

УДК 550.388.2 + 551.594

**ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
В АТМОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ ПЕРЕД КУЛТУКСКИМ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 27 АВГУСТА 2008 ГОДА**

Д. В. Давиденко¹, С. А. Пулинец^{1,2}, Д. Узунов³

¹ Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова
129128 Москва, Ростокинская ул., 9

² Институт космических исследований РАН
117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

³ Department of Physics, Chapman University,
Orange, CA 92866, USA
E-mail: davidenkoe5@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.09.2012
Поступила после доработки 11.11.2012

Введение

Согласно теории Рейда (Reid, 1910), процесс подготовки землетрясений начинается в результате активизации тектонических разломов: медленные деформации земной коры, вызванные относительным движением отдельных блоков, приводят к нарастанию напряжений в коре. Нарастание напряжений в земной коре является очень важным, но не единственным условием подготовки землетрясений. Другим условием является уменьшение прочности, вызванное различными физическими и химическими процессами, происходящими в земной коре. В частности, установлено, что миграция газов (двуокись углерода, метан, гелий, водород) в земной коре приводит к изменению ее механических свойств (Khilyuk et al., 2000; Гуфельд, 2010).

Одновременно с этими газами на поверхность выносятся радон — инертный радиоактивный газ. До настоящего времени не существует однозначного мнения о путях миграции радона. Шулейкин (2010) считает, что 80—90 % радона переносится водоро-

дом, в то время как в работе Khilyuk et al. (2000) утверждается, что основным его переносчиком является углекислый газ. Существует большое число публикаций, свидетельствующих о значительном увеличении потока радона из земной коры на финальной стадии процесса подготовки землетрясения (Yasuoka, 2010). Вынос на поверхность радиоактивного радона приводит к активизации процессов в атмосфере, ответственных за появление краткосрочных предвестников.

Многолетние исследования процессов, происходящих в атмосфере и ионосфере в период подготовки сильных землетрясений, позволили разработать модель физико-химических связей в системе литосфера—атмосфера—ионосфера (Пулинец, Узунов, 2010; Pulinets, Ouzounov, 2011).

Основной целью данной работы является проверка работоспособности различных методов обработки ионосферных данных для обнаружения краткосрочных предвестников землетрясения, а также проверка на конкретном примере модели физико-химических связей в системе литосфера—атмосфера—ионосфера.

Зона подготовки землетрясения

Концепция зоны подготовки землетрясения была разработана многими авторами (Dobrovolsky et al., 1979; Добровольский, 2009; Keilis-Borok, Kossobokov, 1990; Bowman et al., 1998).

Зона подготовки землетрясения представляет собой область, где наблюдаются местные деформации, связанные с источником готовящегося землетрясения. Под деформациями подразумевается изменение в свойствах земной коры, которые могут быть обнаружены различными методами. Согласно дилатантно-диффузионной теории (Scholz et al., 1973; Мячкин, 1978), перед землетрясением в пределах зоны подготовки будут изменяться скорость сейсмических волн, электросопротивление земной коры и уровень грунтовых вод, а также будут проявляться геохимические предвестники (эманация радона и др.). Данные об изменениях указанных параметров создают физическую основу для

предсказания будущего землетрясения (Rikitake, 1976; Моги, 1988; Соболев, 1993).

Для определения размера зоны подготовки землетрясения используют как сейсмические предвестники, например появление форшоков и распространение деформаций, так и весь комплекс геофизических параметров, измеряемых в зоне подготовки.

Для определения радиуса зоны подготовки землетрясения в работах Dobrovolsky et al. (1979) и Bowman et al. (1998) было получено выражение

$$\rho = 10^{\gamma M}, \quad (1)$$

где ρ — радиус зоны подготовки землетрясения (км); M — магнитуда готовящегося землетрясения; γ — коэффициент, который составляет 0,43 по данным Dobrovolsky et al. (1979) и 0,44 по данным Bowman et al. (1998).

Рассмотрим хронологию сейсмических событий, произошедших за период с 1 июля по 31 августа 2008 г. рядом с озером Байкал. Список землетрясений представлен в табл. 1. Символами H и D в таблице обозначены соответственно глубина гипоцентра землетрясения и расстояние от эпицентра землетрясения с $M = 6,3$ до эпицентров землетрясений в окрестности 1000 км за вышеуказанный период.

По данным United States Geological Survey's National Earthquake Information Center (USGS NEIC), <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>, землетрясение с магнитудой $M = 6,3$ произошло 27 августа 2008 г. в 01:35 UT, координаты эпицентра землетрясения $51,61^\circ$ с. ш., $104,16^\circ$ в. д. Этому землетрясению предшествовало менее сильное землетрясение с магнитудой $M = 5,7$ (см. табл. 1), состоявшееся 16 августа 2008 г. в 04:01 UT, эпицентр которого был расположен на расстоянии 415 км от эпицентра землетрясения $M = 6,3$ в точке с координатами $52,27^\circ$ с. ш., $98,21^\circ$ в. д.

Радиус зоны подготовки землетрясения, согласно работам Dobrovolsky et al. (1979) и Bowman et al. (1998), при $M = 5,7$ может составлять от 282,5 до 322,1 км, а при $M = 6,3$ — от 511,7 до 591,6 км.

Таблица 1

Список землетрясений за период с 1 июля по 31 августа 2008 г.
в радиусе 1000 км от эпицентра землетрясения с магнитудой $M = 6,3$

Дата	Время, УТ	φ° с. ш.	λ° в. д.	H км	M	D км
28.07	00:01	50,53	91,19	35	3.9	916
28.07	05:49	55,72	110,04	10	3.5	600
09.08	19:44	53,21	108,21	10	3.8	327
16.08	04:01	52,27	98,21	12	5.7	415
16.08	04:06	52,24	98,29	10	5.0	410
16.08	14:29	52,18	98,19	10	3.7	415
16.08	17:58	51,95	98,45	10	4.3	396
26.08	09:00	51,51	98,13	10	3.9	418
27.08	01:35	51,61	104,16	16	6.3	0
27.08	01:41	51,60	103,91	10	4.9	17
27.08	02:07	51,60	103,94	10	4.3	15
30.08	13:53	51,66	104,09	13	4.1	6

Регистрация локальных аномалий уходящего инфракрасного излучения

Согласно последней версии модели физико-химических связей в системе литосфера—атмосфера—ионосфера (Пулинец, Узун, 2010; Pulinets, Ouzounov, 2011), для надежного прогноза землетрясений необходимо проследить развитие процесса подготовки землетрясения от поверхности Земли до ионосферы и магнитосферы, включая такие характеристики, как приземная температура воздуха (в случае использования данных спутниковых измерений — на уровне 1000 гПа), вертикальный профиль температуры и влажности воздуха, линейные облачные аномалии, потоки скрытой теплоты испарения, аномалии струйных течений на высоте 9—12 км, потоки уходящего длинноволнового (инфракрасного) излучения (Outgoing Longwave Radiation, OLR) на высоте верхней границы облаков (9—12 км), концентрация электронов в ионосфере (включая ее вертикальные профили), локальные параметры ионосферной плазмы (концентрация, температу-

ра электронов и ионов), ионный состав, крайне и очень низкочастотные (КНЧ и ОНЧ) излучения, квазипостоянные электромагнитные поля, потоки частиц и их энергетические спектры.

Именно повышение температуры поверхности Земли и температуры воздуха вблизи поверхности Земли, выраженное в увеличение потока инфракрасного излучения над активными тектоническими разломами — один из признаков готовящегося землетрясения. Для спутникового мониторинга тепловых аномалий перед землетрясениями используется окно прозрачности атмосферы в диапазоне 8—14 мкм. Как показали многолетние наблюдения, одним из наиболее информативных параметров является поток уходящего длинноволнового излучения на уровне верхней границы облаков.

Наиболее длинные временные ряды (более 20 лет), позволяющие выделить аномалии на фоне климатических изменений, получены с помощью сканирующих инфракрасных радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), установленных на низкоорбитальных (высота орбиты около 800 км) метеорологических спутниках дистанционного зондирования серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA). Для обработки информации, получаемой со спутников NOAA/AVHRR, используется специальный алгоритм, предложенный в работе Gruber, Krueger (1984). В результате обработки первичных данных при помощи этого алгоритма получают снимки с пространственным разрешением $2,5 \times 2,5^\circ$, содержащие информацию о потоке инфракрасного излучения. Именно эти снимки в дальнейшем используются для выявления аномалий OLR над сейсмоактивными регионами.

Для определения степени интенсивности аномалий OLR в работе Ouzounov et al. (2007) предложен статистически значимый параметр, рассчитываемый для определенного момента времени и места в пространстве, — *E*-индекс. Координаты эпицентра будущего землетрясения в большинстве случаев практически совпадают с проекцией аномалии OLR на поверхность Земли: отклонение координат проекции аномалии от координат эпицентра будущего землетрясения находится в пределах погрешности разрешения сканирующих радиометров ($\pm 2,5^\circ$).

Результаты обработки данных позволили зарегистрировать аномалии OLR и определить с достаточно высокой точностью положение эпицентров землетрясений $M = 5,7$ и $M = 6,3$. На рис. 1 а показана первая аномалия OLR, зарегистрированная 4 августа 2008 г. Проекция тепловой аномалии расположена между эпицентрами землетрясений $M = 5,7$ и $M = 6,3$ и при этом смещена к эпицентру землетрясения $M = 6,3$. Вторая аномалия OLR зарегистрирована 18 августа 2008 г. В этом случае (рис. 1 б) проекция тепловой аномалии также находится в непосредственной близости от эпицентра землетрясения $M = 6,3$.

Регистрация аномальных возмущений в ионосфере

Для анализа ионосферной обстановки использовались данные двух приемников, принимающих сигналы спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС: приемника GPS NVSK (Новосибирск) с координатами ($54,8406^\circ$ с. ш., $83,2355^\circ$ в. д.) и приемника GPS/ГЛОНАСС IRKJ (Иркутск) с координатами ($52,2190^\circ$ с. ш., $104,3162^\circ$ в. д.). Стоит отметить, что расстояние от приемника NVSK до эпицентра землетрясения $M = 6,3$ составляет 1437 км, и, таким образом, данный приемник находится вне зоны подготовки землетрясения и может использоваться в качестве контрольного приемника. В свою очередь, приемник IRKJ находится на расстоянии 68 км от эпицентра землетрясения, т. е. в пределах зоны подготовки землетрясения.

Расстояние от приемника NVSK до эпицентра землетрясения $M = 5,7$ составляет 1030 км, и, следовательно, приемник находится вне зоны подготовки землетрясения и может использоваться в качестве контрольного приемника. При этом приемник IRKJ находится на расстоянии 417 км от эпицентра в непосредственной близости (менее 100 км) к зоне подготовки землетрясения. Кроме того, следует учесть, что размер зоны подготовки землетрясения пока не поддается точному расчету в связи с тем, что геологические особенности каждого сейсмоактивного региона Земли различны и еще полностью не изучены.

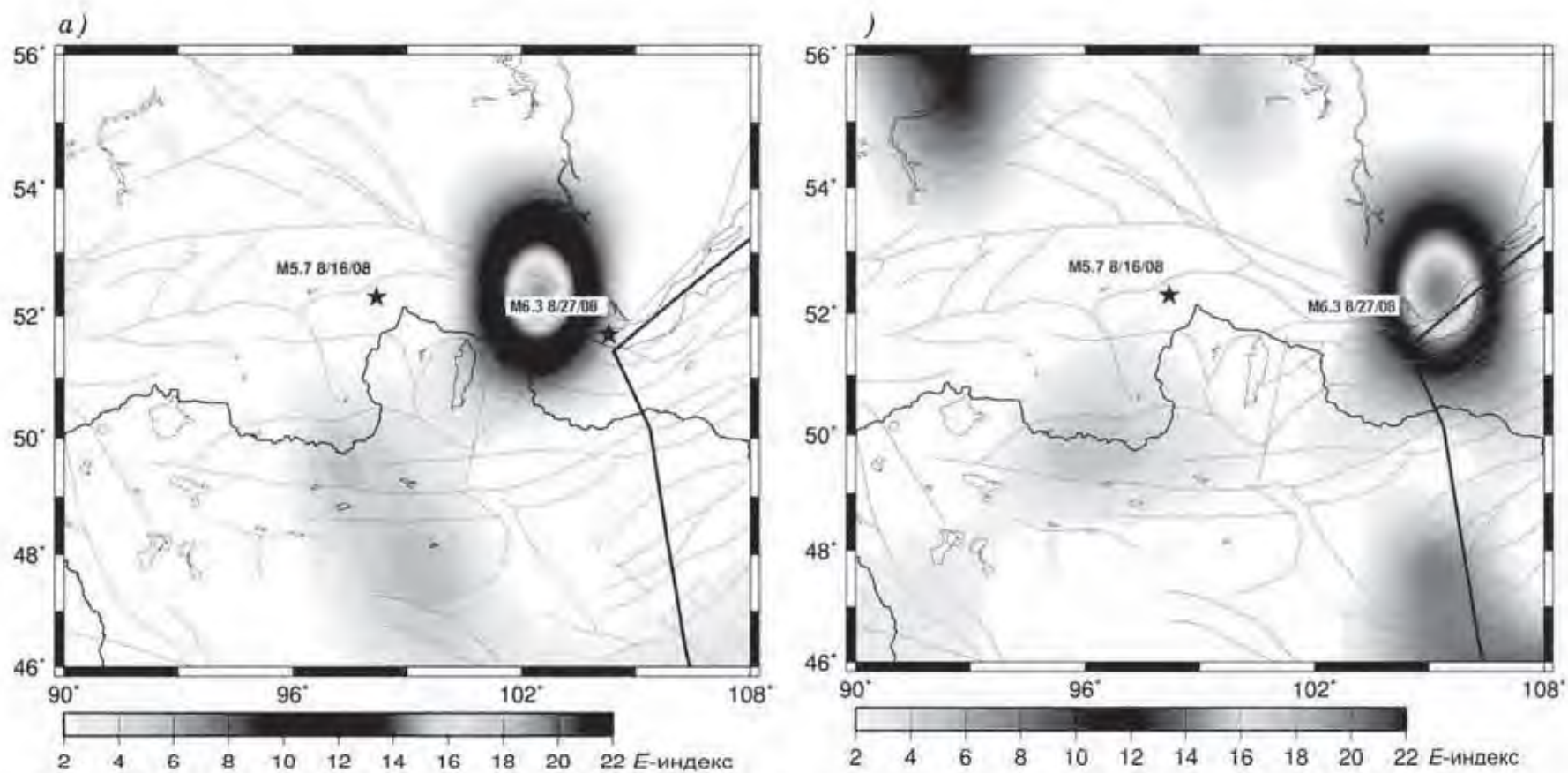


Рис. 1. Регистрация аномалии OLR 4 августа 2008 г., в 217-й день года (а) и 18 августа 2008 г., в 231-й день года (б).

Положение эпицентров землетрясений отмечено звездочкой.

Данные этих приемников находятся в свободном доступе и размещаются на сайте <ftp://garner.ucsd.edu/archive/garner/> в формате RINEX. С целью обнаружения аномальных возмущений в период подготовки землетрясения $M = 6,3$ и предшествующего ему землетрясения $M = 5,7$ произведен расчет полного электронного содержания (ПЭС) с двухминутным разрешением для каждого из указанных приемников.

Для дальнейшего анализа произведена обработка значений ПЭС по методике, описанной в работе Pulinetz et al. (2004). Данная методика основана на корреляционном анализе суточных значений ПЭС (или критической частоты $foF2$) между парой соседних приемников GPS—ГЛОНАСС (или наземных станций вертикального радиозондирования ионосферы). Коэффициент кросс-корреляции определяется следующим образом:

$$C = \frac{\sum_{i=0,k} (\text{TEC}_{1,i} - a\text{TEC}_1)(\text{TEC}_{2,i} - a\text{TEC}_2)}{k(\sigma_1\sigma_2)}, \quad (2)$$

где

$$a\text{TEC} = \frac{\sum_{i=0,k} \text{TEC}_i}{k+1},$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0,k} (\text{TEC}_i - a\text{TEC})^2}{k},$$

C — коэффициент кросс-корреляции между суточными значениями ПЭС двух приемников, один из которых расположен в зоне подготовки землетрясения (в данном случае приемник IRKJ), а другой находится за ее пределами (приемник NVSK—«контрольный» приемник);

$\text{TEC}_{1,i}$ и $\text{TEC}_{2,i}$ — значения ПЭС для i -го момента времени для приемников 1 и 2 ($\text{TEC}_{\text{U}} = 10^{16}$ эл./м²);

$a\text{TEC}$ — среднее значение ПЭС в течение суток;

σ — стандартное отклонение;

k — временной интервал.

Коэффициент кросскорреляции между суточными значениями ПЭС приемников IRKJ и NVSK рассчитывался по УТ.

Нами был выбран интервал с 201-го по 244-й день 2008 г., т.е. обрабатывались данные с 19 июля по 31 августа включительно.

Этот интервал соответствовал спокойной геомагнитной обстановке (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>; <http://isgi.latmos.ipsl.fr/lesdonne.htm>) за исключением следующих дней: с 204-го по 206-й (22—24 июля), с 222-го по 223-й (9—10 августа) и с 230-го по 232-й (17—19 августа), в которые наблюдалась слабая геомагнитная буря (рис 2).

На рис. 2 приведено изменение потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см $F_{10.7}$ (1 с.е.п. = 10^{-22} Вт/(м² · Гц)) в рассматриваемый период. Из рис. 2 видно, что вариации потока солнечного излучения не превышали 3 с.е.п. на всем временном интервале — солнечная активность была очень слабой (<http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html>).

Результат расчета коэффициента кросскорреляции представлен на рис. 3. Из рисунка видно, что значительное уменьшение коэффициента кросскорреляции в 218-й день (5 августа) — это минимальное значение на всем рассматриваемом интервале. Это уменьшение не является результатом воздействия сверху (см. рис. 2), поэтому можно предположить, что оно является результатом процесса активизации сейсмической активности и может быть индикатором подготовки сильного землетрясения, эпицентр которого локализован на «трассе» Новосибирск—Иркутск. Отметим, что уменьшение коэффициента кросскорреляции свидетельствует об увеличении ионосферной изменчивости, а, как известно, сейсмическая активность, является одним из основных ее источников (Пулинец и др., 1998). Также стоит обратить внимание на то, что уменьшение коэффициента кросскорреляции произошло всего спустя сутки после регистрации метеорологическими спутниками тепловой аномалии OLR в атмосфере на высоте 9—12 км.

Для дальнейшего анализа ионосферной обстановки использовались данные с 15-минутным разрешением наземной станции вертикального радиозондирования ионосферы—ионозонда DPS-4, расположенного в Иркутске. Прежде всего, рассматривалось поведение

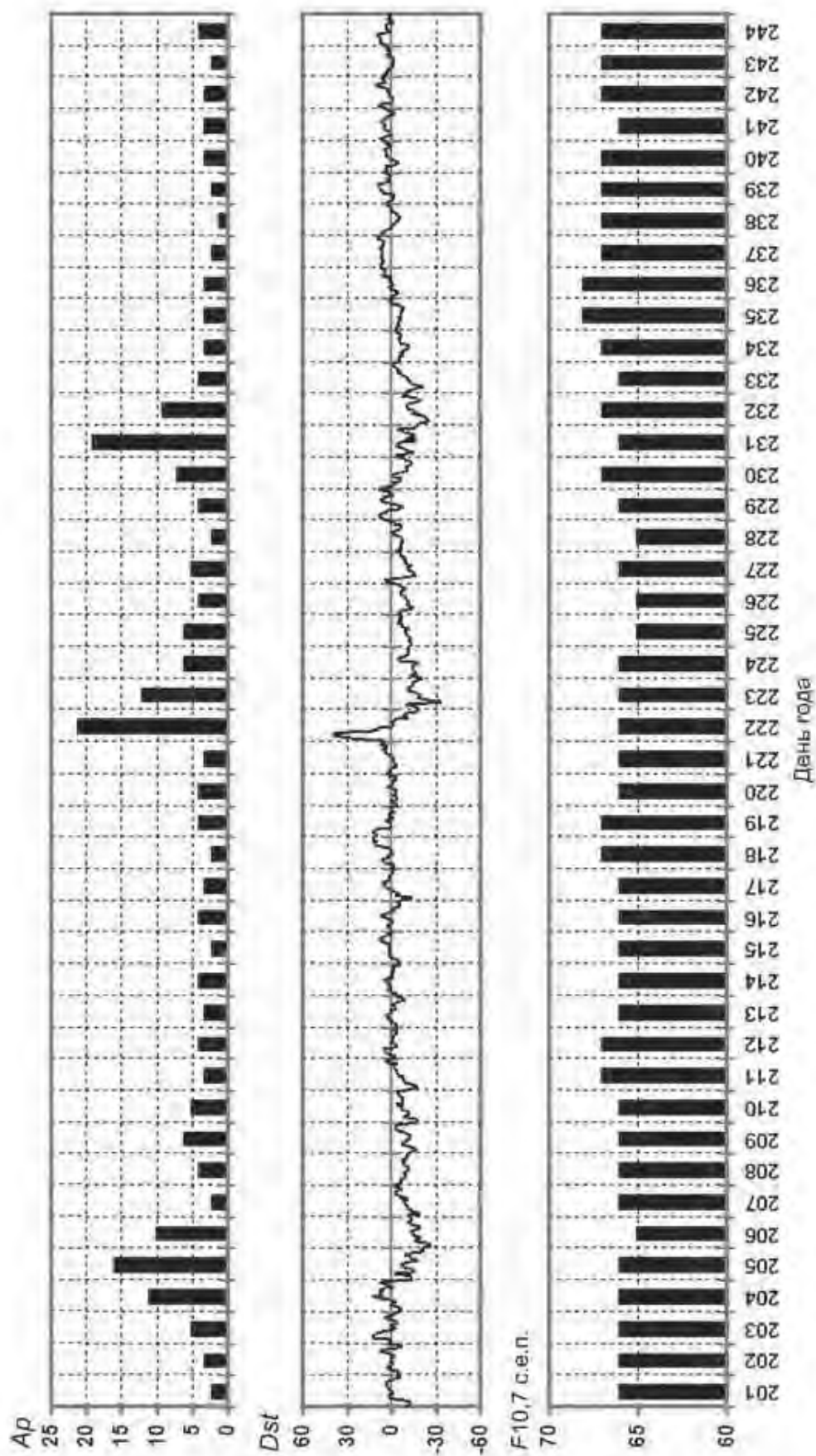


Рис. 2. Гелиогеомагнитная обстановка: геомагнитные индексы *Ap* и *Dst*, поток солнечного радиовлучения *F10,7*.

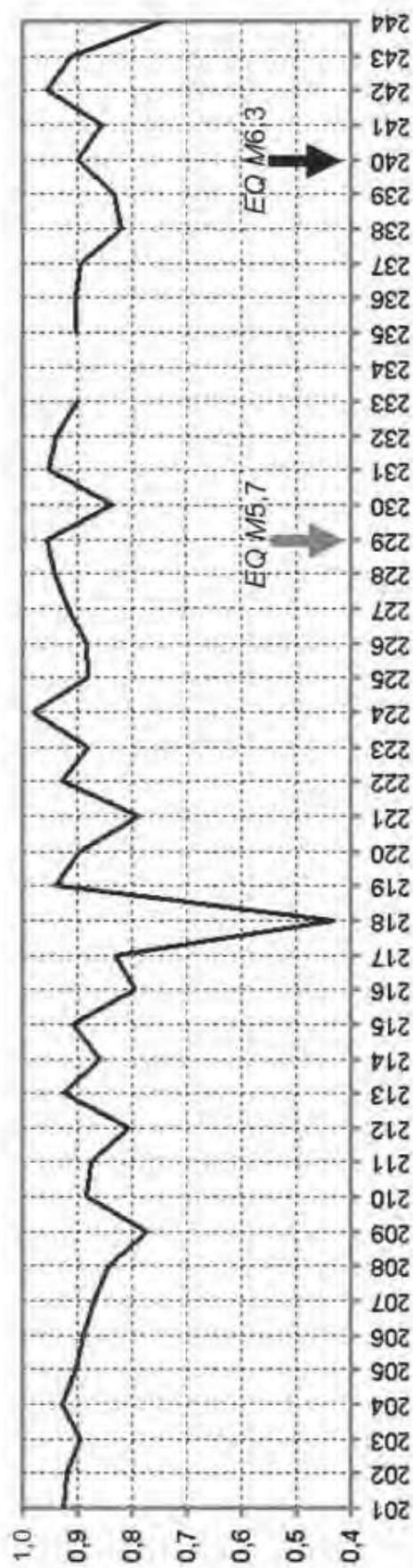


Рис. 3. Коэффициент кросскорреляции между суточными значениями ПЭС, зарегистрированными приемниками ИРКJ (Иркутск) и NVSK (Новосибирск).

критической частоты $F2$ -слоя $foF2$, так как она непосредственно связана с концентрацией электронов на высоте главного максимума ионосферы.

Для того чтобы выделить аномальные возмущения концентрации электронов на высоте главного максимума ионосферы, проводилась обработка значений критической частоты по следующим методикам:

– проводилась нормализация параметра $foF2$ по следующей формуле:

$$foF2^*[\sigma] = (foF2 - foF2_{cp}) / \sigma, \quad (3)$$

где $foF2$ — значение критической частоты в текущий момент времени (МГц); $foF2_{cp}$ — скользящее среднее значение критической частоты, рассчитанное по 15 предшествующим значениям для того же момента времени, или фоновое значение; σ — скользящее стандартное отклонение критической частоты, рассчитанное по 15 предшествующим значениям критической частоты для того же момента времени; $foF2^*[\sigma]$ — нормализованное значение критической частоты;

– оценивалось отклонение текущего значения критической частоты от скользящего фонового значения по формуле

$$dfoF2 = 100(foF2 - foF2_{cp}) / foF2_{cp}, \quad (4)$$

где $dfoF2$ — изменение (%) текущего значения критической частоты в определенный момент времени по отношению к скользящему фоновому значению, рассчитанному по 15 предшествующим числовым значениям критической частоты для того же момента времени.

На рис. 4 можно увидеть существенное увеличение значения критической частоты в 218-й день (5 августа 2008 г.). Продолжительный рост значения критической частоты, превышающий отсечку шума 2σ (более 20 %), зарегистрирован спустя сутки после обнаружения аномалии OLR. Аналогичное увеличение отмечено в ПЭС на приемнике IRKJ. При этом мы не наблюдаем такого же роста ПЭС на приемнике NVSK, что свидетельствует о локальном характере наблюдаемого увеличения электронной концентрации.

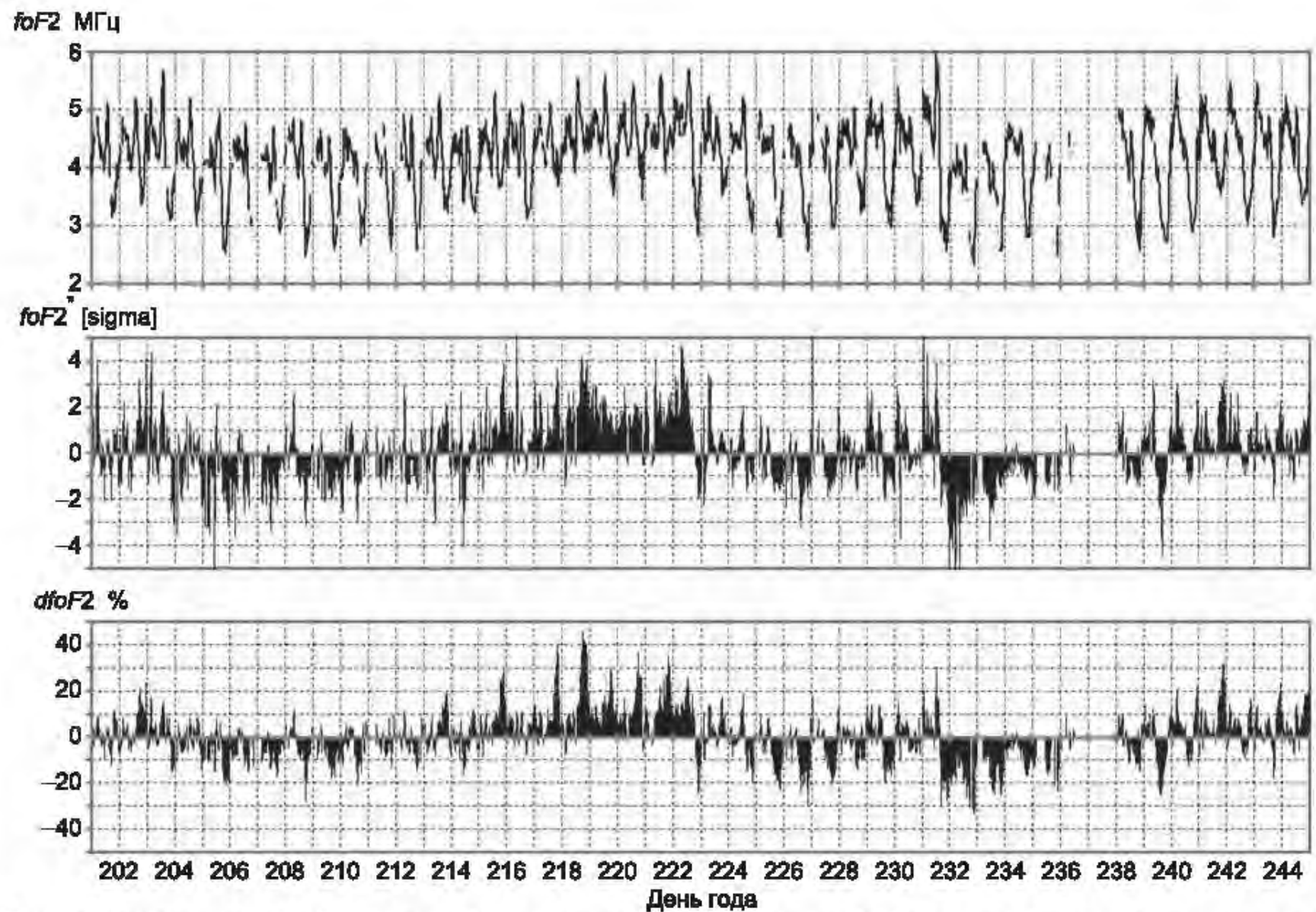


Рис. 4. Результаты обработки данных ионозонда, расположенного в Иркутске: вариации критической частоты слоя $F2$ ($foF2$).

Если рассмотреть более внимательно вариации значений критической частоты, то можно заметить, что существует большое число временных промежутков, когда значения критической частоты отсутствуют, т. е. ионозонд не может зарегистрировать критическую частоту на высоте главного максимума ионосферы (исключение составляет 237-й день (24 августа 2008 г.), когда ионозонд не работал). Особенно отчетливо это начинает проявляться с 225-го дня (12 августа 2008 г.). Тогда, чем можно объяснить отсутствие значений критической частоты главного максимума ионосферы? Существует, по-видимому, единственный ответ на этот вопрос: ниже слоя $F2$ расположен слой, экранирующий слой $F2$, т. е. слой, в котором значения концентрации электронов значительно превышают ее значения на высоте главного максимума ионосферы. Единственный слой, обладающий такой способностью, — спорадический слой Es .

Проверим, так ли обстояло дело в действительности. На рис. 5 представлена диаграмма, содержащая значения критической частоты $foF2$ и предельной частоты $foEs$. Теперь становится очевидным, почему ионозонд не регистрирует значения критической частоты в определенные моменты времени: слой $F2$ экранируется спорадическим слоем Es .

На рис. 6 представлена диаграмма, содержащая осредненные за сутки значения предельной частоты спорадического слоя. Отмечается ее значительное увеличение за несколько суток до землетрясений $M = 5,7$ и $M = 6,3$ (моменты землетрясений на рисунке отмечены стрелками). Что же касается дня землетрясения и последующих за ним дней, в особенности в случае землетрясения $M = 6,3$, то такой тенденции не наблюдается.

Известно, что спорадические слои представляют собой специфические образования плазмы, содержащие ионы металлов, и имеют малые вертикальные и большие горизонтальные размеры. Для образования спорадических слоев значение коэффициента рекомбинации должно быть меньше 10^{-2} м³/с. Типичные для ионосферы ионы O_2^+ и NO^+ не способны образовывать такие слои. Спорадические слои образуются «долгоживущими» ионами металлов Mg^+ , Al^+ , Fe^+ , Mn^+ (Liperovsky et al., 2000).

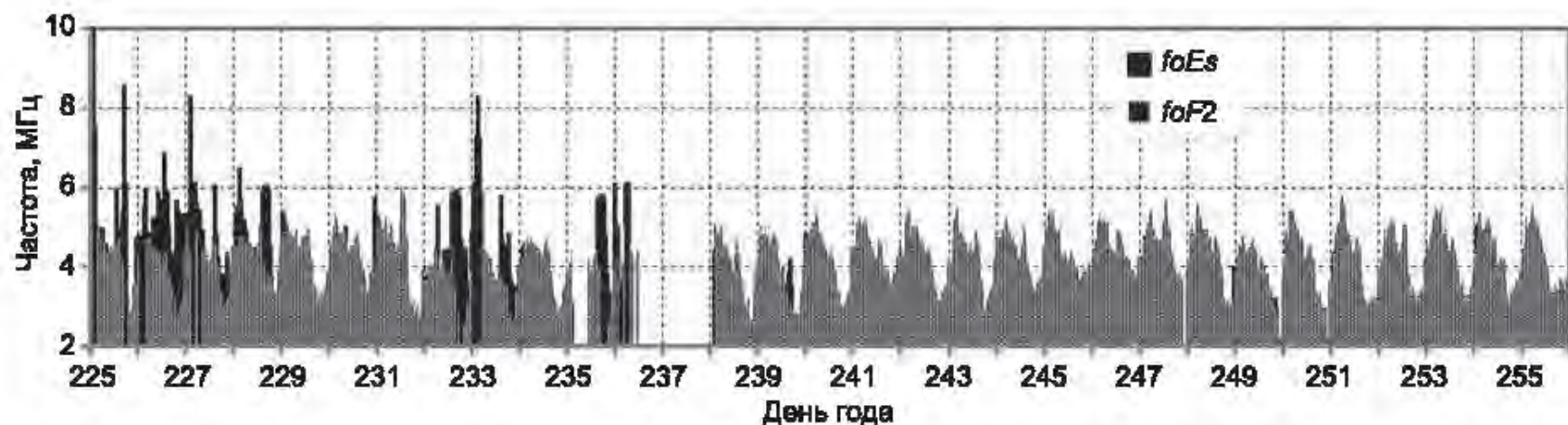


Рис. 5. Результаты обработки данных ионозонда, расположенного в Иркутске: вариации критической частоты слоя $F2$ ($foF2$) и предельной частоты слоя E_s ($foEs$).

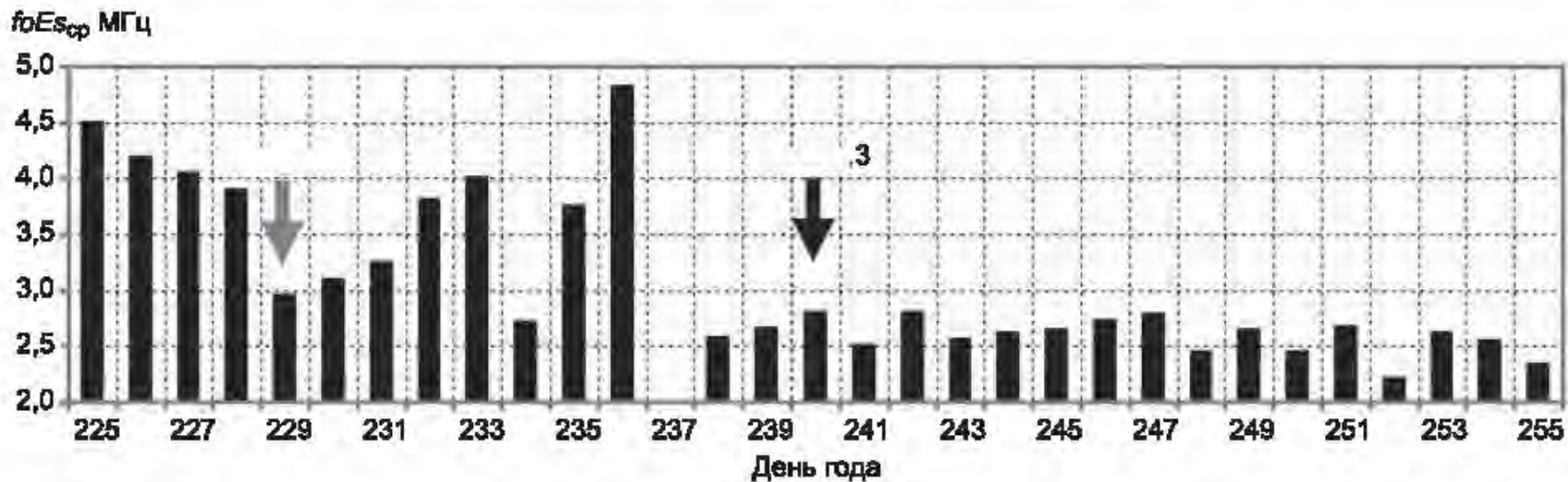


Рис. 6. Осредненное за сутки значение предельной частоты слоя E_s ($foEs$).

Следующим этапом нашего анализа стала обработка данных International Global Navigation Satellite Systems Service (IGS) в формате IONEX (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>). Формат IONEX представляет собой матрицу, элементами которой являются значения ПЭС. Разрешение матрицы составляет $2,5^\circ$ по широте и 5° по долготе. Значения ПЭС рассчитываются IGS каждые 2 часа. Данный формат позволяет строить карты глобального ПЭС в ионосфере с упомянутым выше разрешением.

Обработка данных ПЭС заключалась в следующем. Для каждого дня в период с 216-го (3 августа 2008 г.) по 244-й (31 августа 2008 г.) производился расчет параметра $d\text{TEC}$ (TEC_i), а затем производилось построение разностных карт глобального ПЭС с доступным временным разрешением, т.е. карты строились каждые 2 часа:

$$d\text{TEC} = \text{TEC} - \text{TEC}_{\text{cp}}, \quad (5)$$

где TEC_{cp} — скользящее среднее значение ПЭС, рассчитанное по 15 предшествующим значениям для того же момента времени, или фоновое значение; TEC — текущее значение ПЭС для определенного момента времени.

Данный анализ позволил зарегистрировать долгоживущие (продолжительность существования более 2 часов) положительные неоднородности в ионосфере, локализованные рядом с эпицентрами землетрясений $M = 5,7$ и $M = 6,3$, за несколько суток до главных сейсмических событий. Удивляет продолжительность существования положительных возмущений и их ярко выраженный локальный характер.

В табл. 2 представлены серии зарегистрированных положительных аномалий рядом с проекциями эпицентров землетрясений на ионосферу, продолжительность существования которых составляла не менее 2 часов. Также стоит обратить внимание на серию № 13 (см. табл. 2): зарегистрирована положительная долгоживущая ионосферная аномалия 28 августа 2008 г. над эпицентром землетрясения $M = 4,1$ (последнее землетрясение в табл. 1).

Регистрация положительных ионосферных аномалий

Номер серии	Продолжительность существования	Номер серии	Продолжительность существования
1	02—10 UT, 03.08	8	00—02 UT, 16.08
2	12—18 UT, 05.08	9	20 UT, 17.08 —
3	06—12 UT, 06.08		00 UT, 18.08
4	04—12 UT, 07.08	10	06—10 UT, 22.08
5	00—06 UT, 08.08	11	04—10 UT, 23.08
6	12—14 UT, 09.08	12	04—10 UT, 25.08
7	02—04 UT, 15.08	13	04—08 UT, 28.08

Для временного диапазона 04—10 UT авторы произвели расчет $dTEC$ для ближайшей к эпицентру землетрясения $M = 6,3$ точки с координатами $52,5^\circ$ с. ш., 105° в. д. Результаты расчета представлены на рис. 7. По интенсивности увеличения ПЭС и по продолжительности существования положительных возмущений в ионосфере можно выделить два дня: 235-й (22 августа 2008 г.) и 238-й (25 августа 2008 г.).

На рис. 8 приведены распределения значений $dTEC$ по долготе для широты $52,5^\circ$ и момента времени 08:00 UT. Из рисунка видно, что центр возмущения расположен практически над эпицентром землетрясения $M = 6,3$. На рис. 9 и 10 приведены разностные карты полного электронного содержания, из которых отчетливо видно, что возмущение в ионосфере в период подготовки землетрясения в поселке Култук имело ярко выраженный локальный характер. На рис. 9 представлена долгоживущая положительная ионосферная аномалия, зарегистрированная 22 августа в период 06—10 UT, а на рис. 10 — долгоживущая положительная ионосферная аномалия, зарегистрированная 25 августа в период 04—10 UT. Напомним, что аномалия OLR рядом с эпицентром землетрясения появилась 18 августа.

Также стоит отметить, что перед землетрясением $M = 6,3$ наблюдалось еще одно поразительное событие: ионосферная аномалия, привязанная к эпицентру землетрясения $M = 6,3$, изменяла знак. Так, например, в период 6—10 UT 22 августа над эпицентром

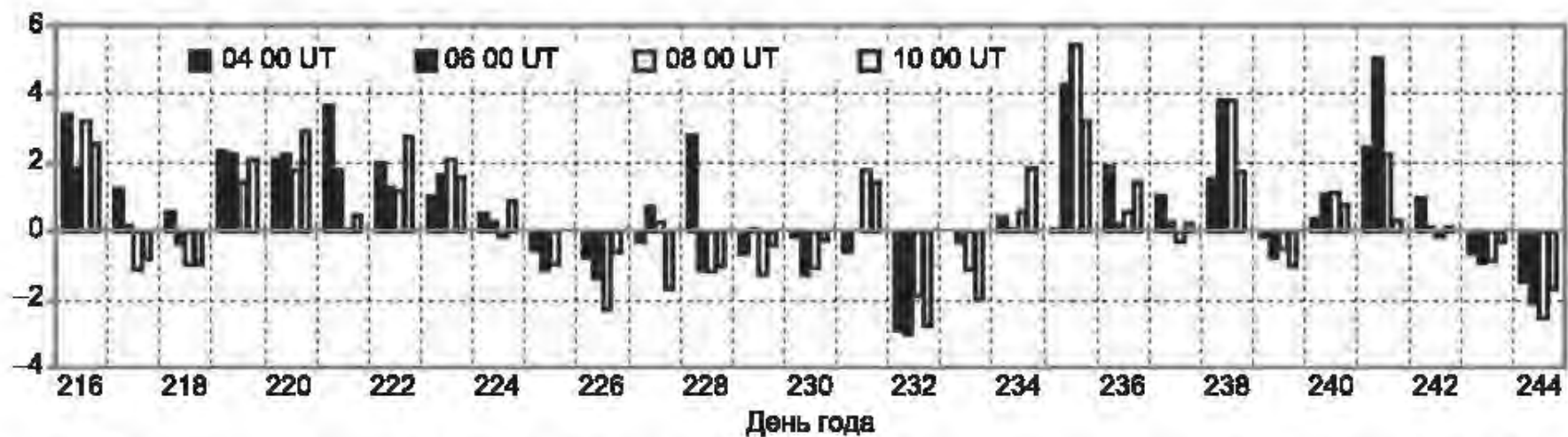


Рис. 7. Результаты расчета $dTEC$ для ближайшей к эпицентру землетрясения с магнитудой $M = 6,3$ точки с координатами $52,5^\circ$ с. ш., 105° в. д. для временного интервала 04—10 UT.

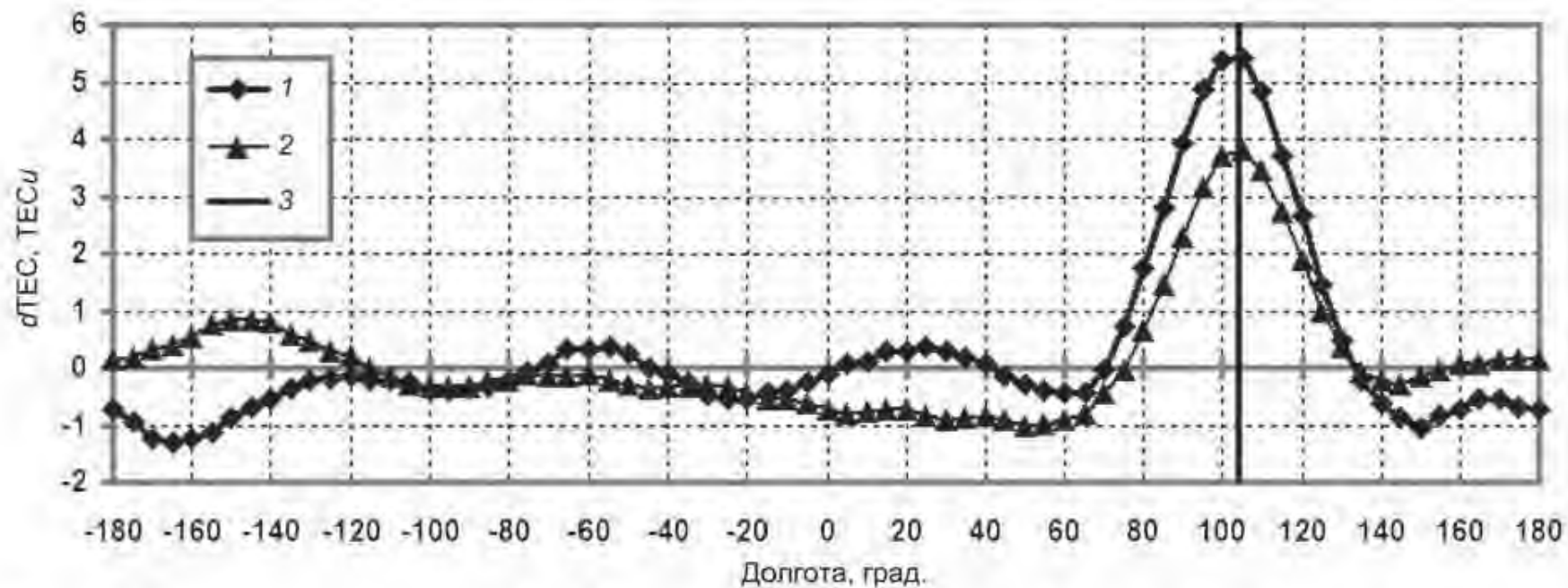


Рис. 8. Распределения значений $dTEC$ по долготе на фиксированной широте ($52,5^\circ$ с. ш.) для момента времени 08:00 UT.

1 — 22 августа (235-й день) 08 00 UT, *2* — 25 августа (238-й день) 08 00 UT. Положение эпицентра землетрясения 27 августа (240-й день) указано вертикальной линией.

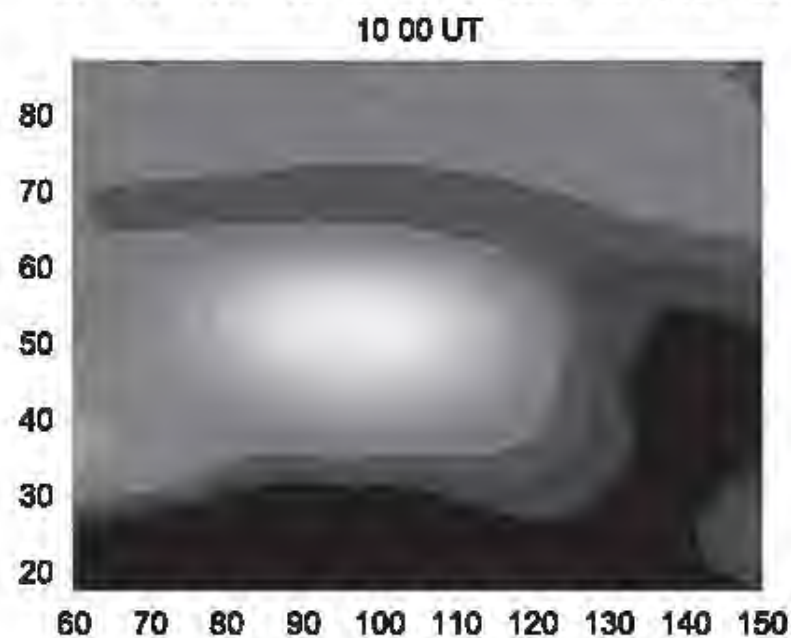
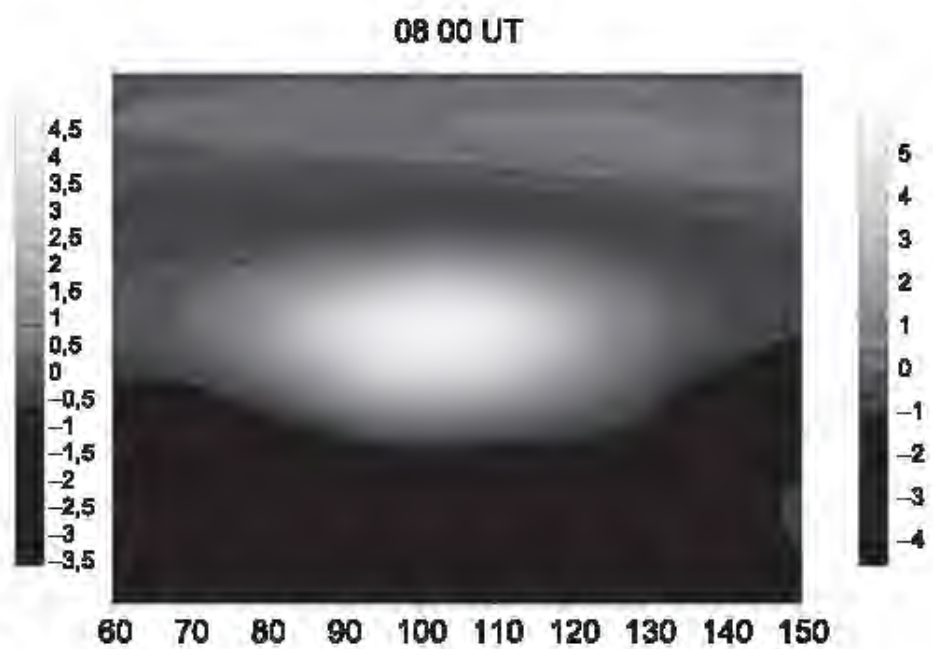
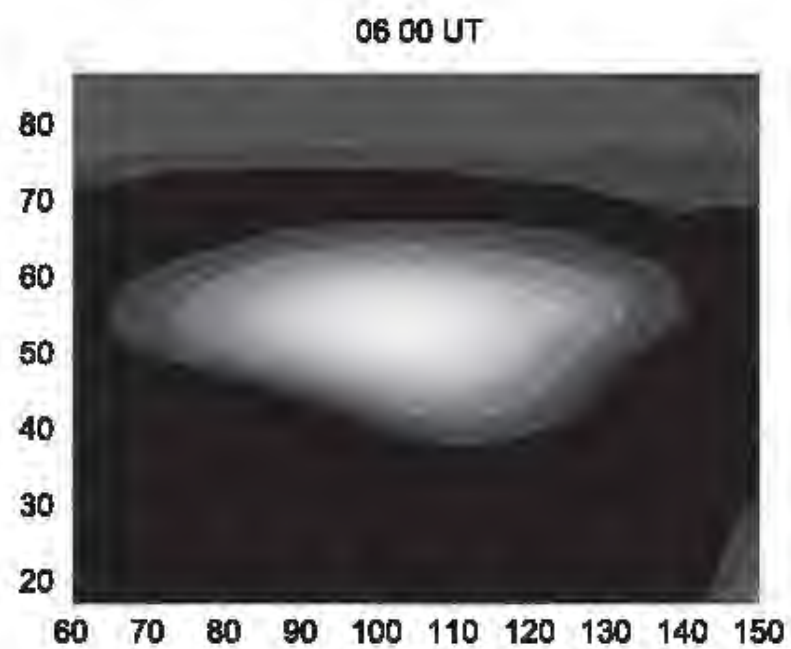


Рис. 9. Регистрация долгоживущих положительных неоднородностей в ионосфере 22 августа 2008 г., локализованных рядом с эпицентром землетрясения $M = 6,3$ ($51,61^\circ$ с. ш., $104,16^\circ$ в. д.).

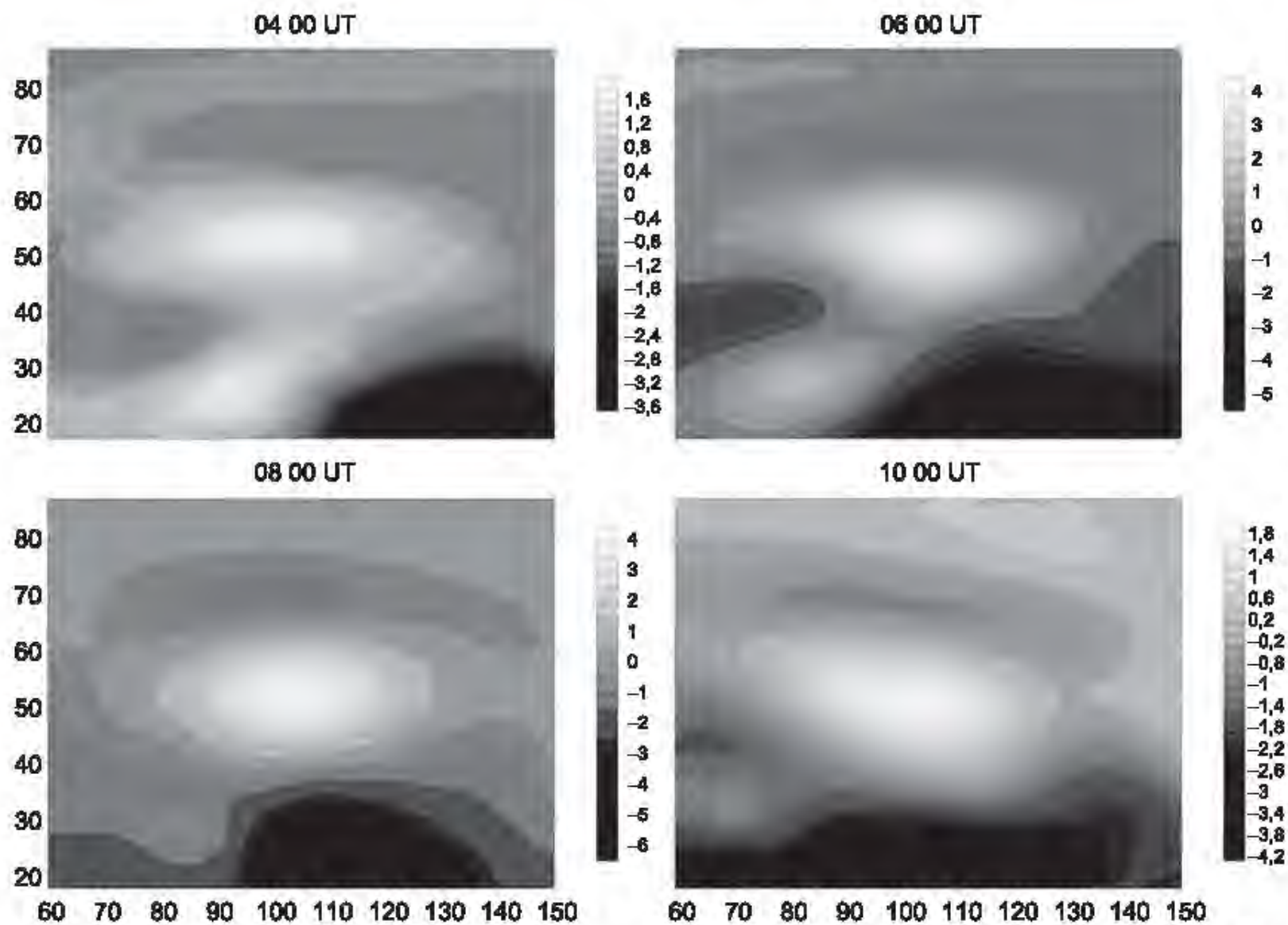


Рис. 10. Регистрация долгоживущих положительных неоднородностей в ионосфере 25 августа 2008 г., локализованных рядом с эпицентром землетрясения $M = 6,3$ ($51,61^\circ$ с. ш.; $104,16^\circ$ в. д.).

регистрировалось положительное возмущение, а в период 12—02 UT 23 августа — отрицательное. Аналогичная смена знака ионосферной аномалии наблюдалась 25 августа: с 04 до 10 UT возмущение было положительным, а с 12 до 22 UT — отрицательным.

Таким образом, комплексный анализ данных показал наличие аномальных возмущений за несколько суток до землетрясений $M = 5,7$ и $M = 6,3$:

- в атмосфере на высоте 9—12 км регистрировались тепловые аномалии OLR;

- в ионосфере регистрировалось значительное увеличение предельной частоты спорадического слоя перед землетрясениями и отмечалось наличие локализованных рядом с эпицентрами землетрясений долгоживущих неоднородностей.

По-видимому, воздействие на атмосферу и ионосферу с образованием тепловых аномалий на высоте 9—12 км, т. е. на уровне верхней границы облаков и долгоживущих ионосферных аномалий, как бы привязанных к эпицентру будущего землетрясения, происходит снизу, с поверхности Земли, в результате изменения атмосферного электрического поля Земли, вызванного эманацией радона из активизировавшихся разломов земной коры.

Выводы

Комплексный анализ атмосферной и ионосферной обстановки перед землетрясением $M = 6,3$ на юге озера Байкал позволил зарегистрировать предвестники землетрясения в атмосфере и ионосфере за несколько суток до главного события.

Предложенные в работе методы обработки ионосферных данных могут и должны быть использованы в центрах раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций — катастрофических землетрясений.

Кросскорреляционный анализ суточных значений ПЭС, полученных с помощью приемников GPS—ГЛОНАСС, установленных в Иркутске (IRKJ) и в Новосибирске (NVSK), может быть простым и достаточно надежным методом обнаружения ионосферных возмущений сейсмогенного происхождения в рассматриваемом регионе. В любом случае только комплексный подход — регистрация анома-

лий OLR в атмосфере и ионосферных аномалий — позволяет надежно с упреждением в несколько дней оценить положение эпицентра будущего землетрясения.

Регистрация предвестников землетрясения в атмосфере на высоте 9—12 км и в ионосфере перед землетрясением $M = 6,3$ подтверждает физическую корректность разработанной модели связей в системе литосфера—атмосфера—ионосфера (Пулинец, Узунов, 2010; Pulinets, Ouzounov, 2011).

Авторы выражают благодарность Институту солнечно-земной физики РАН (ИСЗФ РАН) и лично В. И. Куркину за предоставление данных наземной станции вертикального радиозондирования ионосферы, расположенной в Иркутске.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуфельд И. Л. (2010). Нас еще ждут сюрпризы природы // Калининградская правда. № 15 (17586). 11 февраля.

Добровольский И. П. (2009). Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. — М.: Физматлит. 235 с.

Мози К. (1988). Предсказание землетрясений. — М.: Мир. 382 с.

Мячкин В. И. (1978). Процессы подготовки землетрясений. — М.: Наука. 232 с.

Пулинец С. А., Узунов Д. (2010). Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф // Труды ИПГ. Вып. 89. С. 173—185.

Пулинец С. А., Хегай В. В., Боярчук К. А., Ломоносов А. М. (1998). Атмосферное электрическое поле как источник изменчивости ионосферы // УФН. Т. 168. № 5. С. 582—589.

Соболев Г. А. (1993). Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука. 313 с.

Шулейкин В. Н. (2010). Радон почвенного и атмосферного воздуха и дегазация земли. Георесурсы. Геоэнергетика. Геополитика. — М.: изд. Института проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН), с. 4—7.

Bowman D. D., Ouillon G., Sammis C. G., Sornette A., Sornette D. (1998). An observation test of the critical earthquake concept // J. Geophys. Res. V. 103. No. B10. P. 24359—24372.

Dobrovolsky I. P., Zubkov S. I., Myachkin V. I. (1979). Estimation of the size of earthquake preparation zone // Pure and Applied Geophysics. 117. P. 1025—1044.

Gruber A., Krueger A. (1984). The status of the NOAA outgoing longwave radiation dataset // Bull. Amer. Meteorol. Soc., 65. P. 958—962.

Keilis-Borok V. I., Kossobokov V. G. (1990). Premonitory activation of earthquake flow: algorithm M8 // *Phys. Earth Planet. Inter.* V.61. P. 73—83.

Khilyuk L. F., Chillingar G. V., Robertson J. O. Jr., Endres B. (2000). Gas migration. Events preceding earthquakes. — Texas. Houston: Gulf Publishing Company. 390 P.

Liperovsky V. A., Pokhotelov O. A., Liperovskaya E. V., Parrot M., Meister C.-V., Alimov O. A. (2000). Modification of sporadic E-Layers caused by seismic activity // *Surveys in Geophys.*, 21. P. 449—486.

Ouzounov D., Liu D., Kang C., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. (2007). Outgoing long wave radiation variability from ir satellite data prior to major earthquakes // *Tectonophysics*, 431.1—4.20. P. 211—220.

Pulinets S., Ouzounov D. (2011). Lithosphere—atmosphere—ionosphere coupling (LAIC) model: An unified concept for earthquake precursors validation // *J. Asian Earth Sci.*, 41(4—5). P. 371—382.

Pulinets S. A., Gaivoronska T. B., Leyva Contreras A., Ciruolo L. (2004). Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquakes // *Natural Hazards and Earth System Sci.*, 4. P. 697—702.

Reid H. F. (1910). The mechanism of the earthquake / In: *The California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Earthquake Investigation Commission*, 2. — Washington D. C., Carnegie Institution. P. 1—192.

Rikitake T. (1976). *Earthquake Prediction.* — Amsterdam: Elsevier. 357 p.

Scholz C. H., Sykes L. R., Aggarwal Y. P. (1973). Earthquake prediction: A physical basis // *Science*, 181. P. 803—809.

Yasuoka Y., Nagahama H., Ishikawa T. (2010). Anomalous radon concentration prior to an earthquake: A Case Study on the 1995 Kobe Earthquake. — Japan. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, Germany. 138 p.

<http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html>

<http://isgi.latmos.ipsl.fr/lesdonne.htm>

<http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html>

<ftp://garner.ucsd.edu/archive/garner/>

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>