

УДК 550.510.535

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ $foF2$ НАД ЯПОНИЕЙ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ 9 МАРТА 2011 г.

© 2013 г. В. В. Хегай, А. Д. Легенька, В. П. Ким

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк, г. Москва
e-mail: hegai@izmiran.rssi.ru

Поступила в редакцию 22.08.2011 г.
После доработки 13.07.2012 г.

По данным японских станций ионосферного зондирования Кокубунжи и Вакканай проведен анализ вариаций критической частоты $foF2$ перед сильными землетрясениями, произошедшими в Японии 9 и 11 марта 2011 г. с магнитудой $M = 7.2$ и 9.0 соответственно. Получено, что примерно за сутки до первого землетрясения наблюдались значительные положительные возмущения $foF2$. При этом на достаточно удаленной от эпицентров землетрясений (~ 3300 км) контрольной ионосферной станции Иркутск за аналогичный период наблюдения значимых возмущений $foF2$ выявлено не было. Это дает основание предполагать, что наблюдавшиеся на ст. Кокубунжи и Вакканай эффекты увеличения $foF2$ возможно были обусловлены процессами, связанными с подготовкой землетрясения. Сейсмо-ионосферные проявления более мощного землетрясения 11 марта 2011 г., если они и были, маскируются эффектами геомагнитной бури.

DOI: 10.7868/S0016794013040093

1. ВВЕДЕНИЕ

К одной из сложнейших проблем геофизики, безусловно, относится проблема существования и выявления предвестников сильных землетрясений. В изучении этой проблемы особое место занимают поиски различных эффектов, которые возможно проявляются перед землетрясениями в околоземном космическом пространстве, в частности, в поведении параметров ионосферной плазмы. В последние три десятилетия на этом направлении попытки, вначале эпизодические, переросли к настоящему времени в систематические исследования, которые включают как наземные, так и спутниковые измерения. Подробный обзор литературы по ионосферным предвестникам землетрясений представлен в монографии [Pulinets and Boyarchuk, 2004]. После выхода ее в свет был опубликован еще целый ряд работ, например, [Zhao et al., 2008; Liu et al., 2006, 2009, 2010; Dabas et al., 2007; Akhoondzadeh et al., 2010; Oyama et al., 2011]. Несмотря на многочисленные морфологические исследования по обнаружению возможных ионосферных предвестников землетрясений, проблема далека от своего разрешения. В частности, еще недостаточно накопленного наблюдательного материала, особенно по экстремальным землетрясениям с магнитудой 8 и более, поскольку такие землетрясения случаются довольно редко. Таким образом, необходимо детально изучать каждый случай таких землетрясений на предмет выявления ионосферных предвестников для по-

полнения базы знания до уровня, который позволит сделать убедительное заключение по данной проблеме.

В настоящей работе проведен анализ поведения ионосферы в области максимума слоя $F2$ перед сильными землетрясениями, произошедшими в Японии 9 и 11 марта 2011 г., на основе данных ежечасных измерений критической частоты $foF2$ на ближайших к эпицентрам этих землетрясений японских станциях наземного зондирования ионосферы Кокубунжи и Вакканай, расположенных соответственно на расстоянии ~ 400 и 750 км от эпицентров, с целью выявления возможных ионосферных аномалий, предшествующих землетрясениям. В качестве контрольных использовались данные ионосферной ст. Иркутск, находящейся в соседнем долготном секторе, и удаленной от эпицентров землетрясений на расстояние свыше 3300 км по дуге большого круга. Землетрясение 9 марта 2011 г. (координаты эпицентра: $\varphi_e = 38.44^\circ$ N; $\lambda_e = 142.84^\circ$ E, момент толчка $t = 02:45$ UT, глубина гипоцентра $h = 32$ км, магнитуда $M = 7.2$) было форшоком катастрофического землетрясения 11 марта 2011 г. (координаты эпицентра: $\varphi_e = 38.3^\circ$ N; $\lambda_e = 142.37^\circ$ E, момент толчка $t = 05:46$ UT, глубина гипоцентра $h = 32$ км, магнитуда $M = 9.0$). Следует отметить, что в радиусе 2000 км от эпицентров этих землетрясений других коровых землетрясений ($h \leq 60$ км) с магнитудой $M \geq 6.0$ не отмечалось с начала февраля 2011 г., т.е. более месяца.

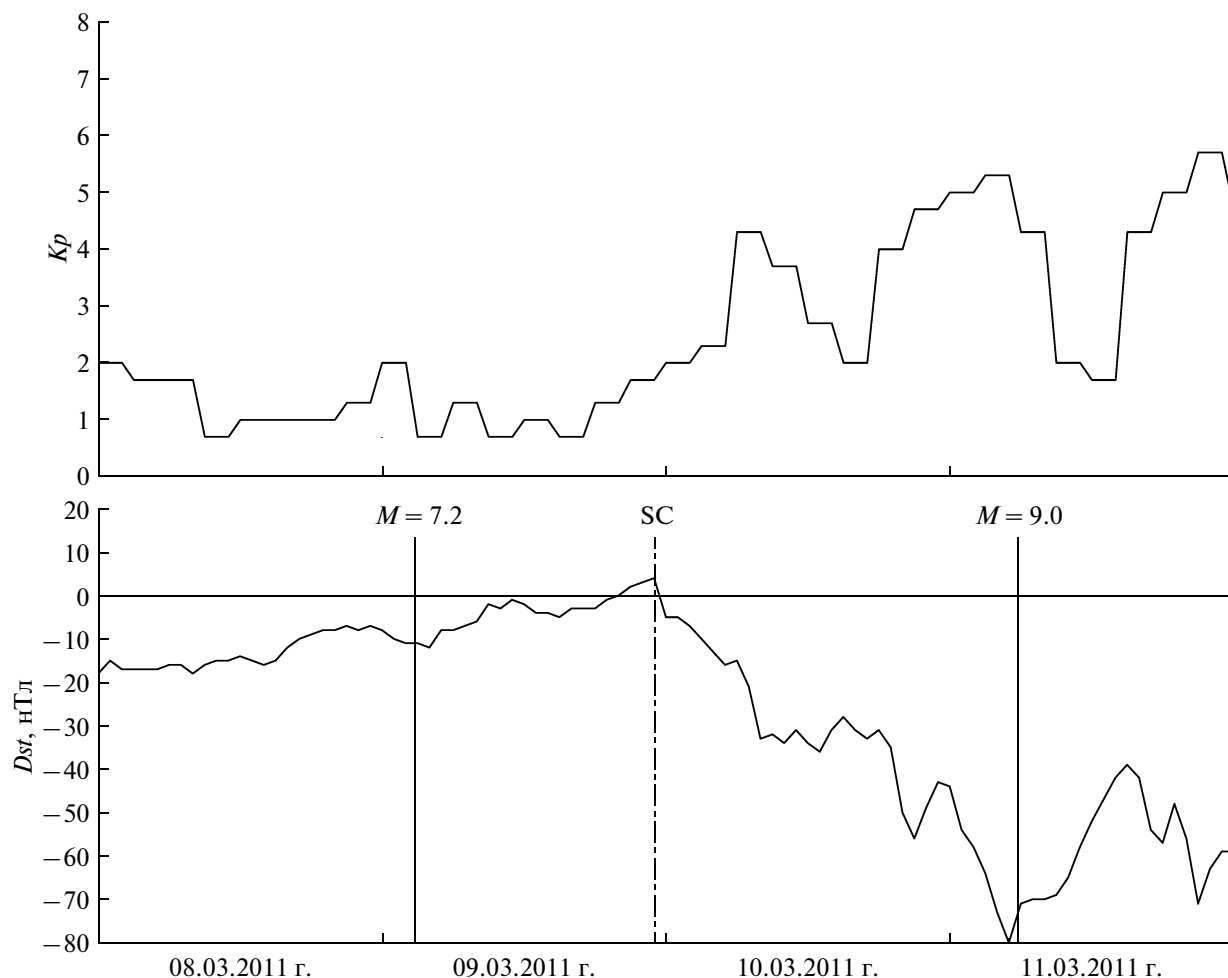


Рис. 1. Изменения Kp - (верхняя панель) и Dst - (нижняя панель) индексов с 08.03.2011 г. по 11.03.2011 г. Вертикальные сплошные линии на нижней панели отмечают моменты землетрясений соответствующей магнитуды, вертикальная штрихпунктирная линия – внезапное начало геомагнитной бури (SC).

2. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

На рисунке 1 показано поведение Kp - и Dst -индексов, характеризующих геомагнитную активность в интервале времени с 08.03.2011 по 11.03.2011. Вертикальными сплошными линиями отмечены моменты землетрясений. Штрих-пунктиром показано время внезапного начала магнитной бури (SC).

Видно, что с начала дня 08.03.2011 до конца 09.03.2011 геомагнитная активность была довольно низкой. Значения трехчасового Kp -индекса ≤ 2 на этом временном отрезке, а Dst -индекса – в пределах от -20 до $+5$ нТл, при этом 9.03.2011 в 23:00 UT начинается магнитная буря ($Dst_{\min} = -80$ нТл в 05:00 UT 11.03.2011). Таким образом, день, предшествующий первому землетрясению ($M = 7.2$) и сам день первого из рассматриваемых землетрясений, были геомагнитно-спокойными. Второй подземный толчок ($M = 9.0$) произошел на возмущенном геомагнитном фоне, при значениях $Kp \approx 5$ вблизи

времени экстремума магнитной бури по Dst -индексу.

3. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 2 приведены изменения $foF2$ по мировому времени UT (сплошные линии), наблюдавшиеся в интервале с 08.03.2011 г. по 11.03.2011 г. на станциях Кокубунжи (географические координаты: $\varphi = 35.71^\circ \text{ N}$; $\lambda = 139.49^\circ \text{ E}$, верхняя панель), Вакканай ($\varphi = 45.16^\circ \text{ N}$; $\lambda = 141.75^\circ \text{ E}$, средняя панель) и Иркутск ($\varphi = 52.47^\circ \text{ N}$; $\lambda = 104.03^\circ \text{ E}$, нижняя панель). Пунктирные линии показывают медианы, а штриховые линии отмечают величины верхней и нижней границ соответствующих размахов. Расчет этих параметров был выполнен для временного интервала с 22.02.2011 г. по 31.03.2011 г. по всем геомагнитно-спокойным дням, в течение которых величина

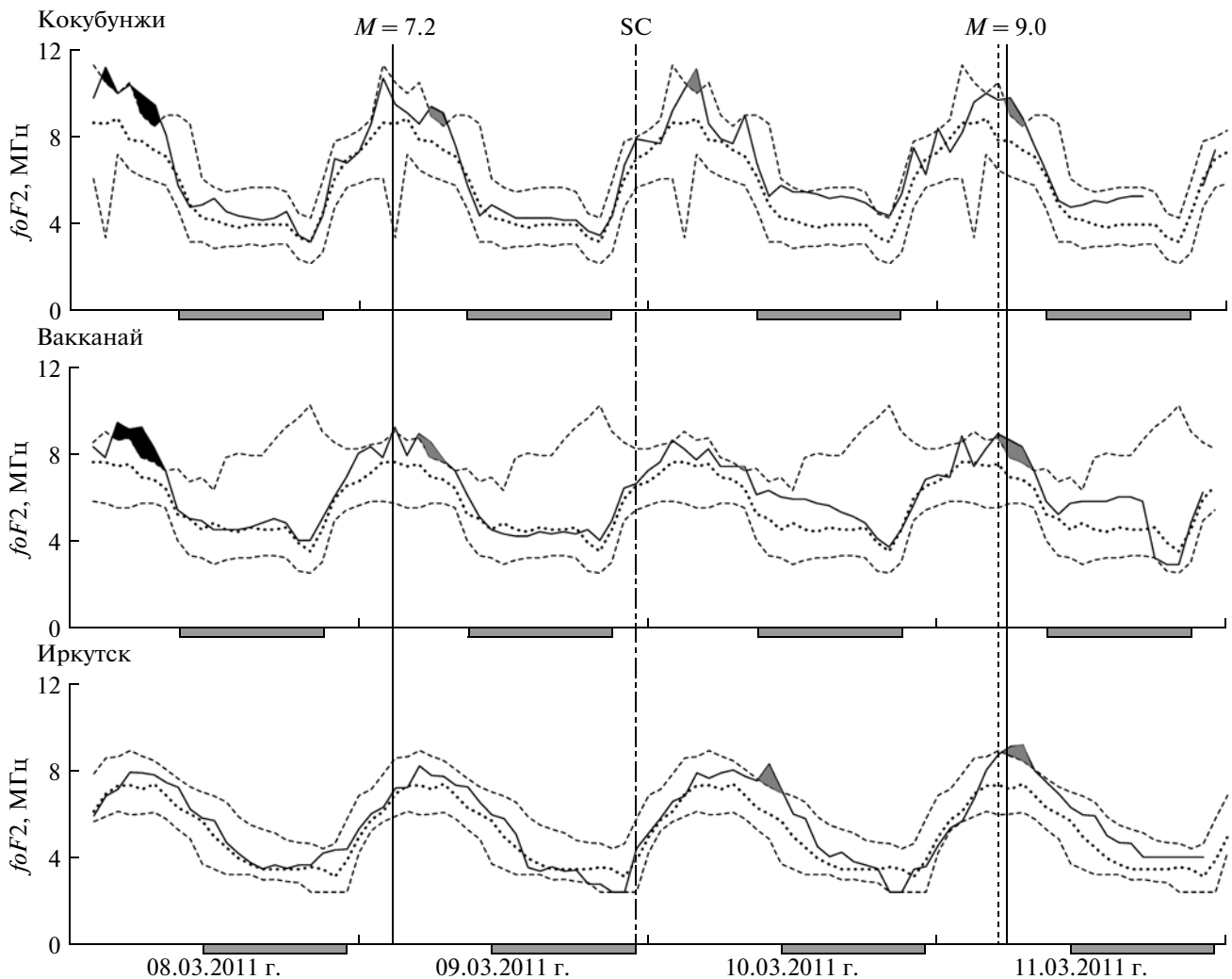


Рис. 2. Часовые вариации $foF2$ (сплошные линии) с 08.03.2011 г. по 11.03.2011 г. на станциях Кокубунжи (верхняя панель), Вакканай (средняя панель) и Иркутск (нижняя панель). Пунктирными линиями показаны медианы, а штриховыми линиями – верхняя и нижняя границы соответствующих размахов. Вертикальная точечная линия отмечает момент минимума Dst -индекса для магнитной бури, начавшейся в 23:00 UT 9.03.2011. Затененные прямоугольники под осью абсцисс показывают интервалы местного времени с 18:00 до 06:00 LT. Зачерненные участки под кривыми текущих значений $foF2$ для ст. Кокубунжи и Вакканай показывают превышение верхних границ размаха перед землетрясением 9 марта. Остальные превышения границ размахов показаны светло-серым тоном.

Kp -индекса не превышала значения 2 (за исключением одной точки 6 марта, в которой $Kp = 3$).

Общее число опорных дней оказалось равно 19: девять дней до землетрясения 09.03.2011 г. (22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 февраля, 5, 6 марта) и десять дней после землетрясения 11.03.2011 г. (14, 15, 18, 19, 24, 25, 27, 28, 29, 31 марта). Исследуемый временной интервал 8–11 марта 2011 г. лежит примерно в середине выбранного диапазона опорных дней. Границы размаха, были выбраны в качестве меры идентификации ионосферных возмущений с целью усиления жесткости критерия, по которому состояние ионосферы классифицируется как возмущенное.

Оценка радиуса зоны подготовки землетрясения (r_D) с магнитудой $M = 7.2$ по Добровольскому [Добровольский и др., 1980] дает $r_D(M = 7.2) = 10^{(0.43 \times 7.2)} = 1247$ км, откуда следует, что ионосферные станции Кокубунжи и Вакканай находились глубоко внутри этой зоны. Станция Иркутск была выбрана в качестве контрольной для сравнения, т.к. она удалена от эпицентров землетрясений на расстояние по дуге большого круга, превышающее 3300 км. Кроме того, она находится в соседнем долготном секторе (на два часа к западу).

Из рисунка видно, что на обеих японских станциях примерно за сутки до землетрясения 9 марта 2011 г. почти синхронно проявляются положительные ионосферные возмущения (зачер-

ненные области под соответствующими кривыми текущих значений f_oF_2), тогда как текущие значения f_oF_2 над ст. Иркутск не превосходят границ размаха. Возмущения на ст. Иркутск имеют место только после начала магнитной бури. Вблизи момента минимума Dst -индекса положительные возмущения f_oF_2 почти одновременно наблюдаются на всех трех станциях.

Более детальное рассмотрение показывает, что максимальное превышение верхней границы размаха текущим значением f_oF_2 достигается в интервале 06:00–07:00 UT 08.03.2011 г. на обеих опорных станциях Кокубунжи и Вакканай и составляет 10–12% от величины верхней границы размаха для первой из указанных станций и 9–18% для второй (при этом превышение над медианным значением f_oF_2 находится в пределах 27–28% для Кокубунжи и 22–33% для Вакканай). На рисунке 2 также отчетливо проявляется колебательный режим в поведении f_oF_2 над опорными станциями Кокубунжи и Вакканай сразу после толчка с $M = 7.2$, при этом фаза колебания над Кокубунжи (~400 км от эпицентра землетрясения) незначительно опережает начало развития этого колебания над Вакканай (~750 от эпицентра землетрясения). На обеих станциях опять наблюдается выход текущих значений f_oF_2 за верхнюю границу размаха вблизи 05:00–06:00 UT 09.03.2011. Такое поведение согласуется с интерпретацией наблюдающегося эффекта в рамках концепции акустико-гравитационных волн (АГВ), возбуждаемых в области эпицентра в результате подземного толчка и возмущающих ионосферу на высотах области F_2 по мере своего прохождения (см. [Row, 1967; Hegai et al., 2011]). Согласно [Row, 1967] скорость распространения фронта возмущения в ионосфере $V \approx 800$ м/с = 2880 км/ч, поэтому возмущение над Кокубунжи начнет проявляться примерно через $(400 \times 60/2880) \sim 8$ минут, а над Вакканай, соответственно, через ~16 мин после толчка в виде уменьшения критической частоты f_oF_2 , что согласуется с рис. 2. Однозначная интерпретация поведения f_oF_2 после 23:00 UT 09.03.2011 г. затруднительна, т.к. сейсмо-ионосферные эффекты (как возможные предвестниковые, так и обусловленные самим сейсмическим толчком) оказываются смешанными с эффектами начавшейся умеренной магнитной бури.

Итак, можно предположить, что наблюдавшиеся перед землетрясением 9 марта 2011 г. над станциями Кокубунжи и Вакканай положительные возмущения f_oF_2 были связаны с процессом подготовки землетрясения, то есть являлись ионосферным предвестником данного землетрясения. Относительно возможного влияния на ионосферу процесса подготовки катастрофического землетрясения 11.03.2011 сделать определенное заключение не представляется возможным в силу маскирующего ионосферного эффекта геомаг-

нитной бури, на фоне которой произошло землетрясение.

Для объяснения возникновения ионосферных предвестников землетрясений были выдвинуты несколько гипотетических механизмов, наиболее популярными среди которых являются механизм, в основе которого лежит проникающее в ионосферу сейсмогенное электрическое поле [Ким и др., 1994, 2002; Kim and Hegai, 1997, 1999; Pulinets et al., 2000; Pulinets and Boyarchuk, 2004; Sorokin et al., 2006; Намгаладзе и др., 2009], и механизм, базирующийся на генерации АГВ перед землетрясением [Перцев и Шалимов, 1996; Hegai et al., 1997, 2006; Blaunstein and Hayakawa, 2009]. В рамках первого механизма предполагается, что в эпицентральной зоне готовящегося землетрясения происходит возмущение вертикального электростатического поля в приземном слое атмосферы, которое может проявляться на ионосферных уровнях и вызывать возмущения плотности ионосферной плазмы. Конкретные расчеты показали, что на высотах ~120 км в верхней части E -области ионосферы могут возникать спорадические слои [Ким и др., 1993; Sorokin et al., 2006]. Кроме того, за счет электромагнитного дрейфа плазмы электрическое поле сейсмогенного происхождения, может приводить к существенным изменениям горизонтального распределения концентрации плазмы в F_2 -области ионосферы [Kim and Hegai, 1999; Намгаладзе и др., 2009]. В работе [Ким и др., 2002] показано, что перед сильным землетрясением может существенно увеличиваться электронная концентрация в ночной D -области ионосферы. Непосредственной причиной такого увеличения электронной концентрации является ударная ионизация высыпавшимися из радиационного пояса Земли энергичными электронами. Высыпание электронов происходит вследствие их циклотронно-резонансного взаимодействия с электромагнитными ОНЧ-волнами, захваченными в вытянутый вдоль геомагнитного поля (из одного полушария в другое) плазмосферный ОНЧ-дакт. Такой дакт образуется под воздействием сейсмогенного электрического поля в окрестности геомагнитной силовой линии, проходящей через эпицентр назревающего землетрясения [Kim and Hegai, 1997]. При этом можно предположить, что “мягкая” часть высыпавшихся электронов может приводить к увеличению электронной концентрации и в F области ионосферы.

Согласно второму механизму, ионосферные возмущения перед землетрясениями могут вызываться АГВ, которые возбуждаются в ионосфере в период подготовки землетрясения. В работе [Перцев и Шалимов, 1996] предполагается, что первичным источником этих волн являются сейсмогенные АГВ разных масштабов, которые возможно генерируются в приземном слое атмосферы над эпицентральной зоной готовящегося землетрясе-

ния. В работе [Blaunstein and Hayakawa, 2009] представлен механизм генерации посредством АГВ ионосферных неоднородностей различных масштабов. В частности, было показано, что вблизи высоты ~ 125 км должны наблюдаться неоднородности с повышенной электронной плотностью. В статье [Hegai et al., 1997] представлен другой первичный источник АГВ в ионосфере, предваряющий сильные землетрясения, согласно которому генерация АГВ вызывается нестационарным джоулевым разогревом локальной области ионосферы над эпицентральной зоной назревающего землетрясения за счет электрического поля сейсмического происхождения, проникающего в ионосферу. Отметим, что “акустико-гравитационный” механизм может объяснить появление ионосферных предвестников на расстояниях, существенно превышающих зону подготовки землетрясения (более 1000 км).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа временных рядов часовых значений критических частот F_2 -слоя ионосферы foF_2 наземных станций вертикального зондирования ионосферы Кокубунжи и Вакканай получено, что приблизительно за сутки до сильного землетрясения в Японии 9 марта 2011 г. наблюдались существенные положительные возмущения foF_2 длительностью несколько часов. При этом на значительно удаленной от эпицентра землетрясения (~ 3300 км) контрольной станции Иркутск за аналогичный период значимых отклонений foF_2 от фоновых значений выявлено не было. Это дает основание предположить, что наблюдавшиеся на станции Кокубунжи и Вакканай эффекты увеличения foF_2 можно интерпретировать в качестве возможных краткосрочных ионосферных предвестников данного землетрясения. Предвестниковые ионосферные проявления более мощного землетрясения 11 марта 2011 г., если таковые имели место, выделить не удалось из-за маскирующих ионосферных эффектов начавшейся перед этим толчком магнитной бури.

Авторы выражают благодарность NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) USA, National Institute of Information and Communications Technology (NICT, Japan), World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (Japan), ионосферные и магнитные данные которых были использованы в данной работе, а также United States Geological Survey's (USGS) Earthquake Hazards Program за предоставление доступа к данным по землетрясениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добровольский И.А., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясения // Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, С. 7–14. 1980.
- Ким В.П., Пулинец С.А., Хегай В.В. Теоретическая модель возможных изменений в ночной среднеширотной D -области ионосферы над зоной подготовки сильного землетрясения // Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т. 45. № 4. С. 289–296. 2002.
- Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможности образования слоя ионов металлов в E -области ночной среднеширотной ионосферы перед сильными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 33. № 5. С. 114–119. 1993.
- Ким В.П., Хегай В.В., Иллич-Свитыч П.В. О возможном ионосферном предвестнике землетрясений // Физика Земли. № 3. С. 37–40. 1994.
- Намгаладзе А.А., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаренкова И.Е. Физический механизм и математическое моделирование ионосферных предвестников землетрясений, регистрируемых в полном электронном содержании // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 2. С. 267–277. 2009.
- Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 36. № 2. С. 111–118. 1996.
- Akhondzadeh M., Parrot M., Saradjian M. R. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data // Nat. Hazards. Earth Syst. Sci. V. 10. № 1. P. 7–18. 2010.
- Blaunstein N., Hayakawa M. Short-term ionospheric precursors of earthquakes using vertical and oblique ionosondes // In: Hayakawa, M., Liu, J. Y., Hattori, K., Telesca, L. (Eds.), Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C. V. 34. Issues 6–7 (Special Issue). Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes and Volcanoes. P. 496–507. 2009.
- Dabas R.S., Das R.M., Sharma K., Pillai K.G.M. Ionospheric precursors observed over low latitudes during some of the recent major earthquakes // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 69. № 15. P. 1813–1824, doi:10.1016/j.jastp.2007.09.005. 2007.
- Hegai V.V., Legeňka A.D., Kim V.P., Georgieva K. Wave-like perturbations in the ionospheric F_2 -layer observed after the $M_{s8.1}$ Samoa earthquake of September 29, 2009 // Adv. Space Res. V. 47. № 11. P. 1979–1982. 2011.
- Hegai V.V., Kim V.P., Liu J.Y. The ionospheric effect of atmospheric gravity waves excited prior to strong earthquake. // Advances in Space Research. V. 37. № 4. P. 653–659. 2006.
- Hegai V.V., Kim V.P., Nikiforova L.I. A possible generation mechanism of acoustic-gravity waves in the ionosphere before strong earthquake // J. Earthquake Prediction Research. № 6. P. 584–589. 1997.
- Kim V.P., Hegai V.V. On possible changes in the mid-latitude upper ionosphere before strong earthquakes // Journal of Earthquake Prediction Research. V. 6. № 2. P. 275–280. 1997.
- Kim V.P., Hegai V.V. A possible presage of strong earthquakes in the night-time mid-latitude F_2 region ionosphere // In: Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes /

- Ed. M. Hayakawa. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB). P. 619–627. 1999.
- *Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Chen C.S.* A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly // *J. Geophys. Res.* V. 111. A05304, doi:10.1029/2005JA011333. 2006.
 - *Liu J.Y., Chen Y.I., Chen C.H., Liu C.Y., Chen C.Y., Nishihashi M., Li J.Z., Xia Y.Q., Oyama K.I., Hattori K., Lin C.H.* Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake // *J. Geophys. Res.* V. 114. A04320, doi:10.1029/2008JA013698. 2009.
 - *Liu J.Y., Chen Y.I., Chen C.H., Hattori K.* Temporal and spatial precursors in the ionospheric global positioning system (GPS) total electron content observed before the 26 December 2004 $M_9.3$ Sumatra–Andaman Earthquake // *J. Geophys. Res.* V. 115. A09312, doi:10.1029/2010JA015313. 2010.
 - *Oyama K.-I., Kakinami Y., Liu J.Y., Abdu M.A., Cheng C.Z.* Latitudinal distribution of anomalous ion density as a precursor of a large earthquake // *J. Geophys. Res.* V. 116. A04319, doi:10.1029/2010JA015948. 2011.
 - *Pulinets S.A., Boyarchuk K. A.* Ionospheric Precursors of Earthquakes // Berlin: Springer, 315 p. 2004.
 - *Pulinets S.A., Boyarchuk K.A., Hegai V.V., Kim V.P., Lomonosov A.M.* Quasielectrostatic Model of Atmosphere–Thermosphere–Ionosphere Coupling // *Adv. Space Res.* V. 26. № 8. P. 1209–1218. 2000.
 - *Row R.V.* Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake // *J. Geophys. Res.* V. 72. № 5. P. 1599–1610. 1967.
 - *Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Hayakawa M.* Formation mechanism of the lower ionospheric disturbances by the atmospheric electric current over a seismic region // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. № 11. P. 1260–1268. 2006.
 - *Zhao B., Wang M., Yu T., Wan W., Lei J., Liu L., Ning B.* Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake? // *J. Geophys. Res.* V. 113. A11304, doi:10.1029/2008JA013613. 2008.