясение при спокойных условиях в геомагнитном поле ( $\Sigma K_p = 5.7$ ) и при небольших вспышках класса А проявилась в основном в параметрах нижней ионосферы. Колебания минимальных частот сигналов, отраженных от ионосферы, означают, что поглощение зондирующих радиоволн заметно изменяется перед началом землетрясения. В спорадическом слое ( $E_s$ ) наблюдаются колебания критической частоты и высоты с периодом 3-6 часов.

Другое сильное подводное землетрясение (Liu et al., 2006) с эпицентром в Индийском океане и с магнитудой 9.3 произошло 26 декабря 2004 г. в 00:58:53 UT у западного побережья северной части острова Суматра (3.27°N, 95.82°E) на глубине 30 км. Оно стало четвёртым по силе с 1900 г. Предыдущее сопоставимое землетрясение произошло на Аляске в марте 1964 г. (магнитуда 9.2). Землетрясение 26 декабря 2004 г. было необыкновенно большим и в географическом масштабе. В результате движения тектонических плит на глубине 30 км образовался разлом, общая длина которого достигла 1200 км, сдвиг пород вдоль разлома доходил до 15 м. Сдвиг не был единовременным, а был разделён на две фазы. На первом этапе разлом формировался со скоростью около 2.8 км/с в течение примерно 100 секунд. Затем возникла пауза примерно в 100 секунд, после чего разлом продолжил формироваться на север (Bilham, 2005; Lay et al., 2005). При движении тектонических плит морское дно поднялось на несколько метров, тем самым вызвав разрушительное цунами. Сформировавшийся разлом в 1200 км был расположен примерно в направлении север-юг, поэтому волны наибольшей силы распространялись в направлении восток-запад. Высота волн достигала 15 метров. В работе (Гульельми и др., 2006) было показано, что поверхностные волны Рэлея и Лява, возбужденные в очаге этого землетрясения, несколько раз обогнули Землю, сохраняя при этом большую амплитуду.

В обсерваториях Лопарская, Ивало и Соданкюля в период, предшествующий землетрясению, наблюдалась небольшая суббуря (25 декабря  $\Sigma K_p=21.7$ , 26 декабря  $\Sigma K_p=19.7$ ). В геомагнитном поле 25 декабря наблюдалась отрицательная бухта с максимальным значением 250 нТл около 16.0 UT. После этого началась фаза восстановления геомагнитного поля. Сразу после полуночи начало развиваться второе отрицательное возмущение, и землетрясение произошло во время этого развития (рис. 10). Весь предыдущий день (25 декабря 2004 г.) солнечная рентгеновская активность была фоновой. Наблюдения суточных вариаций потоков солнечного рентгеновского излучения с длиной волны 0.05-0.4 нм и 0.1-0.8 нм на геостационарном спутнике GOES-12 показали, что в рассматриваемый день 26 декабря 2004 г. поток солнечных рентгеновских лучей также был незначительным (рис. 11). Спутник GOES-12 зафиксировал три вспышки класса В, причем максимум первой из них пришелся на начало землетрясения. По данным риометра на частоте 29.9 МГц, в Ивало в начале суток наблюдалось незначительное поглощение космического радиоизлучения < 1.15дБ (рис. 12).

26 декабря 2004 г.

Рис. 10. Вариации X компоненты геомагнитного поля 26 декабря 2004 г. на магнитных обсерваториях Лопарская (LOP), Ивало (IVA); Соданкюля (SOD)  
▼ – время начала землетрясения

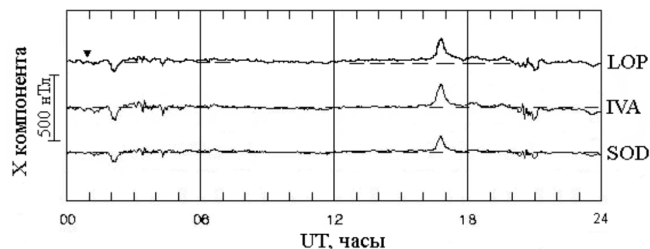


Рис. 11. Поток солнечных рентгеновских лучей 26 декабря 2004 г., измеренный на спутнике GOES-12  
▼ – время начала землетрясения

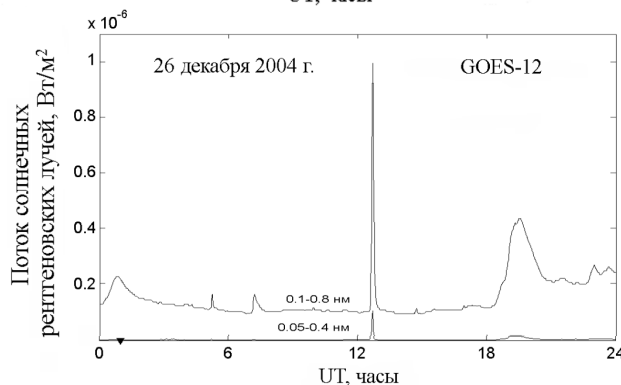
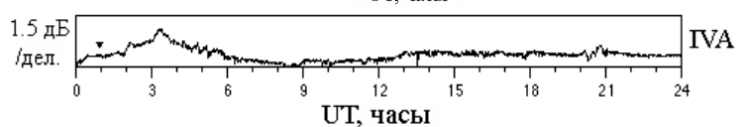


Рис. 12. Риометрическое поглощение на частоте 29.9 МГц в обсерватории Ивало (IVA) 26 декабря 2004 г.  
▼ – время начала землетрясения



На рис. 13 (слева) представлены вариации амплитуд обыкновенной компоненты частично-отраженного сигнала 26 декабря 2004 г. на высоте 101 км и спектры амплитуд. Из-за того, что в наблюдениях был технический перерыв, спектры были подсчитаны до перерыва в наблюдениях (0.0 – 12.8 UT) и после перерыва (13.4 – 24.0 UT). Амплитуда обыкновенной компоненты частично-отраженного сигнала в течение суток изменялась от 5000 мВ до 500 мВ. Расчеты спектров амплитуд обыкновенной компоненты показали, что в момент начала землетрясения и после наблюдались внутренние гравитационные волны с периодом несколько (2-5) часов.

На рис. 13 (справа) представлен фрагмент изменения амплитуды обыкновенной компоненты 26 декабря 2006 г. и часовые спектры амплитуд (0-1 UT и 1-2 UT) во время формирования разлома в северном направлении. Из часовых спектров находим, что периоды этих колебаний до начала и в момент начала землетрясения равны 10-30 минутам (за период времени с 0 до 1 UT). После начала землетрясения периоды колебаний равны 13-60 минутам (за период времени с 1 до 2 UT). Можно отметить, что в период формирования разлома амплитуда обыкновенной компоненты заметно и резко выросла. Более подробный анализ будет сделан позже с использованием данных вертикального зондирования ионосферы.

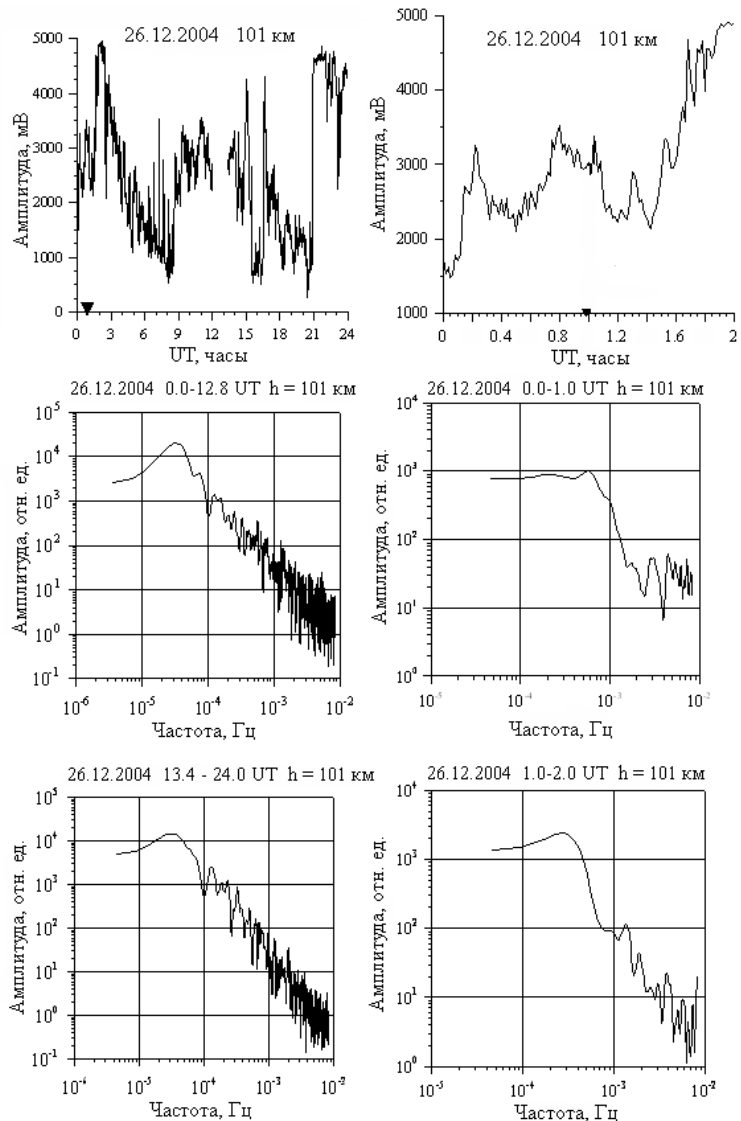


Рис. 13. Суточные вариации амплитуды обыкновенной компоненты 24 декабря 2004 г. в E-области на высоте 101 км (слева, сверху) и спектры амплитуд (слева, в середине и внизу)

▼ – время начала землетрясения

### 3. Обсуждение

При невозмущенных условиях ионизация в нижней ионосфере создается обычными источниками: прямым и рассеянным излучением Солнца в линиях  $L_\alpha$  и  $L_\beta$ , рентгеновским излучением  $\lambda = 0.05-10$  нм, галактическими космическими лучами и излучением в диапазоне 102.7-111.8 нм (Смирнова и др., 1984; 1988). Излучение в линии  $L_\alpha$  ( $\lambda = 121.57$  нм) эффективно в D-области. Это излучение может быть ответственным за образование обычной невозмущенной D-области, ионизируя окись азота. Излучение в линии  $L_\beta$  ( $\lambda = 102.6$  нм) может давать вклад в электронную концентрацию, в



основном, посредством ионизации  $O_2$ . Как уже упоминалось, рентгеновское излучение и поглощение космического радиоизлучения 17 июля 2006 г. были незначительными.

Данные монитора в Оулу (65.05°N, 25.47°E) показали, что изменения среднечасовых значений интенсивности космических лучей к месячному медианному значению составляют 1-2 % (*Geomagnetic...*, 2006).

В дневных условиях велика ионизация солнечным излучением. В сумеречные и в ночные периоды (при больших зенитных углах и при низкой ионизации рассеянным солнечным излучением) основным источником ионизации являются высыпающиеся высокоэнергичные электроны, даже при спокойных условиях. Электроны с энергией в десятки кэВ свободно проникают на высоты 60-80 км. В спокойные дни интенсивность электронов мала. В возмущенных условиях потоки электронов возрастают в десятки и сотни раз (*Данилов и др.*, 2002).

Анализ землетрясения 26 декабря 2004 г. более сложен, поскольку оно произошло во время развития отрицательной бухты в геомагнитном поле. В этом случае приходится учитывать иные возможные источники возмущений в нижней ионосфере. Как уже упоминалось, в рассматриваемый возмущенный день 26 декабря 2004 г. поток солнечных рентгеновских лучей (вспышки класса В) и поглощение космического радиоизлучения были незначительными.

*Михайлов и др.* (2003) показали, что в приземной атмосфере перед землетрясением внутренние гравитационные волны в спектрах электрического поля  $E_z$  имеют сейсмогравитационную природу. При анализе спектров атмосферных помех и спектров мощности электрического поля  $E_z$ , измеренных одновременно на Камчатке, *Михайлов и др.* (2004) нашли подобие спектров по форме в канун землетрясения. Это, по их мнению, свидетельствует о проникновении внутренних гравитационных волн до высот (~80-120 км) нижней ионосферы.

Для проверки наших результатов мы также проанализировали спектры амплитуд обыкновенной компоненты частично-отраженного сигнала при спокойных условиях в геомагнитном поле и при небольших солнечных вспышках в дни, когда не было землетрясений. В спектрах амплитуд обыкновенной компоненты в эти дни наблюдались только приливные атмосферные волны.

Таким образом, мы делаем вывод, что в дни землетрясений при спокойных условиях в геомагнитном поле и при небольших солнечных вспышках обнаруженные нами колебания амплитуды обыкновенной компоненты сигнала и других параметров нижней ионосферы с периодами несколько часов являются внутренними гравитационными волнами, которые связаны с землетрясениями.

#### 4. Выводы

1) Из приведенных экспериментальных данных, полученных методом частичных отражений в спокойный день 17 июля 2006 г., во время землетрясения и после в спектрах амплитуд обыкновенной компоненты сигнала наблюдались внутренние гравитационные волны с периодом несколько часов, которые связаны с землетрясениями.

2) Реакция высокоширотной ионосферы на сильное землетрясение при спокойных условиях в геомагнитном поле и при небольших вспышках класса А проявилась в основном в параметрах нижней ионосферы ( $f_{min}$ ,  $f_oE_s$  и  $h'E_s$ ).

3) В возмущенный день 26 декабря 2004 г. в спектрах амплитуд обыкновенной компоненты сигнала наблюдались внутренние гравитационные волны с периодами 2-5 часов во время землетрясения и после.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант N-07-05-00012).

#### Литература

- Bilham R.** A flying start, then a slow slips. *Science*, v.308, N 5725, p.1126-1127, 2005.
- Fachrizal S.P., Hermawan I.** Laporan survey gempabumidan tsunami Selatan Jawa Barat 17 July 2006. *Badan Meteorologidan Geofisika*, N 3, p.77, 2006.
- Geomagnetic, ionospheric and auroral data from Finland. *In: Monthly Bulletin. July 2006. Finnish Meteorological Institute*, 69 p., 2006.
- Gokhberg M.B., Morgunov V.A., Yoshino T., Tomisava T.** Experimental measurements of electromagnetic emissions possible related to earthquakes in Japan. *J. Geophys. Res.*, v.37, B9, p.7824-7828, 1982.
- Lay T., Kanamori H., Ammon C.J., Nettles M., Ward S.N., Aster R.C., Beck S.L., Bilek S.L., Brudzinski M.R., Butler R., DeShon H.R., Ekstrom G., Satake K., Sipkin S.** The great Sumatra-Andaman earthquake of 26 December 2004. *Science*, v.308, N 5725, p.1127-1133, 2005.
- Liu J.Y., Tsai Y.B., Chen S.W., Lee C.P., Chen Y.C., Yen H.Y., Chang W.Y.** Giant ionospheric disturbances excited by M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004. *Geophys. Res. Letters*, v.33, L02103, doi:10.1029/2005GL023963, 2006.

- Rishbeth H.** F-region links with the lower ionosphere? *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.*, v.68, p.469-478, 2006a.
- Rishbeth H.** Ionoquakes: Earthquake precursors in the ionosphere? *Eos*, v.87, N 32, p.316-317, 2006b.
- Гивишвили Г.В., Мигулин В.В.** Метод многочастотного радиопросвещения ионосферы, как средство индикации литосферно-ионосферных возмущений в реальном времени. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.39, № 5, с.95-98, 1999.
- Гоков А.М., Мартыненко С.И., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф.** Мощные удаленные землетрясения и крупномасштабные возмущения в нижней ионосфере. *Сб. науч. трудов V Российской конференции по атмосферному электричеству, Владимирский университет*, т.2, с.87, 2003.
- Гохберг М.Б., Гершензон Н.И., Гуфельд И.Л., Кустов А.В., Липеровский А.А., Хусамидинов С.С.** О возможных эффектах воздействия электрических полей сейсмического происхождения на ионосферу. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.24, № 2, с.217-222, 1984.
- Гохберг М.Б., Ешино Т., Моргунов В.А., Огава Т.** Результаты регистрации оперативного электромагнитного предвестника землетрясений в Японии. *Известия АН СССР, Физика Земли*, т.2, с.85-87, 1982.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Герашимович Е.А., Матвеев И.Л.** Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. *М., ИФЗ*, 115 с., 1985.
- Гульельми А.В., Цэгмед Б., Потапов А.С., Культима Й., Райта Т.** Сейсмомагнитные сигналы от сильного землетрясения на Суматре. *Физика Земли*, т.11, с.63-69, 2006.
- Данилов А.А., Зиграч З.К., Филиппов Л.Д.** Зависимость вариаций  $f_{min}$  на высокоширотной станции Якутского меридиана от геомагнитной активности. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 6, с.760-765, 2002.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л.** Ионосферные предвестники землетрясений. *М., Наука*, 304 с., 1992.
- Мартыненко С.И., Фукс И.М., Шубова Р.С.** Отклик нижней ионосферы на изменение проводимости приземной атмосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.34, № 2, с.121-129, 1994.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Дружин Г.И., Капустина О.В.** Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.44, № 2, с.245-253, 2004.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Бузелевич А.В., Смирнов С.Э.** Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.43, № 3, с.422-428, 2003.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дебуева А.Х., Бузелевич Г.И., Дружин Г.И., Смирнов С.Э., Фирстов П.П.** Вариации различных атмосферно-ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: Предварительные результаты. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 6, с.805-813, 2002.
- Моргунов В.А.** Электрические явления, предшествующие Шикотанскому землетрясению и его афтершокам. *Доклады АН СССР*, т.359, вып.1, с.102-105, 1998.
- Мороз Ю.Д., Вершинин Е.Ф., Назарец Е.П., Мороз Т.А.** Аномальные эффекты в вариациях геомагнитного поля на Камчатке. *Вулканология и сейсмология*, № 5, с.32-37, 2002.
- Неновски И., Бойчев Б.** Механизмы возникновения сейсмоэлектрических сигналов в земной коре. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.44, № 4, с.545-553, 2004.
- Пулинец С.А., Легонька А.Д., Зеленова Т.И.** Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.38, № 3, с.188-193, 1998.
- Руленко О.П.** Тензочувствительность предсейсмических отрицательных аномалий электрического поля в приземном воздухе. *Сб. науч. трудов V Российской конференции по атмосферному электричеству, Владимирский университет*, т.2, с.82, 2003.
- Смирнов С.Э.** Аномалии поведения напряженности электрического поля перед землетрясением по наблюдениям магнитной обсерватории Паратунка за 1997-2002. *Сб. науч. трудов V Российской конференции по атмосферному электричеству, Владимирский университет*, т.2, с.87, 2003.
- Смирнова Н.В., Оглоблина О.Ф., Власков В.А.** Модели электронной концентрации в D-области ионосферы. *Препринт ПГИ-84-08-36, Апатиты, изд. Кольского филиала АН СССР*, 31 с., 1984.
- Смирнова Н.В., Сагидуллин Ф.С., Мизун Ю.Г., Васильев Е.Б., Прохоров В.И., Каташов Н.А., Ярутов В.В.** Каталог профилей электронной концентрации в высокоширотной ионосфере, полученных методом частичных отражений, сравнение с результатами теоретической модели D-области ионосферы. *Препринт ПГИ-88-02-62, Апатиты, изд. Кольского филиала АН СССР*, 30 с., 1988.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М.** Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 6, с.821-830, 2002.