

Ионосферные и геомагнитные эффекты во время землетрясения 21.09.2004 в Калининградской области. Предварительные результаты

В.П. Иванов, В.Л. Карвецкий, Н.А. Коренькова, В.С. Лещенко
Западное отделение ИЗМИРАН, Калининград

Аннотация. Исследуются материалы ионосферных и геомагнитных наблюдений во время уникального землетрясения, имевшего место 21 сентября 2004 г. в Калининградской области. Магнитуда возмущений оценивается примерно 5. Эпицентр располагался на расстоянии ~25 км от станции наблюдения. В результате сопоставления суточных вариаций foF2 были выявлены значительные отличия во временных вариациях F2 слоя. В день землетрясения наблюдались периодические колебания foF2 как до начала первого толчка, так и после него. Амплитуда вариаций составила ~0.5 МГц, период колебаний ~1 час. Во временных вариациях параметров слоя E и Es также отмечены квазипериодические колебания характерных частот, но с меньшими периодами. За несколько дней до землетрясения имели место аппаратные сбои, которые не позволили сделать детальный анализ данных foF2 на предмет поиска предвестников событий. В качестве характеристики геомагнитной активности использовались значения горизонтальной составляющей геомагнитного поля непосредственно в момент землетрясения и в предшествующие сутки. Анализ геомагнитных данных путём простого сопоставления не позволяет выявить какие-либо эффекты толчков. Более детальные исследования показывают наличие колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля после 1-го толчка. Однако амплитуда этих колебаний очень мала, что не позволяет сделать однозначных выводов в пользу связи этих колебаний с землетрясением. Это подтверждает выводы других авторов о том, что несильные толчки не находят отражения в вариациях магнитного поля.

1. Введение

Поиски эффектов землетрясений в околоземной плазме ведутся уже в течение нескольких десятилетий. Поскольку имеется большой банк данных, накопленных в течение многих лет по многим магнитно-ионосферным станциям наземного базирования, в первую очередь проводился анализ геомагнитных данных (Iyemori et al., 1996; Johnston et al., 1992; Седова, Мозговая, 2001; Varotsos et al., 2001) и данных ионосферных станций вертикального зондирования (Липеровский и др., 1999; Fitzgerald, Wolkott, 1988; Самарджиев, Пашова, 1982; Фаткуллин и др., 1988; Пулинец и др., 1998). Обработка этих данных позволила выявить ряд эффектов землетрясений в геомагнитном поле и стандартных ионосферных параметрах, таких, как foEs, foE, foF2. Одновременно с этими исследованиями осуществлялся поиск эффектов землетрясений и в других параметрах ионосферной плазмы, например, вариации общего интегрального содержания (Liu et al., 2001), наблюдения электромагнитных ОНЧ-излучений (Молчанов и др., 1992), а так же в параметрах распространения КВ-сигналов, отраженных от ионосферы (Дробжес и др., 1992).

Анализ накопленной информации позволил обнаружить предвестников землетрясений во временных вариациях ионосферных параметров (Хегай и др., 2002; Пулинец и др., 2002; Михайлов и др., 2002; Пулинец и др., 2004). Было найдено, что за несколько дней перед землетрясением наблюдаются определенные эффекты в суточном ходе foF2, в частности, заметное повышение или понижение критических частот относительно медианы. Аналогичный эффект был обнаружен и параметрах слоя Es (Tadanori, 2000), который заключался в увеличении foEs за несколько дней перед землетрясением. Большой материал, касающийся предвестников землетрясения в ионосфере, обобщен в монографии (Liperovski et al., 1992).

Наряду с выявлением общих закономерностей, имеющих место во временном ходе ионосферных параметров, как перед землетрясением, так и после него, происходил поиск возможных физических механизмов, которые могли вызывать такие эффекты (Сорокин, Чмырев, 2002; Лантухов, 2000; Pulinetz et al., 1998). На основе этих исследований был сделан вывод о том, что перед началом землетрясения и во время сейсмического процесса происходит усиление квазистатического электрического поля, связанного с изменением структуры земной коры. Это электрическое поле проникает на высоты ионосферы и может оказывать влияние на вариации электронной концентрации в E и F-областях ионосферы.

В настоящей работе представлены предварительные результаты наблюдений ионосферных параметров foEs, foE, foF2 и магнитных данных, полученные в период с 18.09.2004 по 22.09.2004 на ст. Калининград (54,5N, 20,2E), т.е. до и после землетрясения. Данные представлены без какой-либо статистической обработки и иллюстрируют временные вариации вышеупомянутых параметров как перед землетрясением, так и после него.

2. Геофизические условия

Калининградская область расположена на востоке Европы и относится к сейсмобезопасному району. Вероятность землетрясения более 5 баллов составляет 1 % в течение 50 лет. Тем не менее, 21 сентября 2004 г. вблизи Калининграда произошло несколько подземных толчков. Максимальные толчки по магнитуде $M_s=4.3$ ощущались в 13.32 UT. Этому предшествовало землетрясение с магнитудой $M_s=4.0$ в 11.05 UT. В 13.36 UT имел место слабый, почти незаметный, толчок. Два первых сильных толчка ощущались по территории всей Калининградской области и прилегающих прибалтийских государствах, на юге Финляндии, в северных районах Польши и Белоруссии.

По предварительным данным геофизической службы РАН, гипоцентр (точка начала вспарывания разлома) находилась на глубине порядка 15 км. Европейский сейсмологический центр дает глубину очага приблизительно 10 км. Расхождения объясняются тем, что на территории Калининградской области нет ни одной сейсмической станции, точки наблюдения находятся достаточно далеко, что и приводит к неточностям в результатах. Эпицентр (точка над гипоцентром), с большой степенью вероятности, находится вблизи посёлка Люблино в 15 км западнее Калининграда. Магнитно-ионосферная станции Западного Отделения ИЗМИРАН расположена в 25 км к югу от Калининградского залива. Взаимное расположение эпицентра и точки наблюдения представлено на рис. 1. Видно, что расстояние между ионосферной станцией и п. Люблино составляет ~ 25 км по прямой через Калининградский залив.

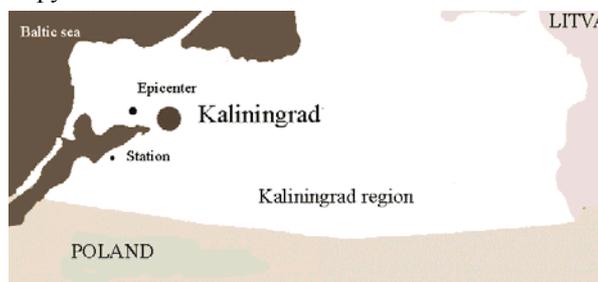


Рис. 1. Расположение эпицентра землетрясения 21.09.2004 и станции наблюдения ЗО ИЗМИРАН

На рис. 2 представлены суточные вариации A_p и K_p индексов за рассматриваемый период. Видно, что с 18 по 22 сентября значения K_p не превышали 5. Наибольшие величины наблюдались в ранние часы 18 сентября, и был небольшой всплеск с 6-12 UT 20.09 – накануне землетрясения. В день землетрясения величины K_p были менее 3 и особенно низкими во второй половине дня, когда произошли основные толчки. На следующий день, 22 сентября, в дневное время имело место небольшое возмущение, когда $K_p \sim 4$ с 12.00 до 18.00 UT. Анализ графика A_p индекса показывает аналогичные возмущения, совпадающие по времени с планетарными магнитными возмущениями. Величины $A_p > 30$ наблюдаются тогда же, когда имеет место возрастание K_p .

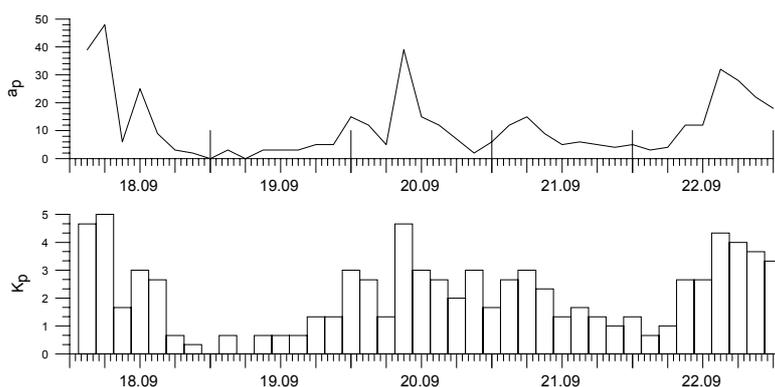


Рис. 2. Временные вариации A_p и K_p за период 18-22 сентября 2004 г.

Индекс $F10.7$, характеризующий солнечную активность, монотонно убывал за этот период от $105 \cdot 10^{-22}$ Вт/(m^2 Гц) 18 сентября до $92 \cdot 10^{-22}$ Вт/(m^2 Гц) 22 сентября, что соответствует средней солнечной активности.

Таким образом, можно заключить, что как накануне, так и в день землетрясения, никаких сильных геомагнитных возмущений не было. Сумма K_p в период 18-21 сентября по отдельным суткам не превышала 18, и только 22 сентября была равна 22.

3. Результаты измерений

Результаты измерений ионосферных параметров и двух компонент геомагнитного поля представлены на рис. 3-4.

Ионосферные данные были получены с помощью ионозонда, мощность которого в импульсе равна 4 кВт, длительность зондирующего импульса 100 мкс, частота повторения 50 Гц, диапазон зондирования 1÷20 МГц. Регистрация осуществлялась в цифровом виде по алгоритмам, разработанным специалистами ИЗМИРАН. Вариации H- и Z-компонент геомагнитного поля получены с помощью цифровой магнитовариационной станции, также разработанной в ИЗМИРАН.

На рис. 3 изображены временные вариации f_oF2 , f_oE и f_oE_s за период 18-22 сентября 2004 г. в те часы, когда это позволила аппаратура. В день землетрясения данные изображены сплошными точками и

ломаными линиями, в остальные дни – незалитыми геометрическими фигурами. Левая панель иллюстрирует вариации foF2. Видно, что в утренние часы 18 сентября (светлые кружки), 20 сентября (треугольники) и 22 (ромбики) между значениями foF2 имеется достаточное сходство. Около 10 LT 18 сентября foF2 несколько превышает все остальные значения, а в районе полудня 20 сентября foF2 возрастает относительно значений в другие дни. В день землетрясения foF2 испытывает периодические колебания с наибольшей амплитудой в утренние часы. Непосредственно в момент землетрясения foF2 остается достаточно стабильной на уровне 6.7 МГц, но после толчков имеется всплеск ~ 0.5 МГц в течение получаса с последующим возвращением к среднему уровню. Следует отметить, что 19 сентября в утренние часы 08-09 LT в foF2 тоже наблюдался подъем, соизмеримый с соответствующим возрастом этого параметра в день землетрясения 21 сентября.

На средней панели рис. 3 представлены временные вариации foE. Хорошо видно, что в утренние часы 07-11 LT во все дни 18, 20 и 22 сентября величины foE находятся примерно на одном уровне, вместе со значениями foE в день землетрясения. За два дня до события, т.е. 19 сентября (квадраты) в утренние часы наблюдается заметное понижение величины foE (0.2÷0.3 МГц) относительно хода этого параметра в остальные дни. Однако после 9.30 LT вариации foE в этот день приближаются к средним значениям. За день до землетрясения, 20 сентября, перед полуднем в 10.30÷12.00 LT наблюдается возрастание foE ~ 0.2 МГц с последующим возвращением к обычному значению ~ 3.0 МГц в 12-13 LT. Во время землетрясения видны квазипериодические временные вариации foE с амплитудой ~ 0.1 МГц. На следующие сутки 22 сентября в это время отмечается сильное уменьшение foE ~ 0.7 МГц в 13.20 LT с последующим возрастанием до 3 МГц в 14 LT.

На правой панели рис. 3 изображены имеющиеся значения параметра foEs (спорадического слоя). Видно, что 18 сентября спорадический слой отсутствовал, но за два дня до землетрясения 19 сентября в утренние часы наблюдались большие величины foEs. В день землетрясения отчетливо выраженный слой Es существовал с 7 до 12 LT и исчез за полчаса до появления толчков. В последующие сутки 22 сентября с 11 до 14 LT наблюдался Es со значительной электронной концентрацией, характеризуемой foEs, достигающей величины ~ 4.2 МГц.

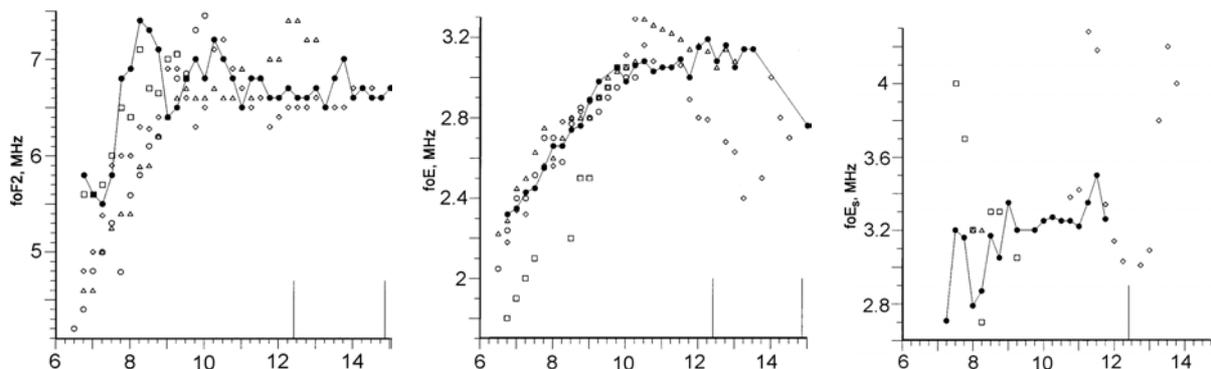


Рис. 3. Дневные вариации ионосферных параметров foF2, foE, foEs.

Кружки – 18 сентября; квадраты – 19 сентября; треугольники – 20 сентября; ромбы – 22 сентября.

Черные точки (сплошная линия) – 21 сентября – день землетрясения.

Вертикальными линиями отмечены моменты толчков.

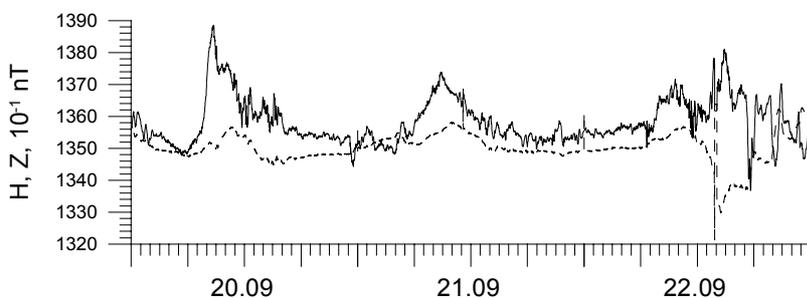


Рис. 4. Временные вариации H- (сплошные) и Z- (штриховые) компонент геомагнитного поля за период 20-22 сентября. Вертикальная линия – момент землетрясения.

Рис. 4 иллюстрирует временные вариации H- и Z-компонент геомагнитного поля (сплошная и штриховая кривые, соответственно) за период 20-22 сентября. Наблюдается значительное увеличение H-компоненты перед полуднем во все дни и мелкомасштабные вариации 20 и 21 сентября в остальное время. 22 сентября в вечернее время видны значительные изменения H- и Z-компонент, которые могут

быть вызваны глобальным возрастанием геомагнитной активности (см. рис. 2). В день землетрясения и непосредственно в момент толчков заметных изменений в вариациях геомагнитного поля не наблюдается.

4. Обсуждение и заключение

Как видно из представленных рисунков, на них отсутствует полная суточная вариация ионосферных параметров. Это связано с тем, что в этот период проводилась отладка нового ионосферного комплекса и отработка новой методики измерений ионосферных параметров. Таким образом, наши данные имеют ограниченный характер, не позволяющий сделать полный временной анализ исследуемых параметров.

Достаточно полный анализ временных вариаций foF2 до и во время землетрясений был выполнен в работах (Фаткуллин и др., 1988; Пулинец и др., 2004), в которых показано, что за несколько дней до землетрясений могут быть заметные отклонения foF2 от средних значений, а непосредственно после толчка наблюдается отрицательное возмущение. Однако нужно отметить, что эти выводы сделаны на основе анализа случаев, описывающих сильные землетрясения с магнитудой более 5. Во время Калининградского землетрясения магнитуда не превышала 4.8 и, следовательно, ожидать сильных ионосферных эффектов нет оснований. Однако в день землетрясения имеется некоторая нерегулярность в поведении foF2, которая заключается в сильном возрастании foF2 в утренние часы 08-09 LT, последующий подъем foF2 в 10-11 LT и заметный всплеск между 13 и 14 LT. Первые два всплеска foF2 связывать с землетрясением достаточно трудно, поскольку 19 сентября (квадраты на рис. 3), с 8 до 9 LT наблюдается аналогичное возрастание foF2. Такого подъема не было 18 и 22 сентября. Отметим, что 19 и 21 сентября можно отнести к магнитоспокойным дням. Возрастание foF2 (кружочки) 18 сентября в 10 LT может быть следствием возмущения, которое имело место в 06 LT этого дня, когда Kp было ~ 5 (см. рис. 2). Подъем foF2 до 7.5 МГц в 12-13 LT 20 сентября (в день, предшествующий землетрясению) также может быть следствием возрастания геомагнитной активности в этот день. В последующий день, 22 числа (ромбы) вариация foF2 достаточно регулярна. Имеется подъем foF2 в 10 LT, совпадающий с подъемом в день землетрясения и возвращение к средним величинам ~ 6.5 МГц в последующие часы. Таким образом, однозначных выводов о предвестниках землетрясения во временных вариациях foF2 за представленный период сделать нельзя, хотя временная нерегулярность этого параметра в день землетрясения присутствует.

Анализ временных вариаций foE (средняя панель, рис. 3) показывает, что наблюдаются пониженные значения этого параметра на величину ~ 0.4 МГц 19 сентября (квадраты), за два дня до землетрясения в утреннем секторе и небольшое возрастание, на ~ 0.2 МГц, в дневные часы 20 сентября, что может быть связано с ростом геомагнитной активности. Непосредственно во время землетрясения во временном ходе foE видны квазипериодические вариации с амплитудой ~ 0.1 МГц и сильное уменьшение foE через час после толчков. Нужно отметить, что на следующий день 22 числа (ромбы) в это время также наблюдается понижение foE, которое пока не имеет объяснения.

Временные вариации foEs во все дни имеют нерегулярный характер. Анализ этого параметра в периоды землетрясения посвящено немало работ, например, (Tadanori, 2000; Liperovski et al., 1992, 1999). В этих исследованиях отмечается, что за несколько дней до землетрясения возрастает вероятность наблюдения слоя Es и foEs. Как и в случае с foF2, эти выводы получены для сильных землетрясений с Ms ≥ 5 .

Анализ наших результатов показывает, что за 2 дня до события 19 сентября (квадраты) в утренние часы имело место значительное возрастание foFs. Непосредственно в день землетрясения слой Es существовал длительное время – всю первую половину дня. Величина foEs колебалась от ~ 2.8 МГц до 3.5 МГц, т.е. была на уровне foE в это же время. Во время толчков слой Es не наблюдается. В последующие сутки, наоборот, спорадический слой отсутствовал в утренние часы, но отчетливо выделялся на ионограммах в полуденное время, причем foEs достигала величины ~ 4 МГц.

Таким образом, можно сказать, что непосредственно в день землетрясения практически все ионосферные параметры испытывают квазипериодические временные вариации. Это подтверждает выводы других исследователей о возможном распространении акустико-гравитационных волн от очага землетрясения на высоты ионосферы. Так, в работе (Фаткуллин и др., 1988) говорится о волновых возмущениях в F2-области ионосферы с периодом в ~ 10 мин (Самарджиев, Паилова, 1982) обнаружили в F2-области периоды колебаний foF2 ~ 40 -50 мин, а в работе (Fitzgerald, Wolcott, 1988) по временным вариациям КВ-радиосигнала делается вывод о существовании волновых возмущений в E-области ионосферы.

Рис. 4, иллюстрирующий временные вариации H- (сплошная линия) и Z- (штриховая) компонент геомагнитного поля, показывает заметное увеличение H-компоненты перед полуднем 20, 21, 22 сентября, что связано с ростом общей геомагнитной активности (см. рис. 2). Во время толчков 21 сентября в 12.25 LT никаких заметных особенностей в поведении H-компоненты не видно. В работах, посвященных анализу временных вариаций H-компоненты во время землетрясений (Седова, Мозговая, 2001; Varotsos et al., 2001; Iyemori et al., 1996; Johnston et al., 1992), отмечается уменьшение величины H-компоненты на

0.5÷1.0 нТ. Это очень небольшие вариации, находящиеся в пределах точности измерений. Поэтому в нашем случае слабого землетрясения выделить такие эффекты очень трудно.

Основываясь на вышесказанном, можно сделать следующие выводы. Во время землетрясения 21 сентября 2004 г. в Калининградской области с магнитудой ~ 4.7 наблюдались квазипериодические вариации ионосферных параметров foF2, foE, foEs. Неполные временные ряды этих параметров не позволяют сделать какие-либо выводы о наличии предвестников землетрясения. В вариациях H-компоненты геомагнитного поля отчетливые эффекты землетрясения не выявлены.

Литература

- Fitzgerald T.J., Wolcott T.H.** E layer ionospheric disturbances following the Coalinga earthquake. *J. Geophys. Res.*, v.93, N 1, p.227-234, 1988.
- Iyemori T., Kamei T., Tanaka Y.** Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake. *J. Geomagnetic and Geoelectr.*, v.48, N 8, p.1059-1070, 1996.
- Johnston M.J., Mueller R.J., Sasai Y.** Magnetic field observation in the Near-Field of the June 28, 1992, M7.5 lands California, earthquake. *EOS*, v.73, N 13, p.334, 1992.
- Liperovski V.A., Pokhotelov O.A., Shalimov S.L.** Ionospheric precursors of the earthquakes. *M., Nauka*, 304 p., 1992.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chko Y.J., Tsai H.F.** Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, v.28, N 7, p.1383-1386, 2001.
- Pulinets S.A., Khagai V.V., Boyarchuk K.A.** Atmospheric electric field as a source of ionospheric variability. *Physics-Uspeski*, v.41, N 5, p.515-522, 1998 (in Russian).
- Tadanori O.** Seismo-ionospheric phenomena. *Advanced Space Research*, v.26, N 8, p.1267-1272, 2000.
- Varotsos P., Sarlis N., Skordas E.** Magnetic field variations associated with the SES before the 6.6 Grevena-Kazni earthquake. *Proc. Jap. Acad.*, v.77, N 6, p.93-97, 2001.
- Дробжев В.И., Калиев М., Литвинов Ю.Г.** Отклик ионосферы на Алма-Атинское землетрясение 4 марта 1991 г. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.32, № 4, с.144-146, 1992.
- Лантухов А.И.** Расчёт электромагнитного отклика в атмосфере на изменение земных токов перед землетрясением. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.40, № 6, с.133-137, 2002.
- Липеровский В.А., Попов К.В., Похотелов О.А.** Возмущения временного хода частоты fbEs ионосферы сейсмоактивного района. *Физика Земли*, № 12, с.83-89, 1999.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В.** Вариации различных атмосферно-ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 6, с.805-813, 2002.
- Молчанов О.А., Мажаева О.А., Протопопов М.Л.** Наблюдение электромагнитных ОНЧ-излучений сейсмогенного происхождения на ИСЗ "Интеркосмос-24". *Геомагнетизм и аэрономия*, т.32, № 6, с.128-137, 1992.
- Пулинец С.А., Боярчук К.А., Ломоносов А.М.** Ионосферные предвестники землетрясений: предварительный анализ данных критических частот foF2 наземной станции вертикального зондирования ионосферы Чунг-Ли (о. Тайвань). *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 4, с.535-540, 2002.
- Пулинец С.А., Легенька А.Д., Зеленова Т.Н.** Зависимость сейсмо-ионосферных вариаций в максимуме слоя F от местного времени. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.38, № 3, с.178-183, 1998.
- Пулинец С.А., Лю И.Я., Сафронова К.А.** Интерпретация результатов статистического анализа вариаций критической частоты foF2 перед землетрясением по данным ионосферной станции Чунг-Ли (о. Тайвань). *Геомагнетизм и аэрономия*, т.44, № 1, с.113-118, 2004.
- Самарджиев Д., Пашова Ц.** Волновые ионосферные возмущения, наблюдавшиеся после землетрясения 4.03.1977 г. в горах Вранга. *Болг. геофиз. списание*, т.8, № 4, с.44-51, 1982.
- Седова Ф.И., Мозговая Т.А.** Анализ геомагнитных вариаций в связи с землетрясениями в Крымско-Черноморском районе. *Геофиз. ж.*, т.23, № 1, с.115-120, 2001.
- Сорокин В.М., Чмырёв В.М.** Электродинамическая модель ионосферных предвестников землетрясений и некоторых видов катастроф. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 4, с.821-830, 2002.
- Фаткуллин М.Н., Гайворонская Т.В., Зеленова Т.И., Хусамеддинов С.С.** Реакция области F ионосферы на повторные толчки в апреле 1984 г. после Газлийского землетрясения. *Изв. вузов. Радиофиз.*, т.31, № 7, с.874-878, 1988.
- Хегай В.В., Легенька А.Д., Пулинец С.А., Ким В.П.** Изменения в F2-области ионосферы перед катастрофическим землетрясением на Аляске 28.03.1964 г. По данным наземных станций вертикального зондирования ионосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*, т.42, № 3, с.360-365, 2002.