

**ЭФФЕКТЫ В СПОРАДИЧЕСКОМ СЛОЕ Е В ПЕРИОД ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
27.08.2008 ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ИРКУТСКЕ**

¹Л.П. Корсунова, ²Л.В. Чистякова, ¹В.В. Хегай

EFFECTS IN THE SPORADIC E-LAYER DURING THE PRELIMINARY STAGE OF THE EARTHQUAKE ON 27 AUGUST 2008 AS DEDUCED FROM OBSERVATIONS IN IRKUTSK

¹L.P. Korsunova, ²L.V. Chistyakova, ¹V.V. Khegai

Проведен поиск возможных ионосферных предвестников сильного корового землетрясения 27.08.08 с магнитудой $M_s=6.1$, эпицентр которого находился южнее Иркутска на расстоянии около 100 км. С этой целью исследованы изменения в суточных вариациях параметров спорадического слоя Е по пятнадцатиминутным данным станции вертикального зондирования ионосфера в Иркутске в течение летних месяцев 2008 г. Обнаружено несколько случаев появления аномальных E_s , соответствующих критериям идентификации ионосферных предвестников землетрясений, с различным временем упреждения момента землетрясения (ΔT): 27, 13 и 1 сут. Показано, что эти времена согласуются с временами упреждения для предвестников землетрясений разной срочности, полученных по результатам других измерений в периоды подготовки коровых землетрясений такой же мощности. Кроме того, обнаружены изменения в E_s и для более слабых землетрясений ($M_s=4\div 5$), эпицентриальные расстояния которых от ионосферной станции составляли менее 500 км.

We have carried out a search for possible ionospheric precursors of the 27 August 2008 strong crust earthquake with the magnitude $M_s=6.1$ whose epicenter was at about 100 km southward of Irkutsk. We have analyzed changes in diurnal variations of sporadic E-layer parameters in the summer of 2008, using 15-min data from Irkutsk vertical sounding station. Several cases of abnormal E_s occurrence, which match the criteria of identification of ionospheric precursors of earthquakes, with different look-ahead periods ΔT (27, 13 and 1 days) have been found. These periods were demonstrated to be in agreement with the look-ahead periods for earthquake precursors of different duration obtained from results of other measurements during the preliminary stage of crust earthquakes with the same magnitude. Besides, we have revealed changes in E_s for weaker earthquakes ($M_s=4\div 5$) whose epicentral distances from the ionospheric station were less than 500 km.

Введение

Исследованию предвестников землетрясений в ионосфере по данным вертикального зондирования посвящено много работ, большая часть которых основывается на изменениях в регулярном слое F2. Тем не менее, перед сильными землетрясениями с $M>5$ часто отмечаются существенные изменения в спорадическом слое Е (E_s): увеличение вероятности появления E_s , изменения частоты экранирования ($f_b E_s$), предельной частоты отражений от слоя E_s ($f_o E_s$), диапазона полупрозрачности слоя E_s [Липарповская и др., 1994, 2007; Пулинец, Лью, 1999; Silina et al., 2001; Ondoh, 2003, 2009; Корсунова, Хегай, 2005; Singh et al., 2007; Perrone et al., 2010]. Все эти изменения в E_s наблюдаются с различным временем упреждения момента землетрясения, составляющим несколько суток. В [Корсунова, Хегай, 2005] было показано, что разброс времени появления ионосферных предвестников землетрясений обусловлен двумя факторами: магнитудой готовящегося землетрясения и удалением пункта наблюдения от эпицентра землетрясения. В дальнейшем было установлено, что в качестве предвестника можно использовать появление аномально высокого E_s , который образуется на высотах $h \geq 120$ км, превышающих на 10 км и более фоновые значения высот для конкретного времени суток [Korsunova and Khegai, 2006]. При этом наблюдается увеличение частот спорадического слоя Е и регулярного слоя F2. Анализ тридцати землетрясений в Японии с $M \geq 6.0$ позволил получить эмпирические зависимости, связывающие время упреждения предвестником момента землетрясения с его магнитудой и эпицентриальным расстоянием.

Представленная в [Корсунова, Хегай, 2008] методика выделения предвестников землетрясений в

спорадическом слое Е была использована нами для выделения возможных предвестников в период подготовки землетрясения 27.08.2008 с $M=6.1$, произошедшего вблизи Иркутска.

Метод анализа и результаты

Обычно для выделения ионосферных предвестников находят отклонения текущих значений тех или иных параметров от фоновых значений. В качестве последних используют средние по геомагнитно спокойным дням или медианы за тот или иной промежуток времени. Для регулярного слоя F2 предвестниками считаются отклонения его критической частоты от фона, превышающие стандартное отклонение в 1.5–2 раза [Rios et al., 2004; Liu et al., 2006]. Исследования спорадического слоя Е в период подготовки землетрясений [Silina et al., 2001; Ondoh, 2003; Корсунова, 2004] показали, что отклонения его частотных параметров существенно ниже этих значений, но поведение E_s в этот период имеет ряд особенностей. Именно эти особенности и легли в основу предложенного и апробированного в [Korsunova, Khegai, 2006] метода поиска возможных предвестников землетрясений. Главными из них являются аномально высокие E_s с длительностью существования $\tau \approx 2$ ч, сопровождающиеся «всплесками» в частоте экранирования не менее 20 % такой же продолжительности, а также увеличение критических частот регулярного слоя F2. Более подробное обоснование приведенных критериев поиска предвестников землетрясений в ионосферных параметрах приведено в работе [Корсунова, Хегай, 2008].

Для анализа использовались данные пятнадцатиминутных измерений на автоматической станции вертикального зондирования ионосфера Института солнечно-земной физики СО РАН, нахо-

дящейся в ~100 км от эпицентра землетрясения 27.08.2008 с $M_s=6.1$. Весь анализ подразделялся на два этапа:

1) находились медианы действующих высот спорадического слоя E ($h'_m E_s$), частоты экранирования ($f_{bm} E_s$) и критической частоты регулярного слоя (f_{omF2}) по всем невозмущенным дням ($A_p < 17$) за 30 календарных дней, предшествующих землетрясению;

2) вычислялись отклонения текущих значений указанных параметров от соответствующих медиан ($\Delta h'E_s$, $\Delta f_{bm}E_s$, $\Delta f_{om}F2$), а также величины отношений $\{\Delta f_b/f_{bm}\}_{E_s}$; $\{\Delta f_o/f_{om}\}_{F2}$ с дискретностью в 15 мин.

Следует отметить, что случаи полной экранировки спорадическим слоем области F исключались из рассмотрения, так как в отсутствие слоя $F2$ значения $\Delta f_{bm}E_s$ становятся неопределенными. Идентификация предвестника осуществлялась по приведенным выше критериям. Промежуток времени от появления предполагаемого предвестника до момента толчка является временем упреждения предвестником момента землетрясения (ΔT).

В результате проведенного исследования были выделены три случая появления E_s , отвечающие критериям выбора предвестника землетрясения. Первый предполагаемый предвестник появился 31.07.2008 в 09:15 UT за $\Delta T \sim 27$ сут с $\tau \approx 1$ ч 30 мин. Он сопровождался «всплесками» в частоте экранирования такой же продолжительности. Изменения ионосферных параметров происходили при очень спокойных геомагнитных условиях ($A_p = 3$). Следующий случай появления аномально высокого E_s был отмечен в 19:00 UT 13.08.2008 за $\Delta T \sim 13$ сут, и, наконец, третий – в 22:45 UT 25.08.2008 за $\Delta T \sim 1$ сут до толчка.

Из табл. 1 следует, что предполагаемые предвестники появляются в разное время суток, за исключением околополуденных часов местного времени. Максимальные изменения частоты экранирования, а значит и электронной концентрации в E_s , отмечаются накануне землетрясения. Отметим, что выделенные интервалы времени приходятся на дни с очень низкой геомагнитной активностью. Трехчасовые локальные K -индексы отличаются от планетарных K_p не более чем на 1 или совпадают с ними, но в целом для всех указанных дней сумма локальных K -индексов превышает сумму планетарных.

Таблица 1

Параметры трех предполагаемых предвестников в E_s для землетрясения 27.08.2008, среднесуточные индексы геомагнитной активности A_p и суммы локальных K -индексов

Дата	Время, UT	$\Delta h'E_s$, км	$\{\Delta f_b/f_{bm}\}_{E_s}$	ΔT , сут	τ , ч	A_p , НГЛ	$\sum K_{ind}$
31.07.2008	9:15	28	0.31	26.67	1.5	3	10
13.08.2008	19:00	26	0.44	13.2	1.75	4	13
25.08.2008	22:45	18	0.54	1.12	1.75	1	4

Тем не менее, в дни появления аномальных E_s геофизическая обстановка остается спокойной, так что выявленные эффекты, по-видимому, не связаны с «космической погодой».

Временной ход отклонений от исследуемых параметров E_s в течение ± 1 сут относительно времени появления предполагаемых предвестников землетрясений представлен на рис. 1, *a–c* вместе с соответствующими стандартными отклонениями. Момент толчка обозначен штриховой линией со стрелкой.

Возможные предвестники землетрясений в параметрах E_s представляют собой группы «всплесков» с максимальными амплитудами, превышающими стандартные отклонения, общей продолжительностью $\tau = 1.5 \div 1.75$ ч. Отсюда следует, что для изучения эффектов подготовки землетрясений в ионосфере с $M < 6.0$ необходимы измерения с дискретностью не менее чем 15 мин. Как следует из рисунков, в некоторые моменты времени наблюдаются существенные отклонения того или иного параметра, помимо указанных выше. Однако эти отклонения не соответствуют критериям выбора предвестников по длительности или по совокупности их во всех трех параметрах ($\Delta h'E_s$, $\{\Delta f_b/f_{bm}\}_{E_s}$, $\{\Delta f_o/f_{om}\}_{F2}$).

Полученные результаты, представленные в табл. 1 и на рис. 1, *a–c*, свидетельствуют о том, что процесс подготовки землетрясения и соответствующий «отклик» в ионосфере занимают продолжительное время. При этом могут наблюдаться предвестники разной «срочности», которые различаются также и по величине отклонений.

Для сейсмоактивного Байкальского региона важно выяснить, нет ли подобных изменений в параметрах ионосферных слоев в отсутствие сильных

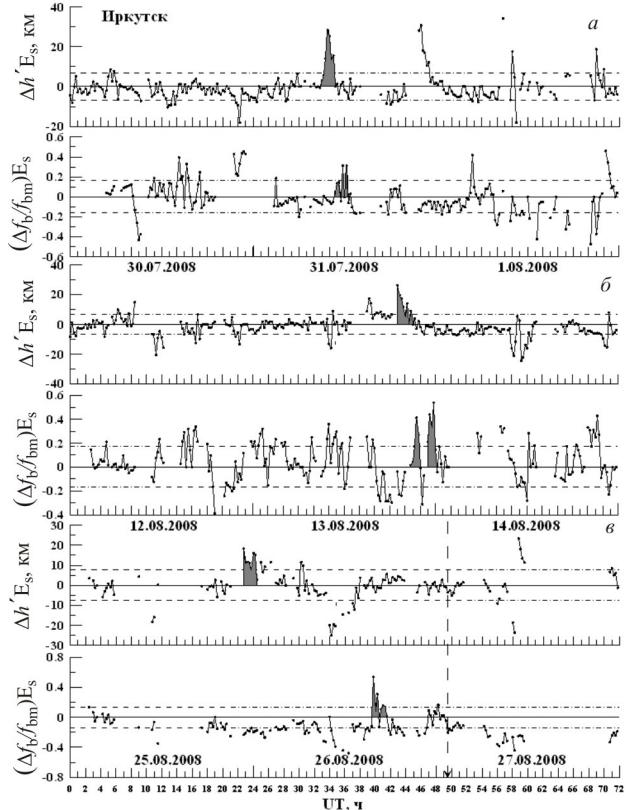


Рис. 1. Временной ход отклонений от исследуемых параметров E_s в период подготовки землетрясения 27.08.2008 для интервалов 30.07.2008–1.08.2008 (*a*); 12.08.2008–14.08.2008 (*b*); 25.08.2008–27.08.2008 (*c*). Затененными участками кривых отмечены предполагаемые предвестники землетрясений.

землетрясений. Для ответа на этот вопрос были рассмотрены ионосферные данные за июнь–июль 2008 г., когда отмечались только слабые землетрясения с энергетическим классом $K < 12$ (или $M < 4.8$). При этом ионосферная станция в Иркутске не попадала в зону подготовки землетрясения по Добровольскому, т. е. $R > r_D$ [Dobrovolsky et al., 1979]. Тем не менее, в ряде случаев наблюдались отклонения в параметрах спорадического слоя E и в f_0F2 , близкие к критериям выбора предвестников землетрясения, но с некоторыми особенностями. Во-первых, длительность существования аномальных E_s была несколько меньше ($\tau = 1.25 \div 1.5$ ч), чем для 27.08.2008, и во-вторых, «всплески» в E_s следовали за изменениями в f_0F2 , а не наоборот, как обычно бывает в зоне подготовки землетрясения. Возможно, именно указанные различия важны для оценки предполагаемой сейсмоопасности. Все эти случаи (табл. 2) предваряли на несколько часов землетрясения с $K = 9.8 \div 11.3$ для эпицентральных расстояний $R < 320$ км, за исключением события 24.07.2008.

Таблица 2
Список рассмотренных слабых землетрясений
и предваряющие их аномалии в E_s

№	Дата появления аномалии в E_s	Время появления аномалии в E_s , UT	Дата землетрясения	Время землетрясения, UT	K	R , км	ΔT , сут
1	01.06.2008	21:45	02.06.2008	03:09	10.0	313	0.22
2	09.06.2008	23:45	10.06.2008	10:37	10.2	315	0.45
3	13.06.2008	14:45	13.06.2008	21:36	10.2	313	0.28
4	18.06.2008	21:00	20.06.2008	00:19	11.3	206	1.14
5	26.06.2008	20:00	27.06.2008	00:09	9.8	315	0.17
6	18.07.2008	09:00	19.07.2008	00:17	11.1	290	0.63
7	24.07.2008	14:00	24.07.2008	19:09	10.7	656	0.21
8	09.08.2008	09:15	09.08.2008	19:44	10.4	289	0.44
9	26.08.2008	06:15	28.08.2008	07:27	10.5	88	2.04

Для указанных в табл. 2 случаев оказалось возможным построить зависимость, связывающую время упреждения выделенными аномалиями момента землетрясения с энергетическим классом и эпицентральным расстоянием до пункта наблюдения. Прямая линейной регрессии в соответствии с методом наименьших квадратов имеет вид $\lg(\Delta T \times R) = 0.38K - 1.85$ и представлена на рис. 2.

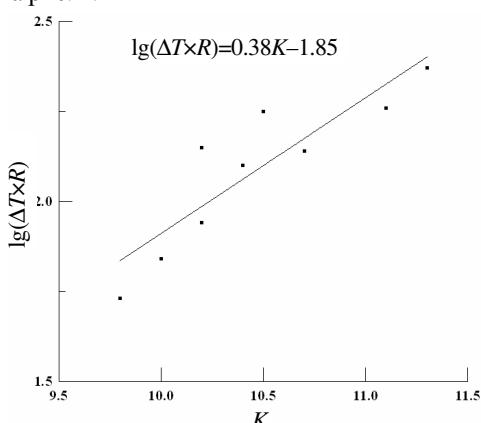


Рис. 2. Эмпирическая зависимость, связывающая времена задержки ΔT (между появлением выделенных аномалий в E_s и моментами землетрясений) с энергетическим классом сейсмических событий и их эпицентральными расстояниями до пункта наблюдения (точки). Соответствующая линия регрессии показана сплошной линией.

Обсуждение результатов

Наземные измерения (деформации земной коры, уровень подземных вод и содержание в них радона, электросопротивление, характеристики распространения сейсмических волн), систематизированные в [Сидорин, 1979; Зубков, 1987], указывают на существование нескольких групп предвестников землетрясений, классифицированных авторами как долгосрочные, среднесрочные и краткосрочные. Для каждой из групп получены эмпирические зависимости, связывающие время упреждения предвестником момента землетрясения и эпицентральное расстояние до точки наблюдения с магнитудой готовящегося землетрясения. Такого же рода зависимости с учетом региональных особенностей сейсмических зон были позднее представлены в [Сидорин, 1992]. Так, для Центральной Азии по данным наземных измерений в работе [Сидорин, 1992] приведена следующая эмпирическая зависимость для долгосрочных предвестников землетрясений: $\lg(\Delta T \times R) = 0.59M - 0.01$. Для $M = 6.1$ и $R = 100$ км это дает время упреждения предвестником момента землетрясения $\Delta T \approx 39$ сут. Ионосферные наблюдения в Ашхабаде для ряда землетрясений в Средней Азии [Корсунова, 2004] позволили выявить следующую зависимость для предвестников землетрясений: $\lg(\Delta T \times R) = 0.74M - 0.96$, что для тех же параметров землетрясения дает $\Delta T \approx 36$ сут. В Иркутске первый предполагаемый предвестник землетрясения обнаружен за $\Delta T \approx 27$ сут, что соответствует приведенным выше величинам (десятки суток).

Менее изучены среднесрочные (по классификации [Зубков, 1987]) предвестники землетрясений. По ионосферным наблюдениям на Камчатке для восьми коровых землетрясений в [Корсунова и др., 2009] были обнаружены возможные среднесрочные предвестники землетрясений, для которых ΔT имеет тенденцию изменяться в соответствии с выражением $\lg(\Delta T \times R) = 0.81M - 1.83$. В этом случае для землетрясения с $M = 6.1$ и $R = 100$ км ΔT составляет 12.9 сут. Появление второго аномального E_s по наблюдениям в Иркутске происходит за 13.2 сут до землетрясения, что соответствует времени упреждения для возможного среднесрочного ионосферного предвестника землетрясения.

Для предвестников землетрясений с заблаговременностью часы–сутки получен ряд зависимостей, связывающих время упреждения ΔT предвестником момента землетрясения с магнитудой M готовящегося землетрясения, как с учетом эпицентрального расстояния до точки наблюдения, так и без учета этого фактора. Для $M = 6.1$ с учетом эпицентрального расстояния $R = 100$ км по ионосферным данным для восьми камчатских землетрясений получено, что время упреждения $\Delta T = 3.2$ сут [Корсунова и др., 2009], а для ряда землетрясений в Японии с теми же параметрами $\Delta T = 1.7$ сут [Korsunova, Khegai, 2006]. В Иркутске третий предполагаемый ионосферный предвестник землетрясения с минимальным временем упреждения обнаружен 25.08.2008 с $\Delta T = 1.1$ сут, что соответствует приведенным выше временам упреждения для ионосферных предвестников землетрясений такого рода.

Таким образом, благодаря длительным ионосферным наблюдениям с повышенным относительно стандартного временным разрешением ($\Delta T = 15$ мин)

были выделены три типа возможных ионосферных предвестников с различным временем упреждения момента землетрясения, представляющие собой появление аномально высоких E_s с повышенной электронной концентрацией. Кроме того, отмечены менее значительные изменения в E_s перед землетрясениями с энергетическим классом $K<12$ на расстояниях, превышающих размеры зоны подготовки землетрясения по Добровольскому. На то, что эти эффекты не случайны, указывает полученная нами зависимость, связывающая время упреждения предвестником момента землетрясения и эпизентральное расстояние до точки наблюдения с энергетическим классом готовящегося землетрясения, подобная аналогичной зависимости, полученной для наземных предвестников землетрясений: $\lg(\Delta T \times R) = 0.48K - 3.0$ [Сидорин, 1979]. Последнее может означать, что границы зоны подготовки землетрясения, возможно, простираются в некоторых направлениях (например вдоль разлома в земной коре) дальше, чем это следует из формулы Добровольского.

За исследуемый нами период ионосферных наблюдений (лето 2008 г.) все обнаруженные нами аномалии в E_s соотнесены с теми или иными землетрясениями. Следует отметить, что по другим, более длительным (в течение нескольких лет) ионосферным наблюдениям отмечались иногда аномалии в E_s , полностью соответствующие принятым нами критериям идентификации ионосферных предвестников, но за ними не последовали землетрясения. В [Pettrone et al., 2010] при анализе ионосферных данных за все месяцы 1984 и 1997 гг., когда отсутствовали сильные землетрясения $M>5.0$, только в шести случаях были обнаружены «ложные» предвестники. Поскольку такие случаи довольно редки, пока неясно, как различить реальные и «ложные» предвестники землетрясений, и это может стать предметом будущих исследований.

Соответствие экспериментально определенных величин (параметров возможных предвестников землетрясений) для конкретного землетрясения вблизи Иркутска результатам расчетов по эмпирическим зависимостям для землетрясений с близкими характеристиками в других региональных сейсмических зонах подтверждает корректность идентификации аномалий в E_s в качестве ионосферных предвестников землетрясений по приведенным в [Корсунова и Хегай, 2008] критериям. Кроме того, эти результаты свидетельствуют в пользу единства процессов подготовки коровых землетрясений в различных сейсмических зонах.

Существует ряд теоретических работ, в которых показана возможность образования аномально высоких E_s в период подготовки землетрясений [Ким и др., 1993; Pulinets et al., 2000]. Такие слои могут образоваться в результате сложного электродинамического взаимодействия в системе литосфера–атмосфера–ионосфера перед землетрясениями. Полученные выше результаты согласуются с выводами этих теоретических разработок.

Выводы

1. Впервые были выделены три возможных ионосферных предвестника в период подготовки землетрясения с $M_s=6.1$ с различным времененным упреждением: $\Delta T \sim 27$ сут; 13 сут; 1 сут.

2. Близкие времена появления выделенных предвестников по ионосферным данным в Прибайкалье, на Камчатке и в Японии для землетрясений одинаковой мощности могут свидетельствовать о единобразии процессов подготовки коровых землетрясений в различных регионах Земли.

Авторы выражают благодарность к. ф.-м. н. К.Г. Ратовскому за предоставление материалов ионосферных наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуфельд И.Л., Гусев Г.А. Современное состояние работ по прогнозу землетрясений (Есть ли выход из тупика?) // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Под ред. акад. В.Н. Страхова и д. ф.-м. н. В.А. Липеровского. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 18–36.

Зубков С.И. Времена возникновения предвестников землетрясения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 5. С. 87–91.

Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможности образования слоя ионов металлов в Е-областиочной среднеширотной ионосфере перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33, № 5. С. 114–119.

Корсунова Л.П. Предвестниковые эффекты в спорадическом слое Е от коровых землетрясений вблизи Японии и в Средней Азии // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: Сборник докладов. III Международной конференции. Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН, 2004. С. 65–70.

Корсунова Л.П., Хегай В.В. Сейсмо-ионосферные эффекты сильных коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 5. С. 706–711.

Корсунова Л.П., Хегай В.В. Анализ сейсмо-ионосферных возмущений на цепочке японских станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 3. С. 407–415.

Корсунова Л.П., Михайлов Ю.М., Хегай В.В. и др. Экспериментальное подтверждение взаимосвязи возможных предвестников землетрясений в приземных квазистатических электрических полях и в ионосфере // Солнечно-земная физика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. Т. 127, Вып. 14. С. 125–130.

Липеровская Е.В., Похотелов О.А., Олейник М.А. и др. Некоторые эффекты в спорадическом слое Е ионосферы перед землетрясением // Физика Земли. 1994. № 11. С. 86–88.

Липеровская Е.В., Богданов В.В., Родкин М.В. и др. Суточная зависимость возмущений в спорадическом слое Е ионосферы в связи с землетрясениями по материалам станции вертикального зондирования «Петропавловск-Камчатский» и «Кокубунжи» (Токио) // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: IV Международная конференция. Сборник докладов. Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН. 2007. С. 372–377.

Пулинец С.А., Лью Й.Я. Ионосферные предвестники землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Под ред. акад. В.Н. Страхова и д. ф.-м. н. В.А. Липеровского. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 37–55.

Сидорин А.Я. Зависимость времени появления предвестников землетрясений от эпизентрального расстояния // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245, № 4. С. 825–828.

Сидорин А.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 С.

Dobrovolsky I.R., Zubkov S.I., Myachkin V.I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // PAGeoph. 1979. N 117. P. 1025–1044.

Korsunova L.P., Khegai V.V. Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // Int. J. Geomagn. Aeron. 2006. N 6. P. GI3005, doi:10.1029/2005GI000122.

Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. A05304. doi:10.1029/2005JA011333.

Ondoh T. Anomalous sporadic E layers observed before M 7.2 Hyogo-ken Nanbu earthquake; Terrestrial gas emanation model // Adv. Polar Upper Atmos. Res. 2003. N 17. P. 96–108.

Ondoh T. Investigation of precursory phenomena in the ionosphere, atmosphere and groundwater before large earthquakes of $M > 6.5$ // Adv. Space Res. 2009. V. 43, N 2. P. 214–223.

Perrone L., Korsunova L. P., Mikhailov A. V. Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // Ann. Geophys. 2010. V. 28, N 4. P. 941–950.

Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Hegai V.V. et al. Quasielectrostatic Model of Atmosphere–Thermosphere–Ionosphere Coupling // Adv. Space Res. 2000. V. 26, N 8. P. 1209–1218.

Rios V.H., Kim V.P., Hegai V.V. Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the Great San Juan Earthquake of 23 November 1977 // Adv. Space Res. 2004. V. 33, N 3. P. 323–327.

Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V. Ionospheric phenomena before strong earthquakes // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2001. V. 1, N 3. P. 113–118.

Singh B., Singh Om P. Simultaneous ionospheric E- and F-layer perturbations caused by some major earthquakes in India / Ann. Geophys. 2007. V. 50, N 1. P. 111–122.

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Путикова РАН, Троицк

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск