

УДК 523.31-853,551.510.535

ОБНАРУЖЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ КРАТКОСРОЧНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЯМ ЕЖЕСУТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК E_s

© 2021 г. Л. П. Корсунова¹, *, А. Д. Легенька¹, **

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: lpkors@rambler.ru

**e-mail: legenka.anna@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 05.04.2021 г.

Принята к публикации 25.05.2021 г.

Проведено исследование изменений двух характеристик спорадического слоя E : вероятности появления PEs и предельной частоты обыкновенной волны спорадического E -слоя ионосферы $foEs$ в течение 10-дневного периода подготовки девятнадцати коровых землетрясений в Тихоокеанском регионе с магнитудами $M = 6.5–7.4$ для пары станций, удаленных на сотни километров друг от друга, но попадающих в зону подготовки конкретного землетрясения (оценка размеров зоны подготовки землетрясения проводится по известным в научной литературе формулам, связывающим размер радиуса зоны подготовки землетрясения и магнитуду землетрясения). Анализировались данные измерений, полученные на наземных станциях вертикального зондирования ионосферы. Для выделения возможных ионосферных предвестников землетрясений использовались отклонения от медианы за исследуемый промежуток времени суточных значений PEs (δPEs) и интегральные суточные значения величины суммарных нерегулярных изменений $foEs$ (ΔfEs_{Σ}). В ежесуточных изменениях указанных величин в течение периодов подготовки всех рассмотренных землетрясений было обнаружено совпадение времени появления максимумов отклонений обоих параметров перед землетрясениями на каждой из разнесенных станций в одни и те же сутки (в интервале от одних до четырех суток перед днем землетрясения). Обсуждается критерий идентификации краткосрочного ионосферного предвестника землетрясения. Сравнение результатов проведенного анализа для ручной и автоматической обработки ионограмм показало перспективность использования предложенных параметров, полученных по данным разнесенных ионозондов, для идентификации краткосрочных ионосферных предвестников землетрясений с $M = 6.5–7.0$.

DOI: 10.31857/S0016794021050060

1. ВВЕДЕНИЕ

Различные методы исследования верхней атмосферы и ионосферы обнаруживают согласующиеся между собой изменения в этих геосферах в период подготовки землетрясений разного класса (см. работы [Насыров, 1978; Липеровский и др., 1992; Руленко, 2000; Ondoh, 2000, 2009; Silina et al., 2001; Nobara and Parrot, 2002; Pulnits and Boyarchuk, 2004; Ouzounov and Freund, 2004; Korsunova and Khagai, 2006; Liu et al., 2006; Korsunova and Khagai, 2014; Бычков и др., 2017]). Эти изменения могут быть предвестниками готовящихся землетрясений, так как они соответствуют по месту и времени своего проявления известным предвестниковым эффектам в наземных геофизических полях (см. монографии [Сидорин, 1992; Пулинец и др., 2014]).

Среди возможных ионосферных предвестников землетрясений (ИПЗ) в последнее десятилетие достаточно хорошо изучены отклонения от медианных значений критической частоты регулярного слоя $F2$ ($foF2$), предельной частоты и частоты экранирования спорадического слоя E ($foEs, fbEs$), а также его действующих высот ($h'Es$) в период подготовки сильных землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$ (см., в частности, работы [Korsunova and Khagai, 2006, 2014; Perrone et al., 2010]). Изменения этих параметров, полученные по многолетним наблюдениям на наземных станциях вертикального зондирования ионосферы (НСВЗИ), позволяют судить о состоянии верхней (область F) и нижней (область E) ионосферы перед землетрясениями.

В настоящее время большое развитие получили и другие методы исследования ионосферы:

спутниковые *in situ* (см. работы [Parrot et al., 2006; Sarkar et al., 2007]) и GPS-измерения (см. статьи [Saroso et al., 2008; Xia et al., 2011]). Несомненным достоинством и преимуществом этих методов измерений является их глобальность и высочайшая дискретность по времени, позволившая уточнить пространственные масштабы готовящихся мощных землетрясений. С помощью этих методов можно получить достаточно полную информацию об изменениях в верхней ионосфере, тогда как сведений о состоянии нижней ионосферы значительно меньше. Именно поэтому измерения параметров спорадического слоя *E* на НСВЗИ до сих пор актуальны.

Еще в 90-е годы прошлого века были отмечены существенные изменения в *Es* перед сильными землетрясениями: увеличение вероятности его появления, рост частот и уменьшение полупрозрачности слоя, как это указано в исследованиях [Alimov et al., 1989; Липеровская и др., 1994; Ondoh, 2000]. В работе [Silina et al., 2001] на основе изучения 25 среднеазиатских землетрясений с магнитудами $M \geq 5.5$ было показано, что за 1–2 сут до основного удара уменьшаются средние за трое суток значения частоты экранирования, а за трое суток до толчка возрастает полупрозрачность слоя, которая падает к моменту землетрясения. Аналогичные результаты получены и для среднесуточных значений коэффициента полупрозрачности слоя *Es* по данным измерений в Японии, как это указано в монографии [Пулинец и др., 2014]. Кроме того, детально изучены изменения не только частотных параметров *Es*, но и его действующих высот, позволившие обнаружить значимые изменения этих параметров в период подготовки землетрясений с $M \geq 6.0$ (см. работы [Korsunova and Khagai, 2006, 2014]).

Все эти результаты получены в эпигнозе и привязаны к датам уже состоявшихся событий. Неясно, как в реальном времени можно предсказать готовящееся землетрясение, опираясь на сведения о его ионосферных предвестниках, в том числе и на изменения в *Es*. Значимые отклонения в ионосферных параметрах могут быть обусловлены какими-либо другими геофизическими процессами, не связанными с землетрясениями. Так, в работе [Pergone et al., 2010] показано, что примерно в 50% случаев существенные изменения ионосферных параметров, аналогичные предвестниковым эффектам, отмечались и в отсутствие землетрясений. Тем не менее, в спокойных геомагнитных условиях, эффективность обнаружения возможных ИПЗ согласно оценке Хансена–Койпера, или *Rscore* (Hanssen-Kuipers Score, True Skill Statistic, Pierce Skill Score, *Rscore*, см. статью [Chen et al., 2004]), как показано в работе [Korsunova and Khagai, 2015]) на массиве из 34 Камчатских землетрясений с $M = 4.6–6.0$, достаточно высока, так как *Rscore* = 0.82. Эта вели-

чина представляет собой разность между вероятностью обнаружения истинного предвестника землетрясения и вероятностью обнаружения “ложного” предвестника. Диапазон изменения этой величины лежит в интервале от -1 до 1 , при этом последнее означает стопроцентную вероятность обнаружения истинного предвестника при отсутствии “ложных” тревог.

Еще одна неопределенность связана с предсказанием времени главного удара на основании данных о заблаговременности (времени упреждения) появления ионосферного предвестника землетрясения. Как показали исследования [Korsunova and Khagai, 2006; Корсунова и Хегай, 2018], ИПЗ могут быть как среднесрочными, так и краткосрочными – в полном соответствии с известными данными наземных измерений (см. работу [Зубков, 1987]). Поэтому необходимы критерии, позволяющие идентифицировать именно краткосрочные ионосферные предвестники землетрясений (КИПЗ), упреждающие момент землетрясения на часы-дни, что крайне важно для сейсмоопасных регионов. Именно такие критерии и были определены в исследовании [Корсунова и Хегай, 2018] в результате анализа данных многолетних наблюдений на цепочке НСВЗИ в Японии для 30 сильных землетрясений с магнитудами $M \geq 6.5$.

Эти критерии были получены на основе анализа ежечасных изменений четырех ионосферных параметров: $h'Es, foEs, fbEs, foF2$ при одновременных измерениях на разнесенных НСВЗИ в период подготовки ряда землетрясений. Оказалось, что только для краткосрочных предвестников характерно а) появление максимальных отклонений во всех исследованных параметрах в одни и те же сутки; б) эти отклонения наблюдаются на станциях, находящихся в зоне подготовки конкретного землетрясения, но разнесенных друг от друга на несколько сотен километров. Однако при автоматической обработке ионограмм на современных цифровых ионозондах фиксируется лишь основное спорадическое образование, хотя в действительности могут существовать одновременно несколько слоев на разных высотах. При ручной обработке ионограмм выделяются все типы спорадических образований в области *E*, в том числе и высокие слои, появляющиеся достаточно редко. Определение высоты $h'Es$ спорадического слоя *E* очень важно, так как по ее максимальным отклонениям находилось время упреждения $\Delta T_{h'Es}$ момента землетрясения возможным краткосрочным ИПЗ в работе [Корсунова и Хегай, 2018]. С другой стороны, величина $foEs$ фиксируется достаточно надежно при любом способе обработки ионограмм и всегда приводится в таблицах наблюдений, если в данный час суток существует спорадический слой *E*, поэтому на заданном временном интервале дней можно

определить вероятность его появления PEs_i в каждый конкретный день i (здесь индекс i является порядковым номером дня на выбранном непрерывном временном интервале дней). Заранее неизвестно, смогут ли какие-либо суточные характеристики, связанные с $foEs$ и PEs_i , удовлетворить критериям выделения краткосрочных ИПЗ. Для ответа на этот вопрос необходимо сравнить результаты выделения возможных краткосрочных ИПЗ на основе вводимых ежесуточных характеристик Es с выявленными ранее ИПЗ в работе [Корсунова и Хегай, 2018] по ежечасным измерениям всех параметров Es для одних и тех же землетрясений.

Поэтому целью настоящего исследования является анализ изменений вводимых нами ежесуточных характеристик δPEs и ΔfEs_{Σ} , определенных ниже, перед сильными землетрясениями с магнитудами $M \geq 6.5$ по данным одновременных измерений на разнесенных НСВЗИ, удаленных друг от друга на несколько сотен километров и уже исследованных в работе [Корсунова и Хегай, 2018]. Такое рассмотрение позволит судить об эффективности использования этих характеристик Es для идентификации краткосрочных ионосферных предвестников готовящихся землетрясений с точки зрения методики их выделения.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрены данные измерений предельной частоты отражения от слоя Es , полученные при ручной и автоматической обработках ионограмм на нескольких разнесенных НСВЗИ, входящих в зону подготовки того или иного землетрясения. Использованы результаты наблюдений на четырех станциях: WAKKANAI (географические координаты $\varphi = 45.2^\circ \text{ N}$, $\lambda = 141.8^\circ \text{ E}$), KOKUBUNJI (географические координаты $\varphi = 35.7^\circ \text{ N}$, $\lambda = 139.5^\circ \text{ E}$), AKITA (географические координаты $\varphi = 39.7^\circ \text{ N}$, $\lambda = 140.1^\circ \text{ E}$), YAMAGAWA (географические координаты $\varphi = 31.2^\circ \text{ N}$, $\lambda = 130.5^\circ \text{ E}$) за 1972–2004 гг. Всего рассмотрено 19 землетрясений с магнитудами $M = 6.5–7.4$ из той группы, для которых ранее в работе [Корсунова и Хегай, 2018] были выделены возможные краткосрочные ИПЗ по ежечасным измерениям четырех ионосферных параметров: $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, $foF2$.

Обязательным условием отбора землетрясений в работе [Корсунова и Хегай, 2018] было отсутствие в течение подготовительного периода сильных геомагнитных возмущений, когда планетарный индекс $Kp \leq 3_0$. При этом ежечасные ионосферные данные анализировались за 4-дневный подготовительный период, включая день землетрясения. В данной работе для выделения возможных предвестников землетрясений апробируется использование интегральных суточных

характеристик Es . Поэтому с учетом спорадичности появления Es возникла необходимость увеличения продолжительности анализируемых периодов подготовки землетрясений до 10 сут. На таком увеличенном временном интервале очень часто наблюдаются значительные геомагнитные возмущения, поэтому нами были отобраны те землетрясения, для которых на большей части времени подготовительного периода отсутствовали геомагнитные возмущения с $Kp \geq 4_0$. Таких землетрясений с $M = 6.5–7.4$ оказалось 20.

Исходя из критерия идентификации КИПЗ, характеризующегося одновременным появлением аномальных отклонений в ионосферных параметрах на разнесенных (на сотни километров) НСВЗИ, входящих в зону подготовки конкретного землетрясения, необходимо было подобрать такие станции для каждого землетрясения.

Наиболее известной и устоявшейся оценкой радиуса зоны подготовки землетрясения на поверхности Земли относительно его эпицентра (в зависимости от магнитуды M) является теоретическая оценка, сделанная в работе [Dobrovolsky et al., 1979]. Согласно ей, этот радиус (ρ_D , км) определяется выражением $\rho_D = 10^{0.43M}$ и при выводе ее предполагается стремление к нулю глубины гипоцентра землетрясения. Но, как указано в монографии [Сидорин, 1992], во-первых, анализ экспериментальных данных показывает, что имеется весьма большое количество примеров наблюдения предвестников землетрясений на значительно большем удалении от эпицентров землетрясений. Во-вторых, существенно лучшие результаты дает оценка размеров зон проявления предвестников землетрясений в твердой Земле, полученная им с коллегами на основании анализа экспериментальных данных о деформационных предвестниках землетрясений при том же самом пороговом уровне их обнаружения, что и в работе [Dobrovolsky et al., 1979]. Согласно ей, радиус зоны проявления возможных предвестников землетрясения (ρ_S , км), может быть представлен формулой $\rho_S = 10^{0.48M}$. При этом такая зависимость значительно лучше, чем другие, согласуется с экспериментальными данными, относящимися к северо-западной части Тихоокеанского сейсмического пояса. Именно землетрясения этого региона изучаются и в нашей работе. К тому же называется (см. монографию [Апродов, 2000]), что чем глубже расположен очаг землетрясения, тем большую территорию охватывают сейсмические проявления при равной энергии землетрясения.

Таким образом, нами в качестве *основного критерия отбора землетрясений для анализа было принято условие $R_e \leq \rho_S$* (здесь R_e – расстояния от эпицентров до НСВЗИ по дуге большого круга, в км). Далее, известно, что все станции, кроме ст. АКІТА, удалены друг от друга на расстояния,

превышающие 900 км, так что для части отобранных землетрясений $R_e > \rho_D$. Наблюдения на ст. АКІТА были прекращены в 1993 г., поэтому для землетрясений после этого года в зоне подготовки по Добровольскому ($R_e \leq \rho_D$) чаще всего оказывалась одна станция, другие – за ее пределами. Поэтому для каждого из отобранных землетрясений ионосферные данные анализировались для двух разнесенных станций с наиболее близкими эпицентрными расстояниями, **по крайней мере, одна из которых находилась в зоне подготовки конкретного землетрясения и по Добровольскому**. В результате из двадцати землетрясений одно было исключено, так как обе станции оказались вне зоны подготовки землетрясения по Добровольскому.

Выявление предвестниковых эффектов в ионосфере производится обычно на основе анализа отклонений тех или иных параметров от медианных или средних значений для определенного промежутка времени. В данном случае рассматривались отклонения от медиан двух параметров PEs и $foEs$ в течение 10 дней до каждого землетрясения плюс день самого землетрясения для отобранных пар НСВЗИ, входящих в зону подготовки того или иного землетрясения. На первом этапе по табличным данным ежечасных измерений $foEs$ вычислялись $PEs_i = NEs_i/n_i$, где NEs_i – число появлений Es в конкретные сутки, n_i – число реально проведенных сеансов измерений в эти же сутки, при этом $1 \leq n_i \leq 24$, $a_i \in [-10, 0]$. Для сопоставления данных разных станций, где геофизические условия образования Es могут различаться, вычислялись отклонения реальных PEs_i от их медианных значений за одиннадцатидневный период: $\delta PEs_i = PEs_i - PEs_{med}$ для каждого землетрясения.

Алгоритм вычисления отклонений в $foEs$ отличается от описанного выше, т.к. необходимо было исключить зависимость $foEs$ от местного времени при дальнейшем рассмотрении данных разных станций. Поэтому сначала для каждого часа суток (индекс j) находилась медиана распределения $f_{med}Es_j$ для исследуемого периода времени в 11 сут, а затем – отклонения от нее конкретных ежечасных значений: $\Delta_j fEs = foEs_j - f_{med}Es_j$ (индекс $j \in [0, 23]$), если для данного часа конкретных суток имеется значение $foEs_j$ и $f_{med}Es_j$. В случае, когда значение $foEs_j$ и/или $f_{med}Es_j$ отсутствует для заданного часа суток, $\Delta_j fEs$ остается неопределенной, и эта разность не учитывалась при определении суммарного (интегрального) взвешенного суточного отклонения. Далее, для каждого дня вычислялись средневзвешенные суммарные (интегральные) суточные отклонения ΔfEs_{Σ} , по формуле

$$\Delta fEs_{\Sigma} = [\Delta_1 fEs + \Delta_2 fEs + \dots + \Delta_{23} fEs] / n_i, \quad (2)$$

где n_i – число учтенных значений $\Delta_j fEs$ в конкретных сутках i .

Пример изменений указанных величин δPEs_i (в процентах) и ΔfEs_{Σ} приведен на рис. 1 для землетрясения 31.10.2003 г. с $M = 7.0$. Каждая точка на графиках соответствует значению параметра в конкретные сутки, отсчитываемые от дня землетрясения (0 день) по японскому стандартному времени JST = UT + 9 ч. Стрелкой показан день землетрясения, зачерненным эллипсом отмечены максимумы в изменениях отклонений рассматриваемых параметров, которые наблюдаются в одни и те же сутки для обоих параметров на двух разнесенных НСВЗИ.

Как следует из рисунка, максимальные отклонения в параметрах δPEs и ΔfEs_{Σ} наблюдаются накануне землетрясения и в середине исследуемого подготовительного периода, но различаются по своей продолжительности. Анализ ежечасных изменений ионосферных параметров, проведенный в работе [Корсунова и Хегай, 2018] показал, что эффекты, связанные с подготовкой землетрясения, длятся 2–3 ч и появляются в течение одних суток. Поэтому только один максимум на рис. 1 продолжительностью в одни сутки может быть связан с подготовкой землетрясения. Именно день его появления определяет время упреждения им момента землетрясения, обозначенное нами здесь (*и далее везде*) как $\Delta T_{\delta PEs}$. Максимумы в изменениях суточных характеристик Es продолжительностью более одних суток обусловлены другими геофизическими факторами, связанными с природой образования среднеширотного спорадического слоя E , и могут превышать предвестниковые эффекты. Поэтому абсолютная величина отклонений в характеристиках Es в максимумах накануне землетрясения не может служить критерием выделения краткосрочного ионосферного предвестника. Им является совпадение времен появления максимумов в обоих параметрах δPEs и ΔfEs_{Σ} на двух пунктах наблюдения, удаленных друг от друга на несколько сотен километров в соответствии с критериями, предложенными в работе [Корсунова и Хегай, 2018].

В приведенной ниже табл. 1 представлены характеристики всех 19 рассмотренных землетрясений (магнитуды M , радиусы зон подготовки ρ_D по Добровольскому [Dobrovolsky et al., 1979] и ρ_S по Сидорину [Сидорин, 1992] в км, расстояния от эпицентров до НСВЗИ R_e в км. Нижний индекс “+” у чисел в колонке для R_e отмечает случаи, когда $R_e > \rho_D$), а также времена упреждения выделенными ИПЗ дня землетрясения ($\Delta T_{\delta PEs}$, сут). Для сравнения там же приведены времена упреждения ($\Delta T_{h'Es}$, сут), полученные ранее для тех же землетрясений по ежечасным отклонениям действующей высоты $h'Es$ из работы [Корсунова и

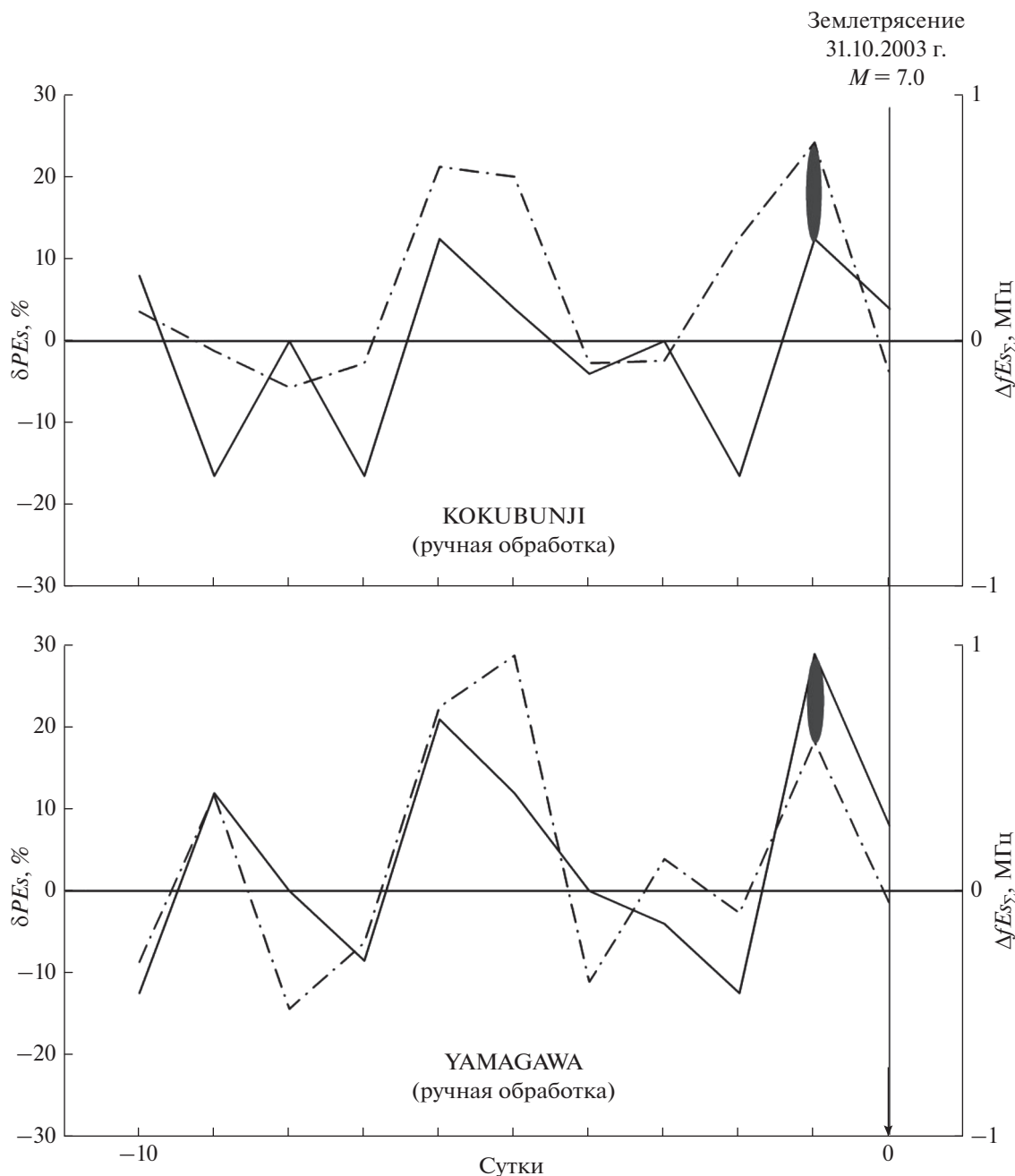


Рис. 1. Изменения суточных параметров δPEs (левая ось ординат, сплошные линии) и ΔfEs_{Σ} (правая ось ординат, штрихпунктирные линии) на временном интервале в одиннадцать суток, включая день землетрясения 31.10.2003 г. с магнитудой $M = 7.0$, на НСВЗИ KOKUBUNJI ($R_e \approx 360$ км, верхняя панель) и YAMAGAWA ($R_e \approx 1300$ км, нижняя панель). День землетрясения отмечен вертикальной линией со стрелкой. Вероятные КИПЗ отмечены заштрихованными эллипсами.

Хегай, 2018]. Видно, что времена упреждения, определенные двумя методами, совпадают с точностью до суток для большинства землетрясений с $M = 6.5-7.0$. Заблаговременность появления краткосрочного предвестника (время упреждения!) для землетрясений с $M < 7.2$ в основном не превышает 1 сут, но возрастает для более сильных землетрясений. Кроме того, для землетрясений с

$M > 7.2$ по рассмотренным суточным характеристикам спорадического слоя E обнаруживаются более ранние появления ИПЗ по сравнению с полученными по ежечасным изменениям четырех ионосферных параметров $h'Es$, $foEs$, $fbEs$, $foF2$. Также можно отметить, что иногда эффекты подготовки землетрясений (увеличение δPEs и ΔfEs_{Σ})

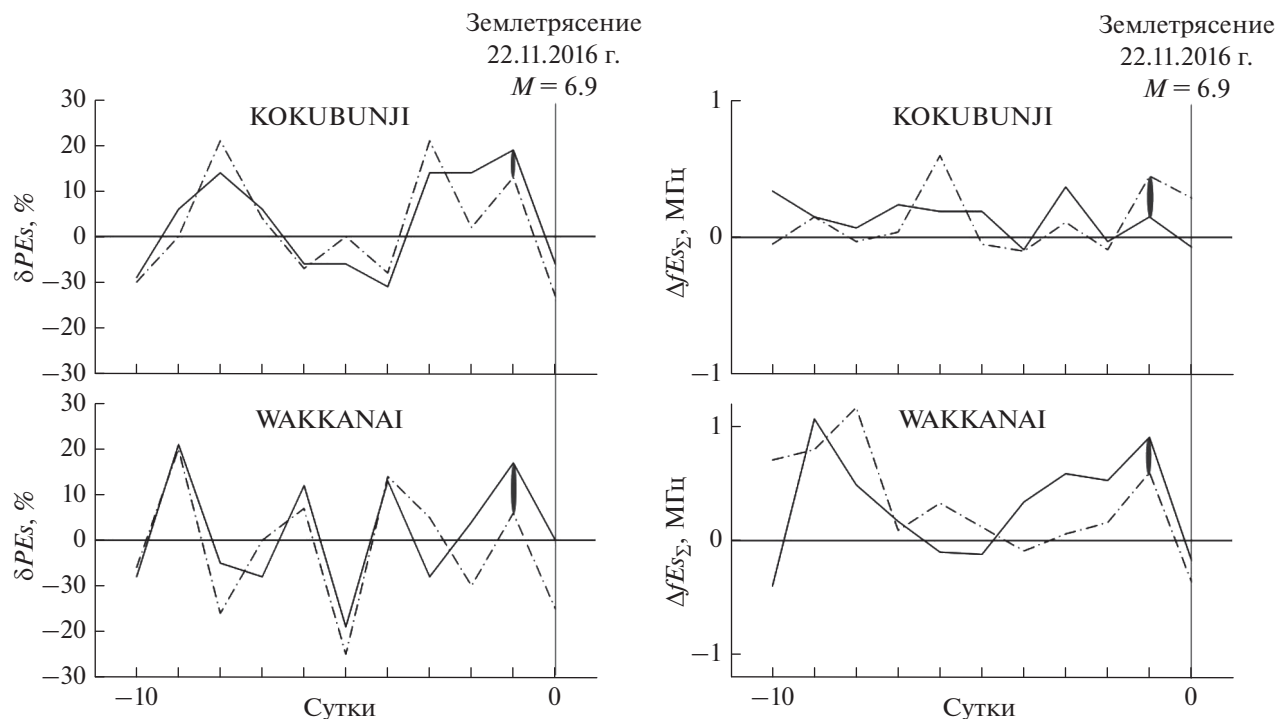


Рис. 2. Изменения суточных параметров δPEs и ΔfEs_{Σ} на временном интервале в одиннадцать суток, включая день землетрясения 22.11.2016 г. с магнитудой $M = 6.9$, на НСВЗИ KOKUBUNJI ($R_e \approx 250$ км, верхние панели) и WAKKANAI ($R_e \approx 770$ км, нижние панели). Сплошные линии соответствуют величинам, полученным в результате ручной обработки соответствующих ионограмм, а штрихпунктирные – автоматической. День землетрясения отмечен вертикальной линией со стрелкой. Вероятные КИПЗ отмечены заштрихованными эллипсами.

выявляются и на НСВЗИ, отстоящих от эпицентров на расстояния, превышающие радиус зоны подготовки землетрясения по Добровольскому.

Проведенный выше анализ базируется на многолетних данных ручной обработки ионограмм в соответствии с Международной инструкцией [Руководство ..., 1977]. Однако в настоящее время большинство НСВЗИ оснащено цифровыми ионозондами с автоматической обработкой ионограмм, при которой часто фиксируется лишь один параметр спорадического слоя $E - foEs$.

Необходимо сравнить два способа обработки ионограмм (ручной и автоматический), чтобы убедиться в адекватности результатов выделения ИПЗ по их данным. С этой целью нами были рассмотрены данные измерений Es , обработанные двумя способами, на ст. KOKUBUNJI ($R_e = 250$ км) и WAKKANAI ($R_e = 770$ км) в период подготовки землетрясения 22.11.2016 г. с $M = 6.9$, произошедшего в спокойных геомагнитных условиях. Здесь R_e – расстояние от эпицентра землетрясения до соответствующей НСВЗИ.

В соответствии с методикой, изложенной выше, для периода в 10 сут, предшествующих толчку, плюс день землетрясения, рассчитывались параметры δPEs и ΔfEs_{Σ} . Полученные результаты представлены на рис. 2, из которого следует, что

изменения каждого из параметров по данным ручной и автоматической обработки ионограмм за рассматриваемый период времени подобны, хотя величины их различаются. Можно отметить совпадение времени появления максимумов в ежесуточных изменениях обоих параметров накануне землетрясения, что характерно для землетрясений с $M = 6.8 - 7.0$ (см. табл. 1). Эти максимумы наблюдаются в одни и те же сутки на станциях, удаленных друг от друга на ~ 500 км, а это является признаком появления КИПЗ согласно работе [Корсунова и Хегай, 2018].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнительный анализ данных ручной и автоматической обработки ионограмм НСВЗИ показал, что имеются некоторые различия в поведении интегральных суточных параметров Es , особенно заметные накануне землетрясения. Эти различия обусловлены тем, что при ручной обработке ионограмм фиксируются все (даже слабые) отражения от Es , а при автоматической обработке – наиболее интенсивные спорадические образования. Так как перед землетрясением возрастает общее число появлений Es , как отмечалось в работе [Blaunstein and Hayakawa, 2009], то $\delta PEs_{\text{ручн}} \geq \delta PEs_{\text{авт}}$. Следует отметить, что максимум δPEs

Таблица 1. Параметры рассмотренных землетрясений и соответствующие им времена упреждений $\Delta T_{\delta PE_s}$ и $\Delta T_{h'Es}$ возможных ионосферных предвестников землетрясений, появляющихся на выбранных парах НСВЗИ

<i>M</i>	Дата и время землетрясения	Географ. координаты эпицентра	НСВЗИ	Эпицентр. расстояние R_e от НСВЗИ, км	ρ_D , км	ρ_S , км	$\Delta T_{\delta PE_s}$, сут	$\Delta T_{h'Es}$, сут
6.5	14.01.1978 г. 03:25 UT	34.81° N 139.26° E	КОК АКИ	100 550	620 620	1320 1320	1.0	1.0
6.5	29.05.2004 г. 20:56 UT	34.25° N 141.41° E	КОК WAK	240 1240 ₊	620 620	1320 1320	1.0	0.6
6.6	07.02.1993 г. 13:28 UT	37.63° N 137.24° E	КОК АКИ	290 340	690 690	1470 1470	1.0	0.5
6.6	23.10.2004 г. 08:56 UT	37.23° N 138.78° E	КОК WAK	180 920 ₊	690 690	1470 1470	2.0	1.2
6.7	16.02.1996 г. 15:21 UT	37.35° N 142.38° E	КОК WAK	320 900 ₊	760 760	1640 1640	1.0	1.0
6.7	08.10.2003 г. 09:07 UT	42.65° N 144.57° E	КОК WAK	890 ₊ 360	760 760	1640 1640	1.0	1.1
6.8	06.12.2004 г. 14:15 UT	42.9° N 145.25° E	КОК WAK	940 ₊ 380	840 840	1840 1840	1.0	1.3
6.8	16.08.2005 г. 02:46 UT	38.24° N 142.03° E	КОК WAK	360 770	840 840	1840 1840	1.0	1.0
6.9	10.06.1975 г. 13:47 UT	43.03° N 147.73° E	АКИ WAK	740 550	930 930	2050 2050	1.0	1.2
6.9	18.07.1992 г. 08:37 UT	39.42° N 143.33° E	АКИ WAK	280 680	930 930	2050 2050	2.0	1.5
7.0	06.01.1995 г. 22:38 UT	40.25° N 142.18° E	КОК WAK	560 570	1020 1020	2290 2290	1.0	1.0
7.0	31.10.2003 г. 01:06 UT	37.8° N 142.62° E	КОК YAM	360 1320 ₊	1020 1020	2290 2290	1.0	1.2
7.0	28.11.2004 г. 18:32 UT	43.0° N 145.12° E	КОК WAK	940 360	1020 1020	2290 2290	1.0	0.7
7.1	29.02.1972 г. 09:23 UT	33.13° N 140.8° E	КОК АКИ	310 740	1130 1130	2560 2560	1.0	1.0
7.1	18.10.1975 г. 10:37 UT	27.93° N 130.18° E	YAM КОК	370 1230 ₊	1130 1130	2560 2560	2.0	1.0
7.3	01.11.1989 г. 18:26 UT	39.84° N 142.7° E	КОК АКИ	540 230	1380 1380	3190 3190	4.0	1.4
7.3	25.09.2003 г. 21:08 UT	41.8° N 143.6° E	КОК WAK	760 400	1380 1380	3190 3190	2.0	1.5
7.4	23.03.1978 г. 03:15 UT	44.0° N 148.0° E	WAK АКИ	520 810	1520 1520	3560 3560	4.0	2.2
7.4	05.09.2004 г. 14:57 UT	33.2° N 137.1° E	КОК YAM	360 650	1520 1520	3560 3560	3.0	1.5

Примечание: Нижний индекс "+" у чисел в колонке для R_e отмечает случаи, когда $R_e > \rho_D$.

накануне землетрясения на НСВЗИ WAKKANAI (см. рис. 2), наблюдаемый при автоматической обработке данных, выражен очень слабо, хотя по времени своего появления он совпадает с макси-

мумом δPE_s , наблюдаемым при ручной обработке данных. Возможно, это связано с тем, что НСВЗИ WAKKANAI находится вблизи границы зоны подготовки данного землетрясения. Следова-

тельно, наиболее полные сведения об изменениях в E_s в период подготовки землетрясений можно получить лишь при ручной обработке ионограмм НСВЗИ. Тем не менее, на заключительной фазе подготовки сильных землетрясений с $M \geq 7.0$ (см. рис. 1), характеризующейся появлением интенсивных спорадических образований, автоматическая обработка данных ионосферных измерений позволяет выделять возможные краткосрочные предвестники готовящегося сейсмического события. Кроме того, для более корректного выделения КИПЗ по данным разнесенных НСВЗИ желательно, чтобы расстояние между станциями по широте не превышало 5° , т.е. станции находились бы в одной и той же широтной зоне, где геофизические условия образования E_s близки (см., например, рис. 1, разд. 2). В этом случае ежесуточные характеристики δPEs и ΔfEs_Σ , полученные по измерениям на цифровых ионозондах, наиболее полно отражают изменения в E_s , присущие КИПЗ. Полученные результаты позволяют считать измерения цифровыми ионозондами ионосферных характеристик важным дополнением к комплексным многопараметрическим наблюдениям нижней ионосферы, особенно в сейсмоактивных регионах.

Анализ изменений в параметрах E_s перед всеми рассмотренными землетрясениями (см. табл. 1) показывает, что ежесуточные характеристики δPEs и ΔfEs_Σ возрастают накануне землетрясений с магнитудами $6.5 \leq M \leq 7.2$ (см., например, рис. 1). Этот рост характеризуется появлением положительного экстремума в поведении δPEs за день до толчка, совпадающего с локальным максимумом ΔfEs_Σ . Следует отметить, что увеличение δPEs накануне землетрясения на широтах $35^\circ-45^\circ$ N составляет $\sim 10-20\%$ для магнитуд $M = 6.8-7.4$, а отклонения ΔfEs_Σ достигают $0.6-0.8$ МГц, что составляет $\approx 15-20\%$ от среднесуточных медианных значений $foEs$ за рассматриваемый период времени. Подчеркнем, что максимумы δPEs и ΔfEs_Σ перед землетрясениями отмечаются в одни и те же сутки на двух НСВЗИ, удаленных друг от друга на сотни километров. Этот факт соответствует критерию идентификации КИПЗ готовящегося сильного землетрясения, который основывается на появлении аномальных изменений ионосферных параметров в одни и те же сутки, на НСВЗИ, разнесенных на сотни километров, согласно выводам Корсуновой и Хегай [2018]. Следовательно, ежесуточные характеристики δPEs и ΔfEs_Σ можно отнести к группе ранее изученных параметров $h'Es$, $foEs$ и $fbEs$, используемых для идентификации краткосрочных ионосферных предвестников в E -области ионосферы.

Более того, анализ данных ионозондов дальневосточных НСВЗИ Магадан ($R_e \approx 800$ км) и Хабаровск ($R_e \approx 1500$ км) перед Камчатским землетря-

сением 30.01.2016 г. с $M = 7.2$ позволил обнаружить появление максимумов вероятности PEs в одни и те же сутки накануне землетрясения на обеих станциях, отстоящих от эпицентра землетрясения более чем на 700 км. Увеличение PEs составляло $\sim 20\%$, что соответствует данным, полученным для японских НСВЗИ в том же Тихоокеанском регионе (см. выше).

Отметим также, что близость времен упреждения моментов землетрясений $\Delta T_{\delta PEs}$ и $\Delta T_{h'Es}$ накануне главного удара (см. табл. 1), свидетельствует о том, что максимумы δPEs и $h'Es$ наблюдаются в одни и те же сутки. Можно предположить, что появление большего количества спорадических слоев в течение суток перед землетрясением происходит и на высотах, превышающих обычные уровни образования E_s на средних широтах. Так, образование высоколежащих слоев E_s перед землетрясением по сравнению с обычными условиями согласуется с выводами теоретических расчетов в работах [Ким и др., 1993; Xu et al., 2020]. Из этих работ следует, что высоколежащие спорадические слои на средних широтах могут образовываться в результате проникновения в ионосферу сейсмогенного электрического поля.

4. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы.

1. Ежесуточные характеристики δPEs и ΔfEs_Σ , полученные по данным одновременных измерений на двух НСВЗИ, разнесенных на сотни километров друг от друга, позволяют выделить возможные КИПЗ готовящегося землетрясения. Полученные в работе времена упреждения ими моментов землетрясений близки к определенным ранее временам упреждения для тех же землетрясений по ежечасно измеряемым параметрам $h'Es$, $foEs$, $fbEs$ и составляют примерно сутки для землетрясений с магнитудами $M = 6.5-7.2$. При этом возможные КИПЗ иногда наблюдаются вне зоны подготовки землетрясения, если ее размеры определены по Добровольскому.

2. Данные автоматической обработки ионограмм современными цифровыми ионозондами менее полно отражают состояние спорадических образований в E -области ионосферы в период подготовки землетрясений, фиксируя лишь наиболее интенсивные слои. Тем не менее, они все же позволяют идентифицировать КИПЗ по максимумам изменений характеристик δPEs и ΔfEs_Σ .

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность National Institute of Information and Communications Technology (НИИТ,

Japan) за предоставление доступа к ионосферным данным, а также В.В. Хегаю за полезное обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Апродов В.А.* Зоны землетрясений. М.: Мысль, 461 с. 2000.
- *Бычков В.В., Корсунова Л.П., Смирнов С.Э., Хегай В.В.* Аномалии в ионосфере и электричестве приземного слоя атмосферы перед Камчатским землетрясением 30.01.2016 г. по данным обсерватории “ПАРАТУНКА” // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 4. С. 532–540. 2017.
- *Зубков С.И.* Времена возникновения предвестников землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 5. С. 87–91. 1987.
- *Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В.* О возможности образования слоя ионов металлов в Е-области ночной среднеширотной ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 33. № 5. С. 114–119. 1993.
- *Корсунова Л.П., Хегай В.В.* Возможные краткосрочные предвестники сильных коровых землетрясений в Японии по данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 1. С. 94–101. 2018.
- *Липеровская Е.В., Похотелов О.А., Олейник М.А., Алимов О.А., Павлова С.С., Хакимова М.* Некоторые эффекты в спорадическом слое Е-ионосферы перед землетрясением // Физика Земли. № 11. С. 86–88. 1994.
- *Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л.* Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 303 с. 1992.
- *Насыров Г.А.* О связи эмиссий ночного неба с сейсмической активностью // Изв. АН Туркм. ССР, сер. физ.-техн., хим. геол. наук. № 2. С. 119–122. 1978.
- *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Давиденко Д.В., Дудкин С.А., Цадиковский Е.И.* Прогноз землетрясений возможен?! М.: Тривант, 144 с. 2014.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 343 с. 1977.
- *Руленко О.П.* Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. № 4. С. 57–68. 2000.
- *Сидорин А.Я.* Предвестники землетрясений. М.: Наука, 192 с. 1992.
- *Alimov O.A., Roubtsov L.N., Gokhberg M.B., Liperovskaya E.V., Gufeld I.L., Liperovsky V.A.* Anomalous characteristics of the middle latitude Es layer before earthquakes // Phys. Earth Planet. In. Т. 57. № 1–2. С. 76–81. 1989.
- *Blaunstein N., Hayakawa M.* Short-term ionospheric precursors of earthquake using vertical and oblique ionosondes. V. 34. Iss. 6–7. P. 496–507. 2009.
- *Chen Y.-I., Liu J.-Y., Tsai Y.-B., Chen C.-S.* Statistical tests for pre-earthquake ionospheric anomaly // Terr. Atmos. Ocean. Sci. J. V. 15. № 3. P. 385–396. 2004.
- *Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I.* Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pure Appl. Geophys. V. 117. Iss. 5. P. 1025–1044. 1979.
- *Hobara Y., Parrot M.* Ionospheric perturbation in association with seismic activity. A statistical study // XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science. Commission E URSI GA 2002 – Oral and Poster Sessions. EGH P.10 (570). Maastricht, the Netherlands, 17–24 August 2002. www.ursi.org/Proceedings/Proc-GA02/papers/p0570.pdf. 2002.
- *Korsunova L.P., Khagai V.V.* Medium-term ionospheric precursors to strong earthquakes // Int. J. Geomagn. Aeron. V. 6. Iss. 3. G13005. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005GI000122>
- *Korsunova L.P., Hegai V.V.* Ionospheric precursors of crustal earthquakes in the northwestern part of the Asia-Pacific seismic belt // The J. Open Transactions on Geosciences (GEOS). V. 1. № 1. P. 25–33. 2014.
- *Korsunova L.P., Hegai V.V.* Effectiveness criteria for methods of identifying ionospheric earthquake precursors by parameters of a sporadic E-layer and regular F2-layer // J. Astronomy and Space Sciences. V. 32. № 2. P. 137–140. 2015. <https://doi.org/10.5140/JASS.2015.32.2.137>
- *Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S.* A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly // J. Geophys. Res. V. 111. A05304. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JA011333>
- *Ondoh T.* Seismo-ionospheric phenomena // Adv. Space Res. V. 26. Iss. 8. P. 1267–1272. 2000.
- *Ondoh T.* Investigation of precursory phenomena in the ionosphere, atmosphere and groundwater before large earthquakes of $M > 6.5$ // Adv. Space Res. V. 43. № 2. P. 214–223. 2009.
- *Ouzounov D., Freund F.T.* Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // Adv. Space Res. V. 33. Iss. 3. P. 268–273. 2004.
- *Parrot M., Berthelier J.J., Lebreton J.P., Sauvaud J.A., Santoli’k O., Blecki J.* Examples of unusual ionospheric observations made by the DEMETER satellite over seismic regions // Phys. Chem. Earth. Parts A/B/C. V. 31. № 4. P. 486–495. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.02.011>
- *Perrone L., Korsunova L.P., Mikhailov A.V.* Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy // Ann. Geophysicae. V. 28. № 4. P. 941–950. 2010.
- *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A.* Ionospheric precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 315 p. 2004.
- *Sarkar S., Gwal A.K., Parrot M.* Ionospheric variations observed by the DEMETER satellite in the mid-latitude region during strong earthquakes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 69. № 13. P. 1524–1540. 2007.
- *Saroso S., Liu J.Y., Hattori K., Chen C.H.* Ionospheric GPS TEC anomalies and $M \geq 5.9$ earthquakes in Indonesia during 1993–2002 // Terr. Atmos. Ocean. Sci. V. 19. № 5. P. 481–488. 2008. [https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.5.481\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.5.481(T))
- *Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V.* Ionospheric phenomena before strong earthquakes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. V. 1. № 3. P. 113–118. 2001.
- *Xia C., Yang S., Xu G., Zhao B., Yu T.* Ionospheric anomalies observed by GPS TEC prior to the Qinghai Tibet region earthquakes // Terr. Atmos. Ocean. Sci. V. 22. № 2. P. 177–185. 2011. [https://doi.org/10.3319/TAO.2010.08.13.01\(TibXS\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2010.08.13.01(TibXS))
- *Xu T., Hu Y., Deng Z., Zhang Y., Wu J.* Revisit to sporadic E layer response to presumably seismogenic electrostatic fields at middle latitudes by model simulation // J. Geophys. Res. – Space. V. 125. e2019JA026843. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JA026843>