

Импульсные аномалии ТЕС ионосферы перед мощным землетрясением в Чили (27 февраля 2010 г.)

Ю.Я. Ружин¹, В.М. Смирнов^{2,3}, Е.В. Смирнова²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г.Троицк, E-mail: ruzhin@izmiran.ru

²Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино

³Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», г. Москва

В работе исследуются аномальные импульсные вариации ТЕС ионосферы во время землетрясения 27 февраля 2010 г. в Чили. Анализ состояния ионосферы проводился по данным измерений навигационной системы GPS. Показано, что непосредственно перед землетрясением по данным всех наблюдаемых в этот момент времени спутникам отмечено мгновенное изменение скорости изменения электронного содержания, на порядки величин превышающее обычный фоновый ход. Приводятся характеристики импульсных возмущений ионосферной плазмы и обсуждаются условия их образования.

In this paper the ionosphere pulse variability associated with seismic activity in the Chili region on February 27, 2010 on the basis of the analysis of TEC which obtained with using the permanent observations of the GPS-IGS network was investigated. It was demonstrated that immediately prior to the earthquake an instantaneous variation in the rate of change of electron content occurs, that is significantly higher than normal background values. Characteristics of such pulse plasma perturbations and conditions of their formation are determined and discussed.

Введение

Ионосферные явления, связанные с сейсмической активностью, обсуждаются уже почти 25 лет. Наиболее ранними работами явились исследования электромагнитных явлений, которые наблюдались до и после мощных землетрясений и также по обнаружению ионосферных предвестников землетрясений [1-4]. Атмосферные сейсмоаномалии (возможные предвестники) активно исследуются в настоящее время и включают генерацию электромагнитного излучения в КВ и УКВ диапазонах и появление зарядовых (грозовых) облаков накануне землетрясений [5,6], а также изменение условий распространения УКВ радиоволн [4,7]. Обнаружено также, что при распространении GPS сигналов вблизи горизонта над зоной подготовки проявляется эффект аномальной рефракции за несколько дней до землетрясений [8], который вызван повышенным влагосодержанием и температурными вариациями, а появление сейсмических событий сопровождается вспышками оптического излучения в небе, грозовыми разрядами, светящимися объектами.

Новые возможности в изучении пространственно-временных характеристик модификации ионосферы перед землетрясениями предоставляет использование глобальной навигационной системы GPS (Global Positioning System). GPS техника осуществляет измерения групповых и фазовых задержек радиосигналов L1=1575 МГц и L2=1228 МГц с 30-секундным интервалом одновременно для всех спутников, находящихся в зоне радиовидимости для данной GPS станции.

Анализ GPS наблюдений показал, что вариации ТЕС очень чувствительны к изменению электронной концентрации области F2 и могут эффективно использоваться для обнаружения ионосферных предвестников землетрясений [9-11]. Коэффициент корреляции между ТЕС и f_0F2 достигает величины 0,9. А поскольку электронная концентрация в максимуме слоя F2 является одним из наиболее чувствительных к сейсмической активности параметров ионосферы, мы можем использовать ТЕС данные

для оценки пространственных масштабов и временной динамики сейсмо-ионосферных эффектов практически в любом сейсмо-активном регионе мира.

Общие сведения о Чилийском землетрясении 27.02.2010г.

В работе рассмотрены вариации ионосферных параметров, наблюдаемые в период подготовки и прохождения сильного землетрясения у берегов Чили 27 февраля 2010 года в 6:34 UT или 1:34 по местному времени. Магнитуда землетрясения (ЗТ) составила $M=8.8$. Координаты эпицентра землетрясения - $35.846^{\circ}S$, $72.719^{\circ}W$, глубина расположения эпицентра 33 км. День землетрясения характеризуется наличием большого числа сейсмических событий, которые последовали за первым, наиболее сильным толчком. В этот день, на территории, ограниченной координатами -33° - 39° ю.ш. и $-71,5^{\circ}$ - $75,5^{\circ}$ в.д., было зафиксировано 14 землетрясений магнитудой $M \geq 6.0$, зарегистрированных геофизической службой РАН. Эпицентры этих землетрясений показаны (зеленые кружки) на рис. 1. Большая часть их произошла внутри 100 км полосы, вытянутой вдоль меридиана, что косвенно указывает направление разлома для данной территории. Звездочкой отмечено положение первого, самого сильного толчка.

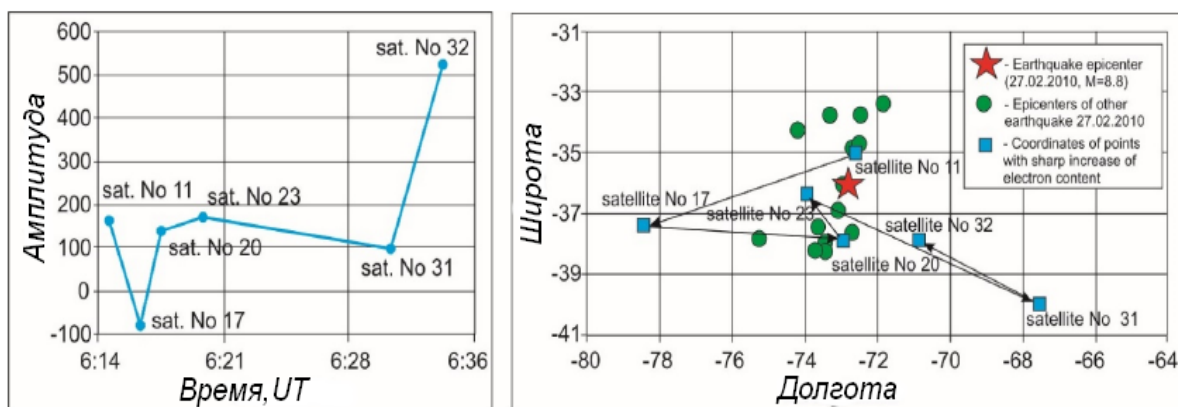


Рис. 1. Значения максимума скорости изменения электронного содержания в зависимости от времени (а) и места его детектирования (б). Цифры указывают номера спутников, а зеленые кружки – координаты землетрясений

Для исследований вариаций ТЕС ионосферы в период подготовки и прохождения землетрясения у берегов Чили, обусловленных влиянием сейсмологических эффектов, использовались GPS-станции CONZ и LPGS. Станция CONZ расположена вблизи тихоокеанского побережья в эпицентральной зоне, а станция LGPS удалена от эпицентра примерно на 1350 км и расположена вблизи атлантического побережья. Размер области ионосферного возмущения для землетрясения с магнитудой $M=8.8$ может быть свыше 6000 км.

Определение параметров импульсного отклика ТЕС ионосферы

Параметры отклика ионосферы определялись методом радиопросвечивания по трассе спутник – Земля. Методические аспекты применения этого метода подробно изложены в работе [12]. Для определения параметров ТЕС ионосферы использовались данные кодово-фазовых измерений полученные приемниками станций сети IGS. Наиболее чувствительным к воздействию внешних факторов параметром ионосферы является скорость изменения полного электронного содержания или его приращение на наблюдаемом временном интервале. Для штатных IGS-станций временной интервал составляет, как правило, 30 секунд. Результаты расчета (в единицах TECU/c) для указанных спутников, получены по формуле

$$DTEC(t) = \frac{1.81}{T} \{ \lambda_1 [\Phi_1(t) - \Phi_1(t-T)] - \lambda_2 [\Phi_2(t) - \Phi_2(t-T)] \}$$

Здесь $T=30c$ - интервал времени наблюдения, λ_1 и λ_2 - длины волн сигналов навигационных спутников, Φ_1 и Φ_2 - данные фазовых измерений для указанных длин волн ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$).

Детальный анализ скорости изменения полного электронного содержания, проведенный для спутников, наблюдаемых в момент возникновения сейсмического толка, показал наличие резкого изменения данного параметра. На рис.1 приведены значения максимума этого параметра в зависимости от времени наблюдения и места его детектирования для 6 наблюдаемых в этот период времени спутников. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что абсолютный максимум в изменении скорости изменения электронного содержания зафиксирован в 6:34 UT, что практически соответствует моменту времени возникновения землетрясения. Отрицательное значение соответствует наблюдениям по спутнику №17, траектория подионосферной точки для которого находилась над морской поверхностью. Такой ход скорости изменения электронного содержания может свидетельствовать о цунамигенности данного землетрясения. Абсолютный максимум наблюдался в точке с координатами: широта - $37,94^\circ$, долгота - $71,33^\circ$, что практически соответствует эпицентру землетрясения - 35.846°S , 72.719°W .

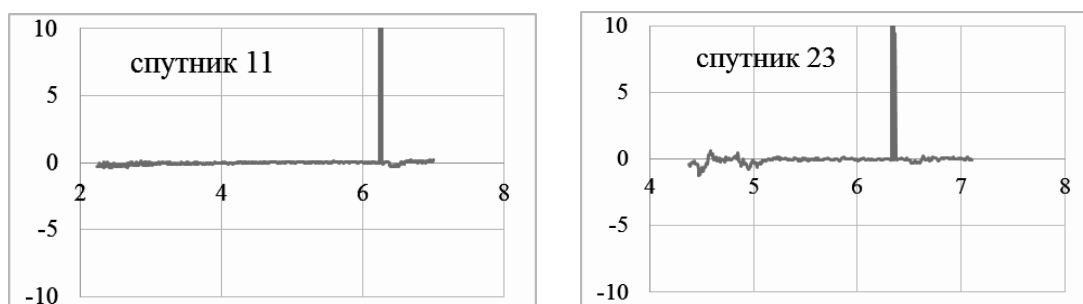


Рис.2. Пример всплесков скорости изменения электронного содержания для двух из шести наблюдаемых спутников в зависимости от времени (время UT, в часах)

Скорость изменения электронного содержания в период времени (20 минут), предшествующий сейсмическому событию, на порядки величин превышала обычный ход этого параметра. Все зарегистрированные события хаотично распределены в окрестности эпицентра на площади с размерами поперек меридиана 1000 км и вдоль 500-600 км. Отметим, что явления, самые близкие как по времени (2 мин), так и по пространству (200 км), зарегистрированы для спутников 20 и 23. Кроме того, нет событий зарегистрированных одновременно. На Рис.2 приведены примеры импульсной аномалии на фоне непрерывной регистрации в течении несколько часов.

Грозовая активность накануне землетрясения

Полученные резкие изменения ТЕС ионосферы большой амплитуды (рис.1, левая панель) являются результатом внезапного появления дополнительной ионизации на пути радиолучей от соответствующего спутника до наземного приемника. Взрывоподобное появление пятен ионизации хаотично расположенных в ионосфере в окрестности будущего эпицентра может быть связано с импульсными источниками. Новая ионизация возможна либо при облучении ионосферы мощными всплесками электромагнитного излучения, либо за счет появления в ионосфере потоков

энергичных частиц, способных к ионизации нейтральных компонент нижней ионосферы. Такими ионизирующими источниками обладают молниевые разряды в атмосфере.

Появление молниевой активности перед землетрясением в диапазоне высот до 10 км и выше обсуждалось впервые в работах [5,6], где предложена и модель процессов, приводящих к молниевой активности в атмосфере и излучению в УКВ диапазоне. На рисунке 3 представлена зависимость минимальной высоты УКВ (53 МГц) излучающих источников от дальности для трех землетрясений (А, В, С) по данным станций сети (о. Крит [5]). Из рисунка видно, что для приема УКВ-сигналов на расстояниях 300-400 км (без привлечения эффекта аномалий атмосферной рефракции) высота излучателей может достигать 5-10 км над уровнем моря. Так как мониторинг сейсмогенного УКВ излучения проводился непрерывно и длительное время, то анализируемый материал получен для всех возможных событий, происшедших почти за трехлетний период наблюдений.

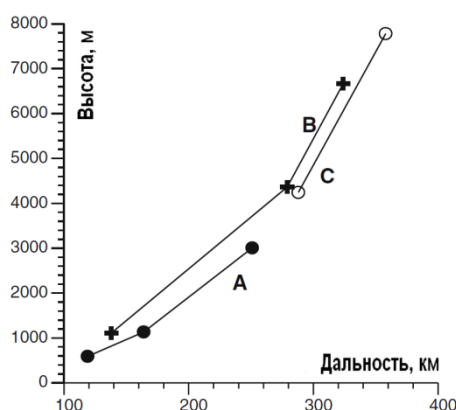


Рис. 3. Зависимость высота-дальность УКВ излучающих источников

Предложена и обоснована теория [13] генерации высокочастотного предвестника землетрясений, в основе которой лежит предположение об образовании заряженных облаков в атмосфере над зоной подготовки землетрясения и последующих электрических разрядах, являющихся источником излучений в УКВ диапазоне. Возможный кандидат вскоре был обнаружен и интенсивно исследуется в настоящее время [14]. Это особый класс проявлений молниевой активности - компактные внутриоблачные разряды (в англоязычной литературе это явление носит название compact intracloud discharge, CID). Компактные разряды происходят существенно выше обычных молний в диапазоне высот от 8 до 17 км. Необычна также мощность (до десятков гигаватт), излучаемая ими в радиодиапазоне – эти разряды считаются самыми интенсивными на Земле естественными источниками радиоизлучения в КВ – УКВ диапазонах. Независимые оптические и радио измерения эффектов CID на спутнике FORTE позволили оценить эффективную мощность УКВ излучения (ERP - Effective Radiated Power) в полосе частот 26-49 МГц, которая превышала 140 кВт. Основная же часть излучаемой электромагнитной энергии находится в ОНЧ диапазоне.

Эффекты в ионосфере от молниевых разрядов и сопровождающих их ОНЧ излучений

Исторически эти явления были обнаружены и активно исследовались в связи с кратковременными нарушениями СДВ связи на длинных трассах [15,16]. Это прямое воздействие (т.е. нагрев, спрайты и т.д.) и не прямое - через высыпания энергичных частиц радиационных поясов, индуцированное молниевыми ОНЧ излучениями. В СДВ диапазоне искажения в фазе сигнала обычно происходят очень медленно, но иногда

амплитуда и фаза сигнала может претерпевать и быстрые изменения за короткий промежуток времени (1-2 секунды) вследствие так называемого Тримпи-эффекта (Trimpi Events), при котором фаза скачком величивается на $5-10^\circ$. На рисунке приведен такой пример резкого изменения амплитуды СДВ сигнала. Время восстановления составляет десятки секунд. Размер области «поражения» ионосферы находится в пределах 100-300км.

Ионизация, создаваемая высыпаемыми захваченными энергичными электронами (с энергиями до 500 -600 кэВ) из-за рассеяния вызванного свистами в магнитосфере – это Тримпи первого типа. Этот вид Тримпи появляется через секунду или немного больше после причины - молниевых разрядов. Такие индуцированные свистами высыпания измерялись напрямую спутниками и ракетами.

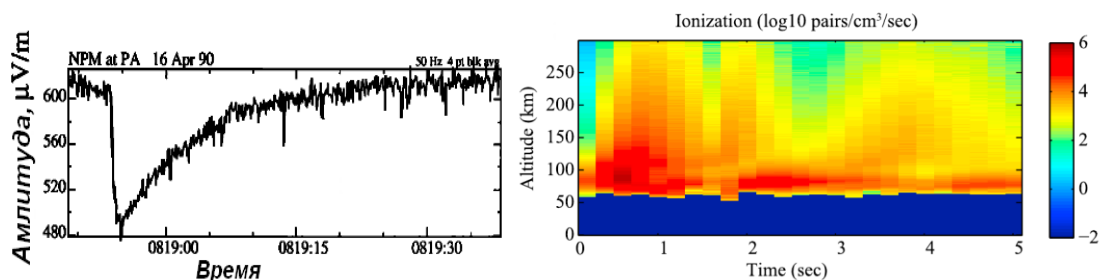


Рис.4 Фаза восстановления во времени (слева -“Тримпи эффект”) СДВ сигналов. Справа - результат расчетов скорости ионизации методом Монте Карло для типичного Тримпи (адаптирован из[18])

Тримпи эффект второго рода появляется через 0.1 -0.2сек (нарастание тоже) после разряда – это прямой или быстрый эффект. На рисунке (справа) представлен результат модельного расчета [17,18] скоростей ионизации ионосферы для типичного спектра высыпания энергичных электронов радиационного пояса (LER – эффект), являющегося источником наблюдаемого Тримпи эффекта в СДВ диапазоне. Видно, что наиболее ранняя ионизация происходит в пределах первой секунды в диапазоне высот 80-160 км за счет более энергичной компоненты спектра. Процесс продолжается несколько секунд уже за счет мягкой части спектра высыпающихся частиц (см. высоты до 300 км).

В результате, исходя из параметров приведенных выше и характеристик импульсных аномалий ТЕС, можно предполагать, что на заключительной стадии подготовки ЗТ за несколько минут до главного толчка в атмосфере происходили интенсивные разряды молний, сопровождавшиеся высыпаниями энергичных частиц из внутреннего радиационного пояса Земли. Резкие изменения ионизации на пути лучей GPS в ионосфере происходящими хаотично на огромной площади (по высоте 80 - 300км, а по горизонтали 150-300 км) в зоне над эпицентром и явились причиной регистрируемых аномалий ТЕС. Эти выводы подтверждаются анализом данных спутника DEMETER для нескольких орбит в окрестности, как в день землетрясения, так накануне.

Данные спутника ДЕМЕТЕР

Спутник DEMETER был запущен на круговую орбиту для диагностики ионосферных возмущений, связанных с землетрясениями, извержениями вулканов, а также электромагнитных проявлений человеческой активности. Его характеристики подробно изложены в серии статей специального выпуска журнала [19]. На Рис. 5 приведены (слева) результаты измерений аппаратурой спутника DEMETER (на высоте ~ 660 км) за 27 февраля 2010 года, когда спутник пролетал восточнее эпицентра за 4 часа до ЗТ на минимальном расстоянии ~ 400 км от эпицентра. Верхняя панель – это

энергетический спектр энергичных электронов (до 500 кэВ), а нижняя панель представляет измеренные потоки энергичных электронов с энергиями до 0.1 МэВ, 1.0 МэВ и 2.5 МэВ соответственно. Вертикальная стрелка – момент, когда орбита пересекает магнитную силовую линию (см. панель справа).

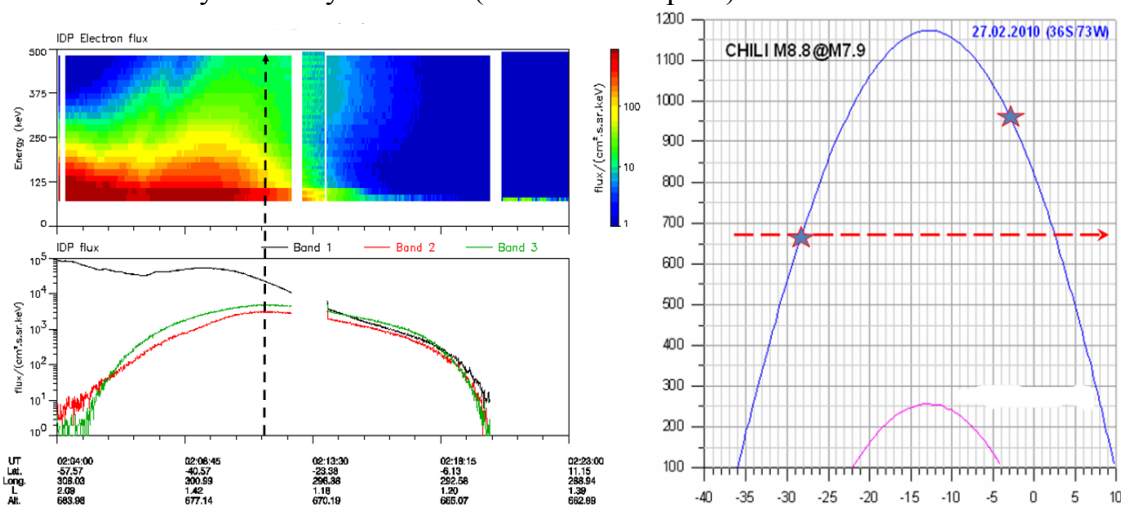


Рис.5. Данные измерений на борту спутника (слева) и магнитная силовая линия (справа), соответствующая проекции эпицентра на высоту 100 км (оси: высота/широта)

Представленные спектры и потоки энергичных частиц (за несколько часов до ЗТ) и являются в нашем случае базой для импульсного ионизирующего источника ночной ионосферы (местное время около полуночи). На графике справа представлены силовые линии магнитного поля и траектория спутника. Звездочками помечены эквивалентные уровни магнитного отражения (питч угол около 90°), как над зоной подготовки землетрясения, так и в противоположном магнитно-сопряженном районе. Видно, что частицы могут высыпаться только в зоне над землетрясением из-за градиента магнитного поля вблизи Бразильской аномалии (отношение магнитных полей вдоль орбиты (высота 670 км) составляет 1.2375).

Обсуждение

Длительность всплесков скорости изменения ТЕС находятся в пределах десятков секунд. Всплески появляются хаотично как в пространстве (в окрестности эпицентра), так и во времени за 20 минут до главного толчка (см. Рис.1). Приняв это во внимание, мы предлагаем следующую последовательность событий (Рис.6).

После мощного разряда в атмосфере 1 значительная порция всплеска ОНЧ излучения просачивается в магнитосферу и приводит к высыпаниям энергичных электронов радиационных поясов. Потоки частиц (LEP явление – крупная стрелка на Рис.6) достигают низа ионосферы (80-90 км), производя по пути интенсивную ионизацию в ионосфере – область 3 (ниже высот 250 -300 км).

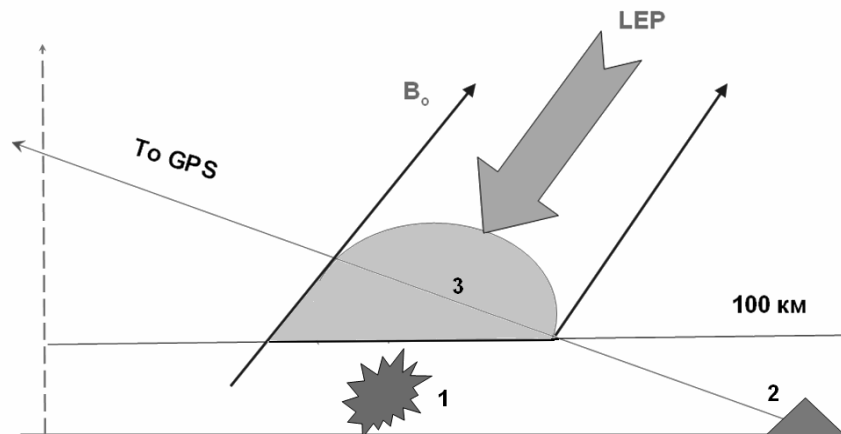


Рис.6. Схема событий для оценок импульсных аномалий вариации ТЕС

Приведем оценку вариации ТЕС исходя из данных по скорости ионизации (Рис.4) и возможных размеров области ионосферы пораженной Тримпи – эффектом. Скорость ионизации примем в пределах $5 \cdot 10^4 - 10^5 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, а размер области вдоль радиолуча – 200 км (выбор из 150-300 км) и в результате получаем:

$(5 \cdot 10^4 - 10^5) \times 200 \times 10^5 = 10^{12} - 2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ или 1-2 TECU, что эквивалентно амплитуде на Рис.1, если время ионизации меньше 1 секунды.

Такие вариации уверенно регистрируются методом радиопросвечивания сигналами спутников. Таким образом, за счет предложенного варианта импульсного источника ионизации – выплескивания энергичных частиц, индуцированных разрядами молний, реально получить вспышки ионизации в ионосфере, регистрируемые за 10 минут до землетрясения в Чили 27.02.2010.

Заключение

Непосредственно перед землетрясением по данным всех наблюдаемых в это время спутникам отмечено мгновенные изменения скорости изменения электронного содержания, превышающие ее обычный фоновый ход. При этом максимальное значение было отмечено в точке, практически совпадающей с эпицентром землетрясения и временем его возникновения.

Показано, что наличие молниевых разрядов и условий для индуцированного выплескивания энергичных частиц могли приводить к импульсному изменению концентрации плазмы ионосферы в диапазоне высот до 250-300 км, которые и явились причиной обнаруженной импульсной аномалии в изменении скорости нарастания ТЕС.

Исследования проведены при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0108)

Литература

1. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
2. Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Depueva A.Kh. Seismo-ionospheric precursors and atmospheric electricity // Turk. J. of Physics. V.18. №11. P. 1229-1234. 1994.
3. Ruzhin Yu.Ya, Depueva A.Kh. Seismoprecursors in space as plasma and wave anomalies, Journ. Atmospheric Electricity, V.16, N. 3, 1996, pp.271-288.
4. Hayakawa M. (Eds.), 1999. Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, Japan. 996 p.

5. Ruzhin, Yu.Ya., Nomicos, C., Vallianatos, F., 2000. High frequency seismoprecursor emissions. In: Proceedings of 15th Wroclaw EMC Symposium, pp. 512–517.
6. Ruzhin Yu., Nomicos C. Radio VHF precursors of earthquakes. 2007. *Natural Hazards*. V. 40. 573-583. DOI 10.1007/s11069-006-9021-1.
7. Devi M., A. K. Barbara, Ya. Yu. Ruzhin, M. Hayakawa. 2012. Over-the-Horizon Anomalous VHF Propagation and Earthquake Precursors. *Surv. Geophys.* DOI 10.1007/s10712-012-9185-z.
8. Devi M., Barbara A. K., Depueva, A. H., Ruzhin, Yu.Ya., Depuev, V., 2010, Anomalous Total Electron Content (TEC) and atmospheric refractivity prior to very strong China earthquake of May 2008, *International Journal of Remote Sensing*, 31, 3589-3599.
9. Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Shagimuratov I.I. Anomalies of ionospheric TEC above Turkey before two strong earthquakes at 1999 // *Proceed. 15th Wroclaw EMC Symposium*, 2000.
10. Ruzhin, Yu.Ya., Oraevsky V.N., Shagimuratov I.I. and Sinelnikov V.M., 2002. Ionospheric precursors of earthquakes revealed from GPS data and their connection with “sea-land” boundary // *Proceed. 16th Wroclaw EMC Symposium*, pp. 723-726.
11. Liu J.Y., Chuo Y.J., Shan S.J., Tsai Y.B., Chen Y.I., Pulnits S.A., Yu S.B. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurement // *Annales Geophysicae*, 2004. Vol. 22. P. 1585-1593.
12. В.А. Андрианов, В.М. Смирнов. Определение высотного профиля электронной концентрации ионосферы Земли по двухчастотным измерениям радиосигналов искусственных спутников Земли // *Радиотехника и электроника*. 1993.Т.38,№7, 1326-1335.
13. Sorokin V.M., Yu.Ya. Ruzhin, V.D. Kuznetsov, A.K. Yaschenko. Generation of VHF radio emissions by electric discharges in the lower atmosphere over a seismic region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73 (2011), N5-6, 664–670
14. R. Jacobson and T. E. L. Light. Revisiting “Narrow Bipolar Event” intracloud lightning *Ann. Geophys.*, 30, 389–404, 2012, [doi:10.5194/angeo-30-389-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-389-2012)
15. Inan, U. S., T. F. Bell, J. V. Rodriguez, Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 705–708, 1991
16. Johnson, M. P., U. S. Inan, and D. S. Lauben (1999), Subionospheric VLF signatures of oblique (nonducted) whistler-induced precipitation, *Geophys. Res. Lett.*, 26(23), 3569–3572
17. Bortnik, J., U. S. Inan, and T. F. Bell (2006), Temporal signatures of radiation belt electron precipitation induced by lightning-generated MR whistler waves. *J. Geophys. Res.*, 111, A02, 205.
18. Marshall, R. A., J. Bortnik, N. Lehtinen, and S. Chakrabarti (2011), Optical signatures of lightning-induced electron precipitation, *J. Geophys. Res.*, 116, A08214, doi:10.1029/2011JA016728.
19. First results of the DEMETER micro-satellite. // *Planetary and Space Sci.*, 2006. Vol. 54, No. 5 (special issue).