

## СЕКЦИЯ 5. ФИЗИКА ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

### ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПОСЛЕ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ VARIATIONS OF PLASMA PARAMETERS OF THE UPPER IONOSPHERE AFTER THE UNDERGROUND NUCLEAR TESTS

Г.Г. Беляев, В.М. Костин, О.Я. Овчаренко, Е.П. Трушкина  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, [belyaev@izmiran.ru](mailto:belyaev@izmiran.ru)

*Observations of the ionosphere disturbances during the underground nuclear explosions (UNE) at various ranges from the satellite Cosmos-1809 at an altitude of about 960 km are presented. Relaxation processes in the Earth's crust after UNE can be associated with the mechanisms of stress before earthquakes. During joint verification experiments to monitor UNE at the Nevada Test Site (NTS) and at the Semipalatinsk Test Site (STS) dynamics of the ionospheric plasma parameters perturbations (within 3 days) over the polygons and magnetoconjugate area were discussed. Physical mechanisms explaining the different types of observed perturbations was proposed with operation TEXARKANA conducted at NTS, when the satellite was near the magnetic zenith at the time of the explosion. These perturbations are compared with those at the same day Pacific Ocean Harry typhoon and Indian Ocean Kirryly one. The experiment on the Moruroa atoll 21.11.1990, carried out during the anomalous condition of the upper ionosphere because of super typhoons Page and Owen. It is showed that the lithospheric source can be successfully identified with the ionospheric satellite in this case too.*

Наблюдение ионосферных эффектов подземных ядерных взрывов (ПЯВ) позволяет глубже понять физику ионосферных предвестников землетрясений. Обширная библиография по этим вопросам представлена в монографии [1]. В докладе приводятся данные, полученные со спутника Космос-1809, при проведении ПЯВ на различных полигонах. В 1987-1993 гг. проводился мониторинг ПЯВ [2], а также выполнялись наблюдения ряда активных экспериментов в космосе по программе ИПГ [3]. Спутник имел солнечно-синхронизированную круговую орбиту на высоте ~ 960 км, что позволяло, сопоставляя наблюдения на соседних витках, выделять локальные источники возмущений.

Анализ данных наблюдений спутника Космос-1809 в сейсмоактивный период январь-февраль 1989 г., когда произошло более 100 землетрясений, показал [4,5], что в области ( $\Delta\lambda = \pm 6^\circ$ ), которая проецируется по магнитному полю на E-слой ионосферы над очагом, наблюдается возрастание КНЧ шумов и относительных вариаций плотности электронов, достигающих 10% и имеющих масштаб 10-100 км. Перечисленные выше эффекты имеют региональную окраску. Эти результаты хорошо согласуются с более ранними наблюдениями на идентичном спутнике Интеркосмос-19 [6]. Эффекты техногенного воздействия на E-слой изучались над СДВ радиопередатчиком [7], а на F-слой - при работе нагревного стенда Сура [8].

В настоящее время проводится углубленный анализ данных спутника Космос-1809, включая измерения электрического поля (прибор ДЭП), КНЧ-ОНЧ электромагнитных излучений и шумов (прибор АНЧ-2МЕ [9]), плотности электронов и ее флуктуаций (прибор ИЗ-2 [10]), электронной температуры (прибор КМ-9 [11]). Достоверность выделения литосферных источников возрастает, если учитывается геомагнитная ситуация, постоянно действующие мощные СДВ радиостанции, а также мощные атмосферные процессы [12].

В 1987-1989 гг. при проведении ПЯВ на Семипалатинском полигоне (СЯП) в 9 опытах датчиками магнитного поля регистрировались УНЧ-КНЧ излучения и шумы на удалении 100-250 км [13]. Оказалось, что на спутнике Космос-1809 наблюдался резкий рост КНЧ-ОНЧ шумов в ионосфере после проведения ПЯВ, а по данным измерений наземной аппаратуры увеличение КНЧ-ОНЧ шумов зарегистрировано не было.

Наиболее полная картина динамики возмущений в ионосфере при ПЯВ была получена для эксперимента "Терсаркана" в Неваде 10.02.1989 г. Опыт проводился в скважине глубиной 1267 м с зарядом 100 кт. На рис.1 (a,b) представлено изменение амплитуды электрического поля в двух частотных каналах ОНЧ волнового комплекса ИСЗ Космос-1809 на двух последовательных витках при проведении ПЯВ. На рис. 1 (a) показана разность сигналов (заштрихованная область), зарегистрированных на витке 10854, во время которого был проведен взрыв (приведены время и координаты ИСЗ), и на фоновом витке 10853, смещенном по долготе на  $26,4^\circ$  к востоку и по

времени на 104 мин. Заштрихованная область на рис. 1 (b) - превышение сигнала, измеренного на следующем витке 10855, над сигналом, измеренным на витке 10854. Цифрами на рис. 1 отмечены: 1 - момент взрыва; 2 - прохождение магнитной оболочки (L-shell), проецирующейся по полю от D-слоя ионосферы над полигоном до ИСЗ; 3 - L-оболочка  $F_{max}$ ; 4 - момент вхождения акустической волны в D-слой; 5 - вхождение ИСЗ в зону воздействия МВт СДВ радиопередатчиков; 6 - экваториальная часть зоны ионосферного возмущения через 100 мин.; 7 - перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ).

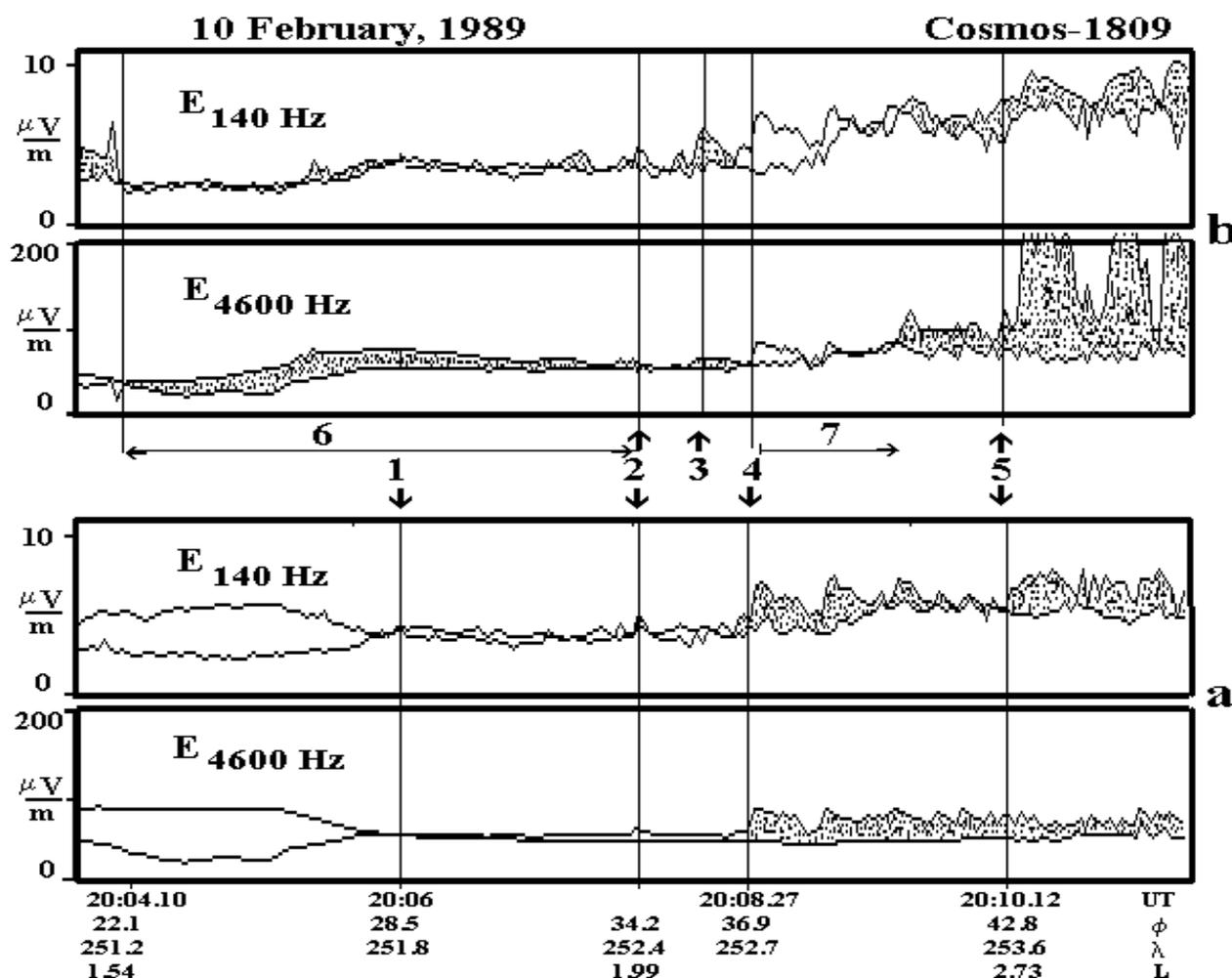


Рис.1. Изменение амплитуды электрического поля в двух частотных каналах ОНЧ волнового комплекса ИСЗ Космос-1809 при проведении опыта Texarkana в Неваде

Прохождение электромагнитного импульса (ЭМИ) четко не определяется. Акустическое воздействие (АВ) приводит к формированию в ионосфере пояса КНЧ турбулентности через 2,5 мин после взрыва. Эти результаты подтверждены наземными наблюдениями в КНЧ диапазоне в других опытах и комплексными наблюдениями взрывов при ликвидации ракет под Волгоградом [2]. Так, 21.10.1990г. на полигоне Капустин Яр в 8:00 UT было начато уничтожение связок ракет по 5-7 штук общим эквивалентом  $\sim 100$  т ТНТ в связке с интервалом 15 мин. На спутнике Космос-1809, находившемся вблизи зенита, через 2,5 мин после начала подрывов был зарегистрирован сильный восходящий свист и развитие шумов в диапазоне частот до 1 кГц.

Воздействие ПЯВ в данном случае, по-видимому, наложилось на крупномасштабную АГВ, возбужденную тайфуном Kyrilly [12]. Развитие и смещение на север АГВ последовательно регистрировалось на витках 10848-10856 по каналам E140 Гц и E4600 Гц.

Важный идентификационный признак ПЯВ связан с модификацией зон воздействия на ионосферу мощными СДВ передатчиками. Оперативно получать информацию со спутника можно в режиме прямой передачи наблюдений с ОНЧ волнового комплекса. 17.12.1988 г. на приемном пункте ИЗМИРАН Соболев Я.П. осуществлял прием широкополосного сигнала со спутника

(витки 10084, 10085). На первом витке, который проходил вдоль меридиана  $52^\circ$  в 3:05 UT, никаких особенностей в сигналах не было. На следующем витке через 40 мин после ПЯВ в Семипалатинске при анализе данных была обнаружена необычная аномалия на L-оболочке Новосибирского СДВ радиопередатчика.

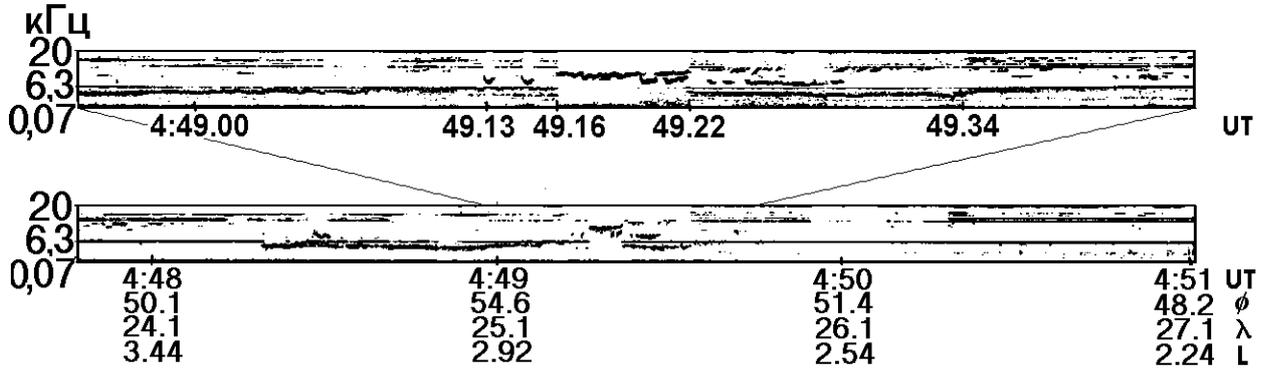


Рис.2. Сонограмма широкополосного сигнала с прибора АНЧ-2М через 50 мин после ПЯВ 17.12.1988 г. (Соболев Я.П.)

На рис. 2 представлены сонограммы этого сигнала с различной разверткой. По вертикальной оси показана частота, по горизонтальной — время, степень почернения пропорциональна интенсивности. Обращает на себя внимание хорошо развитая полоса плазменной турбулентности вблизи нижнегибридного резонанса с резко измененным ионным составом в 4:49:16 — 4:49:22 UT, что соответствует увеличению относительной концентрации легкой компоненты в области 40 км. На полярной границе области в 4:49:13 UT наблюдается отражение свистов.

Детально (режим ЗАП2) последствие ПЯВ на ионосферу изучалось со спутника Космос-1809 при проведении совместных советско-американских экспериментов по контролю ПЯВ (СЭК) 17-19.08.1988 г. (опыт Kearsarge) и 14-15.09.1988 г. (опыт на СЯП). В первый день над полигонами наблюдалось формирование области с резко измененным спектром КНЧ-ОНЧ шумов, интенсификация нестационарных областей воздействия мощных СДВ радиопередатчиков, расположенных севернее полигонов. На рис. 3 представлены КНЧ-ОНЧ данные во всех частотных каналах комплекса АНЧ-2М через 5 часов после опыта в 125 кт на СЯП.

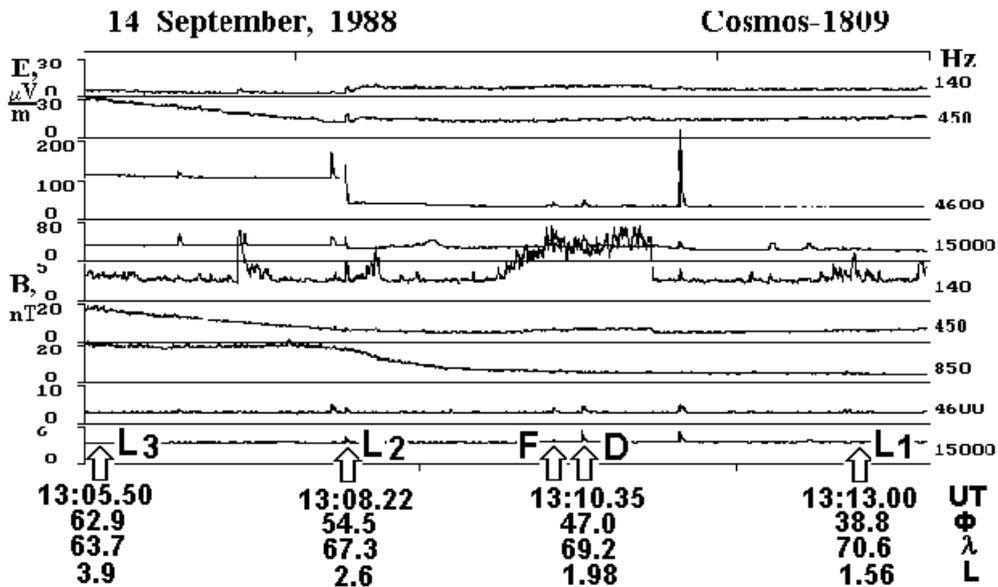


Рис.3. Возмущения в ионосфере в отдельных частотных каналах через 5 час. после проведения ПЯВ в 125 кт на СЯП. D — момент прохождения спутником магнитной оболочки, проецирующейся по магнитному полю на высоту 80 км над полигоном, F — момент прохождения оболочки max F — слоя, L<sub>1-3</sub> — моменты прохождения характерных локальных аномальных возмущений в регионе.

Обращает на себя внимание возмущение в магнитном канале В140 Гц. Такого типа возмущения регистрировались над зонами землетрясений в работе [4]. Как показала ночная регистрация 17.01.1991 г., после первого дня военных действий в зоне Персидского залива с распределенным акустическим воздействием в  $\sim 1$  кт наблюдались такие же локализованные аномалии В140 Гц над Кувейтом, Багдадом, северным Ираком.

Более устойчивые симметричные возмущения наблюдались в течение 2-3 дней после СЭК в магнитосопреженных областях ионосферы южного полушария. В этих КНЧ-ОНЧ возмущениях выделяется только электрическая компонента, как показано на рис. 4 для опыта на СЯП. В этих областях зафиксировано квазипостоянное электрическое поле  $\sim 10$  мВ/м.

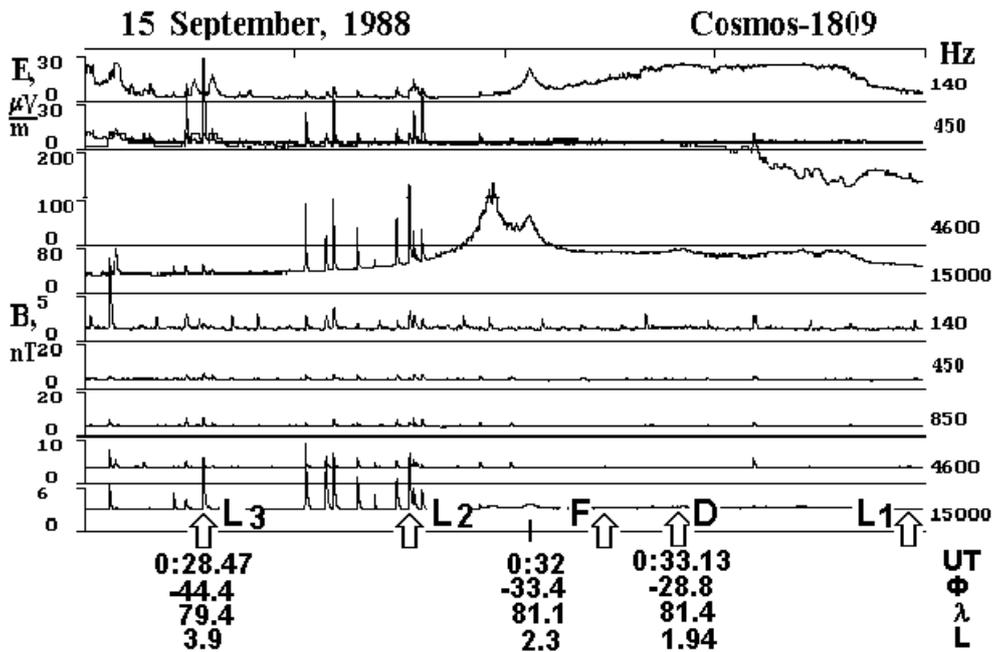


Рис. 4. Возмущения в магнитосопреженной ионосфере через сутки после проведения СЭК на СЯП ПЯВ по данным КНЧ-ОНЧ измерений в отдельных частотных каналах. Выделены моменты прохождения спутником характерных магнитных оболочек в соответствии с рис. 3.

Над полигоном NTS и в магнитосопреженной области после проведения опыта Kearsarge с учетом различия в местном времени (LT) относительно времени пролета над СЯП наблюдалась несколько измененная картина возмущений. Причем, наибольшие локализованные возмущения, проецирующиеся из магнитосопреженной области по магнитному полю на E-слой над широтой полигона, зарегистрированы через 2 дня после опыта. Следует отметить, что анализ электромагнитных шумов в плазме верхней ионосферы после землетрясений также дает схожие зависимости [4,5].

В течение нескольких суток устойчивые картины изменения параметров ионосферы, связанные с литосферными напряжениями в земной коре и процессами в очаге взрыва, наблюдались только для ПЯВ с эквивалентами  $\geq 100$  кт. Так, возмущения в неосвещенной ионосфере через 12 часов после опыта Техаркана отчетливо выделяются только в сопряженной области на витке, проходящем западнее полигона. Резкое локализованное увеличение плотности Ne на 40% и горизонтальной компоненты электрического поля на 10 мВ/м с масштабами  $\sim 1000$  км, а также флуктуации  $dNe/Ne$  на  $\sim 2\%$  с масштабом  $\sim 100$  км, скорее всего, связано с близостью терминатора.

В дневных условиях картина возмущений меняется. Через 24 часа после опыта Техаркана отдельные параметры ионосферной плазмы представлены на комплексном рис.5 для двух последовательных витков восточнее и западнее полигона NTS. Стрелками отмечена географическая широта NTS (стрелка вверх) и его магнитосопреженная область (стрелка вниз). Локализованные особенности, обусловленные ПЯВ, выделяются только южнее магнитного зенита NTS.

Наблюдение литосферного источника в экваториальной ионосфере имеет особенности, связанные с воздействием тайфунов на ионосферу [12], что надо учитывать при регистрации ПЯВ.

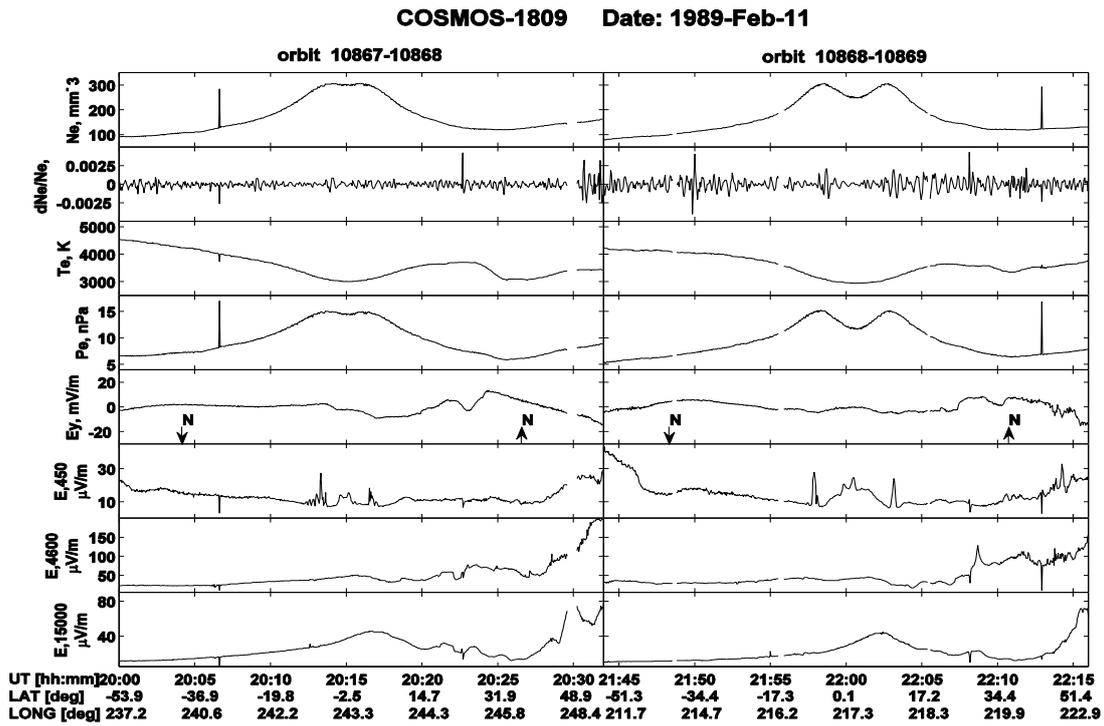


Рис. 5. Возмущения параметров ионосферной плазмы через 24 часа после опыта Техаркана. Стрелки соответствуют географической широте NTS  $\uparrow$  и ее магнитному сопряжению  $\downarrow$ .

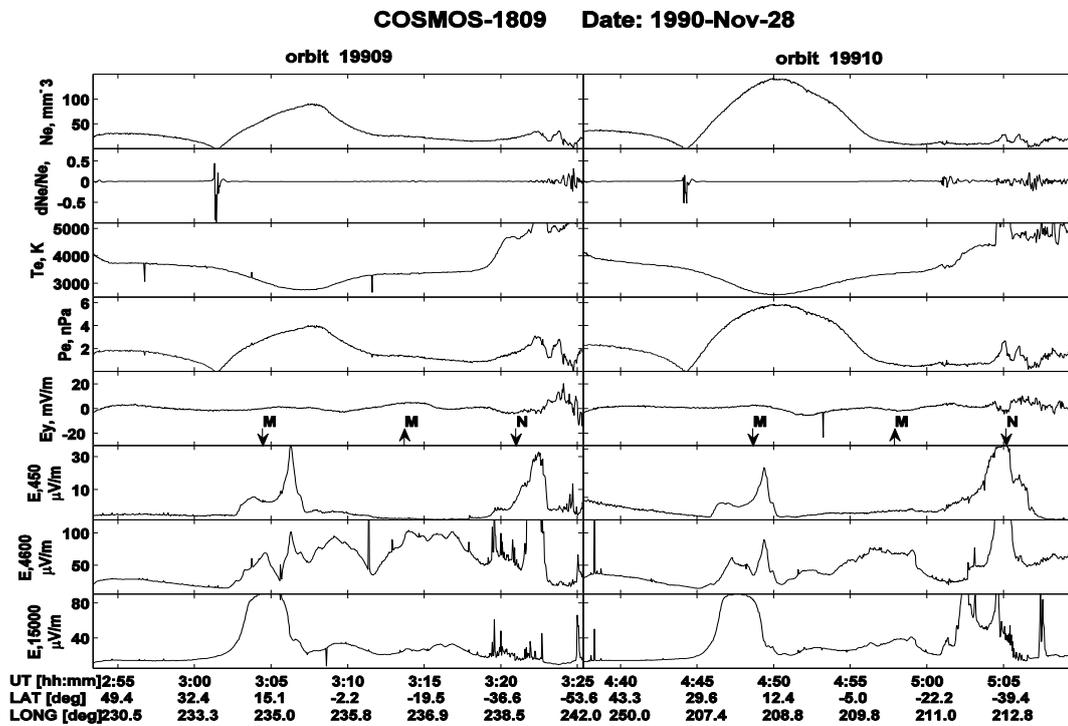


Рис. 6. Параметры ионосферной плазмы после опыта 21.11.1990 г. на французском полигоне Могуроа эквивалентом в 37 кт и опыта Houston 14.11.1990 г. от 20 до 150 кт на NTS.

Так, 21.11.1990 г. спутник прошел над полигоном Могироа через 20 мин после ПЯВ. Однако, состояние ионосферы было сильно возмущено, набравшим силу супертайфунами Page и Owen в северной части Тихого океана. На фоне ночной экваториальной аномалии удалось выделить сигнал, похожий на обсуждавшиеся выше, только в канале E140 Гц в сопряженной области.

На рис.6 представлены отдельные параметры ионосферы на двух витках над полигонами через неделю.

Выводы.

1. Когда аппаратура спутника Космос-1809 была включена, то в день проведения опытов зарегистрированы все ПЯВ. Слабые ПЯВ  $< 10$  кт идентифицировались по изменению структуры зоны воздействия близко расположенных мощных СДВ передатчиков.
2. Граница ПИВ, возникающего от АВ, которая определяется по резкому изменению ионного состава (скачок в частоте НГР и интенсивности шумов), поддерживается прохождением вистлеров, что увеличивает их время жизни.
3. Релаксационные процессы в литосфере около очага ПЯВ для опытов с эквивалентами  $\geq 100$  кт приводят к формированию на L-оболочках, опирающихся на E-слой, пояса КНЧ турбулентности, который часто заметнее в сопряженном полушарии. Для формирования пояса и прохождения электронов важно состояние F-слоя, что моделировалось в нескольких десятках опытов при включении стенда Сура под пролеты спутника дополнительно к результатам работы [8].
4. На высоте спутника сигналы от литосферного источника зависят от геомагнитной обстановки, местного времени, сезона, мощных атмосферных процессов [12].

Авторы благодарят В.В. Афолина, Г.П. Комракова и Я.П. Соболева за возможность работы с данными приборов КМ-9, ИЗ-2 и АНЧ-2М.

#### Литература

1. Гохберг М.Б., Шалимов С.Л. Воздействие землетрясений и взрывов на ионосферу // М.: Наука. С. 295. 2008.
2. Костин В.М., Мурашев В.Н. Экспериментальные исследования возможностей спутникового радиомониторинга подземных ядерных испытаний // Рожденная атомным веком / Под ред. А.П. Васильева. М.: ССК МО. Ч. 3. С. 178-191. 2002.
3. Авдюшин С.И., Ветчинкин Н.В., Козлов С.И., Петров Н.Н., Романовский Ю.А. Программа «Активные эксперименты и антропогенные эффекты в ионосфере»; организация, аппаратно-методическое обеспечение, основные результаты исследований // Космич. исслед. Т. 31. № 1. С. 3-25. 1993.
4. Chmyrev V.M., Isaev N.V., Serebryakova O.N., Sorokin V.M., Sobolev Ya. P. Small-scale plasma inhomogeneities and correlated ELF emissions in the ionosphere over earthquake region // J. Atm. Solar-Terr. Phys. Vol. 59. No. 9. P. 967-974. 1997.
5. Isaev N.V., Serebryakova O.N. Electromagnetic and plasma effects of seismic activity in the Earth ionosphere // Chem. Phys. Reports, Vol. 19(6). P.1177-1188. 2001.
6. Larkina V.I., Migulin V.V., Ruzhin Yu.Ya., Sergeeva N.G., Senin B.V. Electromagnetic emissions over the deep lithosphere faults by satellite measurements // Adv. Space Res. Vol. 26. No. 7. P. 1189-1193. 2000.
7. Sonwalkar V.S., Inan U.S., Bell T.F., Helliwell R.A., Chmyrev V.M., Sobolev Ya.P., Ovcharenko O.Ya. and Selegej V. Simultaneous observations of VLF ground transmitter signals on the DE 1 and COSMOS 1809 satellites: Detection of magnetospheric caustic and a duct // J. Geophys. Res. Vol. 99. No. A9. P. 17511-17522. 1994.
8. Костин В.М., Романовский Ю.А., Чмырев В.М., Борисов Н.Д., Исаев Н.В., Комраков Г.П., Михайлов Ю.М., Намазов С.А., Овчаренко О.Я., Соболев Я.П., Трушкина Е.П., Селигей В. Спутниковые исследования возмущений внешней ионосферы при воздействии мощных КВ радиоволн на F область ионосферы // Космич. исслед. Т. 31. № 1. С. 84-99. 1993.
9. Воробьев О.В., Коробовкин В.В., Михайлов Ю.М., Рожков В.Б., Соболев Я.П. Приемная аппаратура для регистрации естественных низкочастотных сигналов и шумов // Аппаратура для исследования внешней ионосферы / Под ред. Г.В. Васильева и Ю.В. Кушнеревского. М.: ИЗМИРАН. С. 136-142. 1980.
10. Комраков Г.П., Иванов В.П., Попков И.В., Тюкин В.Н. Измерение электронной концентрации ионосферы методом высокочастотного импедансного зонда // Космич. исслед. Т. 8. № 2. С. 278-283. 1970.
11. Афонин В.В., Гдалевич Г.Л., Грингауз К.И. и др. Исследование ионосферы, проведенные при помощи спутника «Интекосмос-2». III. Измерение электронной температуры в ионосфере методом высокочастотного зонда // Космич. исслед. Т. 11. № 2. С. 254-266. 1973.
12. Исаев Н.В., Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. Возмущения верхней ионосферы, вызванные тайфунами // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 2. С. 253-264. 2010.
13. Беляев Г.Г. Вариации УНЧ-КНЧ полей, вызванные мощными взрывами и сейсмической активностью. Кандидатская диссертация. ИЗМИРАН. 2003.