

УДК 533.95

В. А. Шувалов¹, А. Л. Макаров², Д. Н. Лазученков¹

¹Институт технической механики Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск

²Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Проведен анализ ионосферных предвестников землетрясений, определены возможности их регистрации с помощью зондовых систем диагностической аппаратуры КА. Показано, что комплекс зондовой диагностической аппаратуры КА, предназначенной для регистрации возмущений кинетических параметров ионосферной плазмы, электромагнитного излучения, высыпания высокоэнергичных протонов и электронов (ионосферных предвестников землетрясений), может быть использован при синхронном режиме эксплуатации приборов для регистрации землетрясений, зарождающихся на подспутниковой трассе.

Ключевые слова: космический аппарат, ионосферная плазма, зондовые измерения, землетрясение, возмущения, идентификация.

ВВЕДЕНИЕ

Землетрясения относятся к числу наиболее опасных природных катастрофических явлений. Мощные землетрясения сопровождаются сдвигами поверхности, трещинами в земной коре, цунами, циклонами и другими катаклизмами. Следствием мощных землетрясений являются разрушения зданий и инфраструктуры, значительный материальный ущерб, гибель десятков тысяч людей и животных. По разрушительным последствиям, количеству жертв, материальному ущербу землетрясения занимают одно из первых мест среди других природных катастроф.

Мониторинг сейсмической активности ведется в течение 100 лет с помощью большого количества наземных геофизических станций. Мировая сеть сейсмических станций и обсерваторий позволяет регистрировать землетрясения

практически в любой точке земного шара — регистрировать, но не предсказывать. Наземные геофизические станции, как бы хорошо они не были оснащены, пока не позволяют регистрировать зарождение землетрясений. Существенным дополнением к наземному комплексу может служить космический сегмент.

Большинство землетрясений готовится длительное время. За несколько дней, часов до начала землетрясений наблюдаются многочисленные изменения параметров среды и электромагнитных полей в ионосфере. В большинстве случаев изменения в ионосфере отражают картину развития землетрясения. Ионосферная плазма чутко реагирует на воздействие «сверху» (вспышки на Солнце, гелиосферные возмущения) и воздействие «снизу» (процессы в литосфере, земной коре и на ее поверхности, в морях и океанах). На воздействие «сверху» ионосфера реагирует, как правило, с опозданием, на воздействие «снизу» — с опережением.

© В. А. ШУВАЛОВ, А. Л. МАКАРОВ, Д. Н. ЛАЗУЧЕНКОВ, 2016

Состояние среды в ионосфере на высотах выше 300 км характеризуется такими кинетическими параметрами, как температура электронов T_e , ионов T_i и нейтралов T_n , концентрация нейтральных N_n и заряженных $N_{i,e}$ частиц (ионов и электронов), а также напряженность электрических и магнитных полей в ионосферной плазме.

Спутниковый мониторинг позволяет осуществлять планетарный контроль изменения комплекса параметров ионосферной плазмы на орбите в точках, соответствующих подспутниковой трассе КА. Измерения, осуществляемые с помощью бортовых средств контактной (зондовой) диагностики, дают пространственно-временные распределения локальных значений параметров плазмы вдоль орбиты.

Плазменный, электромагнитный и химический мониторинг ионосферы позволяет регистрировать аномальные возмущения кинетических параметров частиц, всплески интенсивности электромагнитного излучения низкочастотного диапазона, высыпания высокоскоростных заряженных частиц, инициированные сейсмической активностью на подспутниковой трассе. Спутниковый мониторинг ионосферы, осуществляемый синхронно с регистрацией таких явлений, как выделение латентной теплоты, вариации влажности и химического потенциала, свечение приземной атмосферы, тепловые аномалии, выход радона и других предвестников землетрясений [3, 19, 20], наблюдаемых в атмосфере, позволяет существенно расширить базу данных для разработки краткосрочного прогноза, повысить точность и адекватность физико-математических моделей сейсмической активности.

Оставляя в стороне процедуры идентификации землетрясений по полному электронному содержанию (сигналы спутниковой навигационной системы GPS, регистрируемые наземными станциями) и по критической частоте ионосферной плазмы f_0F2 -области (измеряемой наземными станциями вертикального зондирования атмосферы), рассмотрим особенности регистрации возмущений ионосферной плазмы с помощью зондовых систем КА.

Цель данной работы — продемонстрировать возможности комплексов научной аппаратуры

КА для мониторинга аномальных возмущений ионосферной плазмы и идентификации пространственно-временной локализации эпицентров землетрясений, зарождающихся на подспутниковой трассе.

ИОНОСФЕРНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

По результатам многочисленных наземных и спутниковых наблюдений флуктуаций параметров околоземной плазмы за 50 лет выделены основные изменения в ионосфере, связанные с процессами в земной коре.

На рис. 1 приведен перечень физических эффектов возмущения ионосферной плазмы — предвестников землетрясений, которые могут быть зарегистрированы бортовой аппаратурой КА.

Флуктуации параметров ионосферы, обусловленные сейсмической активностью, происходят, как правило, на фоне многочисленных изменений, связанных с другими процессами в околоземной плазме. Многие из них хорошо изучены. Солнечная и геомагнитная активность, например, приводят к глобальным изменениям планетарного характера в ионосфере [7, 15, 18, 21, 22]. В отличие от них ионосферные предвестники землетрясений носят локальный характер. Области проявления ионосферных предвестников ограничены, как правило, сравнительно небольшой зоной, размеры которой могут быть определены по соотношению

$$r_z = 10^{\beta M}, \quad (1)$$

где r_z — радиус зоны подготовки или зоны активации землетрясения в километрах, $\beta = 0.43$ [12] (или $\beta = 0.44$ [10]), M — магнитуда землетрясения.

Временной критерий предвестников землетрясений за пять дней [19] дает инструмент для временного прогнозирования.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЗОНДОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Зондовые системы успешно используются для диагностики околоземной плазмы. Исходя из опыта эксплуатации зондовых систем на КА,

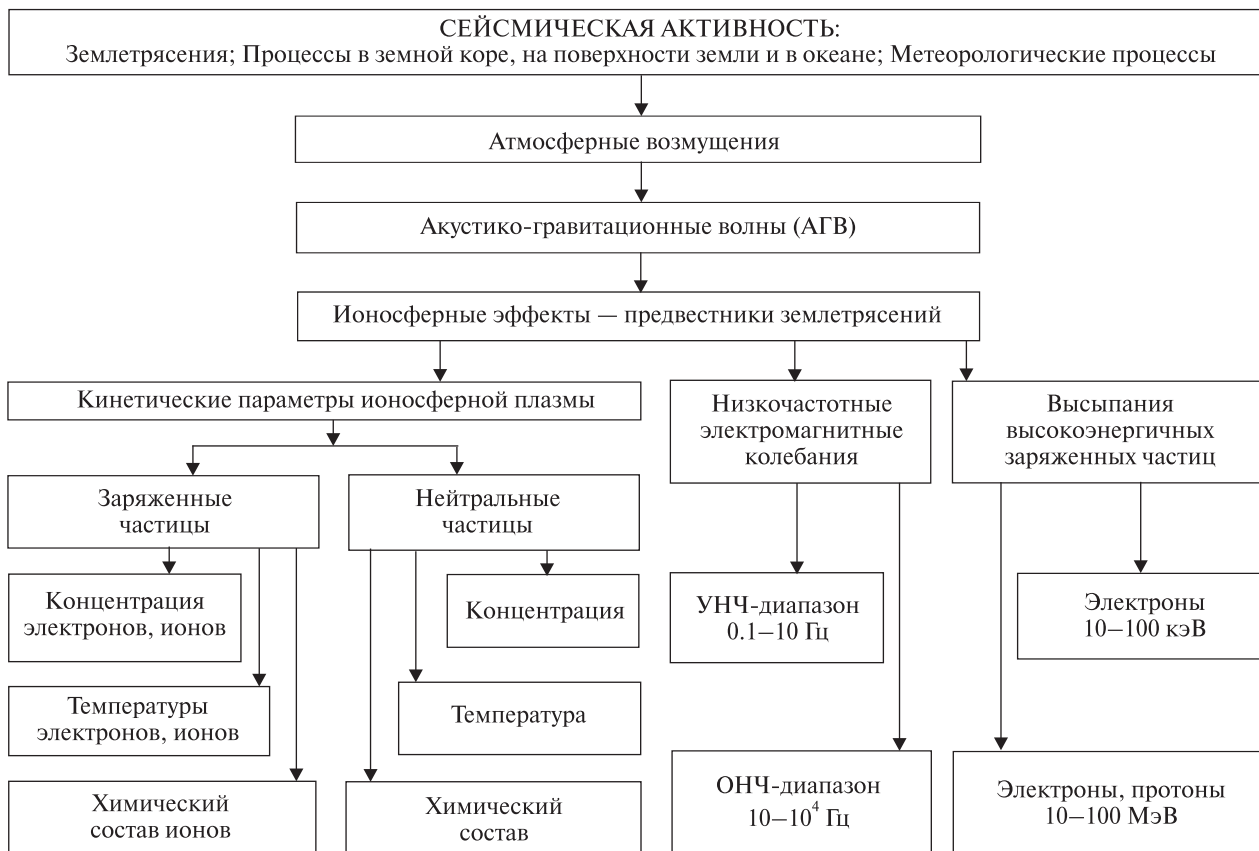


Рис. 1. Перечень физических эффектов возмущения ионосферной плазмы — предвестников землетрясений

проанализируем эффективность применения выходных сигналов зондов различной конфигурации для идентификации землетрясений.

КА DEMETER (Франция): вес 125 кг, перигей 685 км, апогей 712 км, наклонение 98.2° , выведен на орбиту ракетой-носителем «Днепр» 29.06.2004 г., эксплуатировался на орбите около шести лет. Для диагностики и мониторинга параметров ионосферной плазмы на КА DEMETER использовались три зондовые системы [17]: два одинаковых цилиндрических зонда Ленгмюра (ISL, измерительный электрод радиусом $r_p = 0.15$ см, длина рабочей части $l_p = 5.0$ см и длина 7.5 см с охранным электродом), сегментальный зонд Ленгмюра (SLR, сфера диаметром 4.0 см из шести измерительных сегментов) и анализатор ионов тепловой плазмы (IAP). Зондовые системы КА DEMETER использовались для определения параметров заряженных час-

тиц ионосферной плазмы: концентрации электронов N_e , ионов N_i , температуры электронов T_e и ионов T_i .

Землетрясение на о. Суматра. На рис. 2 представлены пространственно-временные распределения параметров N_e , T_e , T_i при пролете КА DEMETER над эпицентром землетрясения 28.03.2005 г. с магнитудой $M = 8.6$. Момент пролета КА DEMETER над эпицентром $UT_1 = 15:50:43$. Землетрясение произошло в $UT_2 = 16:09:37$, т. е. через $\Delta UT \approx 18$ мин 54 с после пролета КА. Возмущения параметров ионосферной плазмы на орбите наблюдались на фоне флуктуаций: максимум концентраций N_e и минимум температур T_e , T_i , обусловленных влиянием экваториальной магнитной аномалии (ЭМА). При пролете КА $UT_1 = 15:50:43$ над эпицентром землетрясения за $\Delta UT \approx 18$ мин 54 с до толчка наблюдалось значительное увеличение

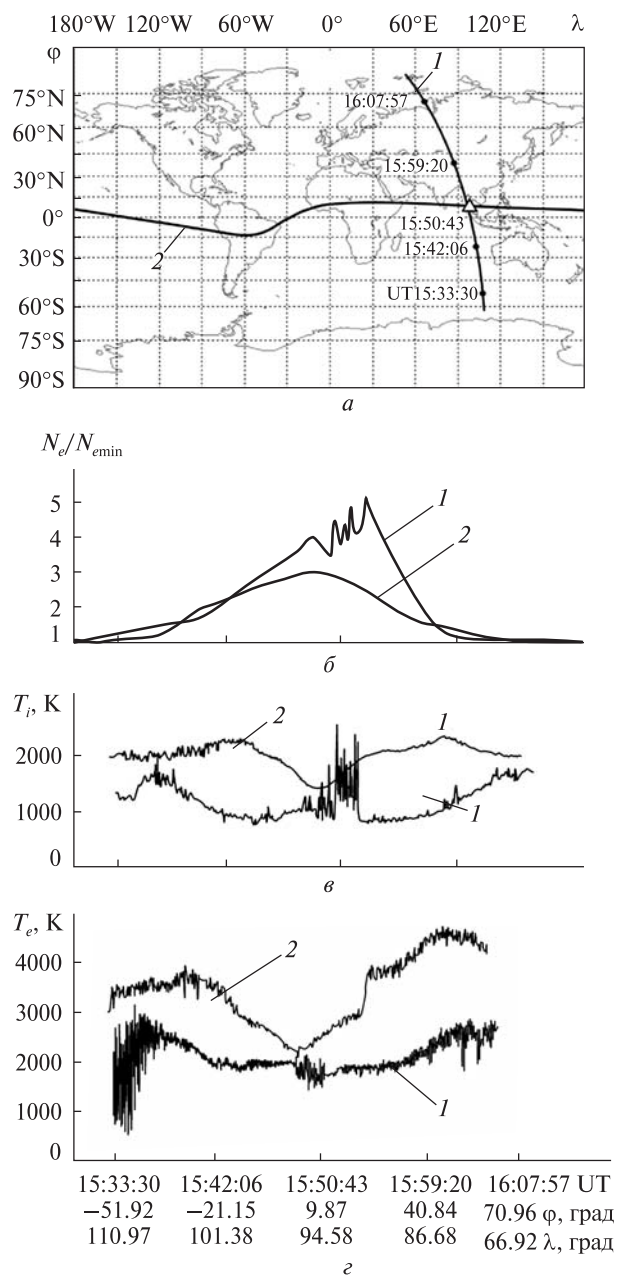


Рис. 2. Возмущения параметров ионосферной плазмы, измеренные КА DEMETER при пролете 28.03.2005 г. над эпицентром землетрясения на о. Суматра: *a* — географическое положение землетрясения (треугольник — эпицентр землетрясения, кривая 1 — участок подспутниковой трассы, кривая 2 — магнитный экватор); *b*, *v*, *z* — нормированное значение концентрации электронов $N_e/N_{e\min}$ ($N_{e\min}$ — значение концентрации электронов на невозмущенном участке орбиты), температура ионов T_i и температура электронов T_e ; кривые 1 — во время землетрясения 28.03.2005 г., 2 — в спокойной сейсмической обстановке 27.02.2005 г.

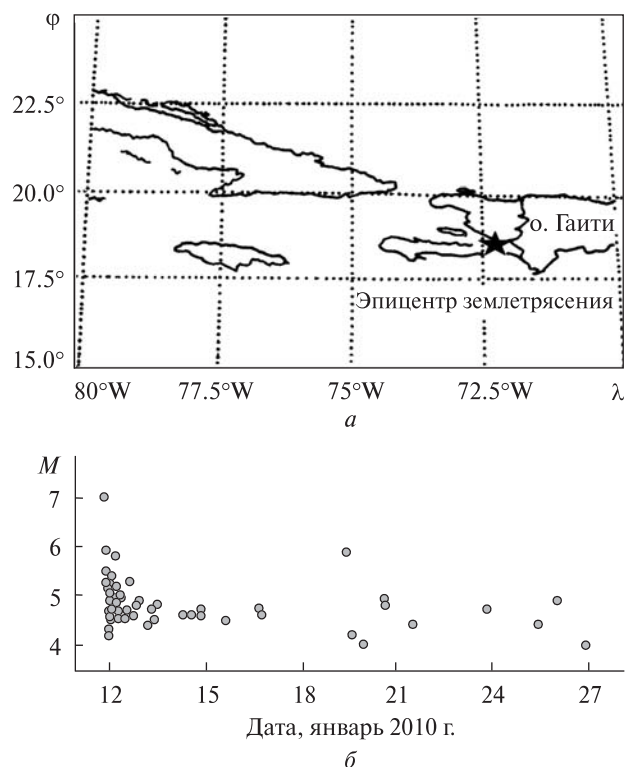


Рис. 3. Положение эпицентра (*a*) и изменение магнитуды M (*b*) при землетрясении на о. Гаити

значений кинетических параметров N_e , T_e и T_i ионосферной плазмы, инициированное сейсмической активностью.

Землетрясение на о. Гаити произошло 12.01.2010 г.: магнитуда $M = 7$, $UT = 21:53$, $\varphi = 18.457^\circ N$, $\lambda = 18.457^\circ E$, эпицентр возле г. Леоан (в 25 км западнее г. Порт-о-Пренс, столицы Гаити) [23]. Толчки (общим числом 52) наблюдались с 12 по 27.01.2010 г. с уменьшением амплитуды с $M = 7$ до $M = 4$. Карта, иллюстрирующая положение эпицентра, и изменение магнитуды во времени показаны на рис. 3.

Для регистрации и мониторинга ионосферных изменений концентрации N_e и температуры T_e электронов использовались зонды Ленгмюра КА DEMETER. На рис. 4 показаны изменения N_e и T_e над эпицентром землетрясения с декабря 2009 г. по февраль 2010 г. (время $\Delta t = 0$ соответствует началу землетрясения). За день до первого толчка с магнитудой $M = 7$ (локальное дневное и ночное время $LT = 10:00$ и

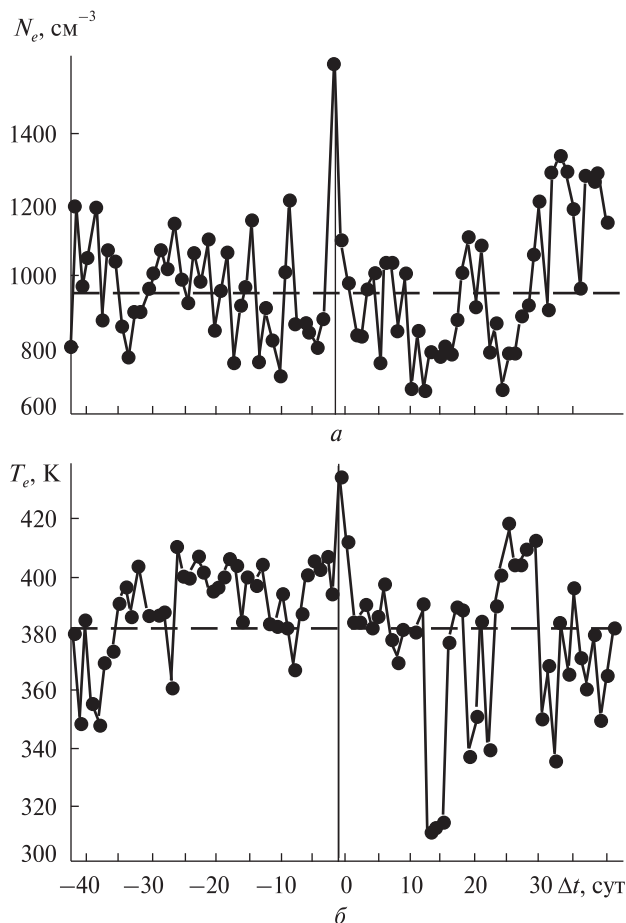


Рис. 4. Вариации концентрации N_e и температуры T_e электронов, измеренные КА DEMETER над эпицентром землетрясения с магнитудой $M = 7$ на о. Гаити: Δt — время относительно момента землетрясения, тонкая вертикальная линия — момент пролета КА над эпицентром за день до землетрясения, штриховая линия — средние значения концентрации $N_{e\text{ср}}$ и температуры $T_{e\text{ср}}$ в регионе $\varphi = 20...30^\circ\text{N}$ и $\lambda = 90...60^\circ\text{W}$

$LT = 21:00$) зарегистрировано увеличение N_e и T_e ($\delta N_e = N_{e\text{max}}/N_{e\text{сред}} \approx 1.6$; $\delta T_e = T_{e\text{max}}/T_{e\text{сред}} \approx 1.2$). Практически за сутки ($\Delta UT \approx 24$ ч) до первого толчка над эпицентром наблюдалось увеличение N_e и T_e (в течение дня и ночи).

Землетрясение в Китае. Увеличение температуры ионов T_i в ионосфере в спокойной геомагнитной обстановке на КА DEMETER зафиксировано за двое суток перед Сычуаньским землетрясением магнитудой $M = 8$ и глубиной 8 км, произошедшим 12.05.2008 г. в $UT = 06:28:01$ в 75 км от столицы Чэнду провинции Сычуань (Китай). Увеличение N_e над эпицентром зарегистрировано за пять дней до толчка [13, 14, 31].

КА SROSS-2C (Индия): вес 113 кг, запущен 04.05.1994 г. на эллиптическую орбиту с перигеем 433 км, апогеем 917 км и наклоном 46° . Для измерения температуры ионов и электронов использовался электрический зонд — многоэлектродный анализатор с тормозящим потенциалом (RPA). Измерения проводились над сейсмоактивными районами Индии на высотах от 435 до 625 км (средняя высота около 500 км).

Землетрясения в Индии. КА SROSS-2C в период 1995—1996 гг. [25] зафиксированы устойчивые увеличения температуры ионов T_i (в среднем в 1.2 раза) в период землетрясений ($\Delta t = \pm 5$ сут до и после толчка) относительно нормальных значений ($\Delta t = \pm 20$ сут), а также увеличение T_e и T_i за несколько дней перед землетрясением 20.09.1999 г. с магнитудой $M = 7.7$ [11]. Максимальная ошибка измерения температуры ионов ± 50 К в диапазоне от 500 до 5000 К. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения температуры ионов измеренные КА SROSS-2C во время землетрясений 1995—1996 гг.

Дата	LT	Координаты эпицентра	h_p , км	M	T_i , К		
					$\Delta t = \pm 20$ сут	$\Delta t = 0$	$\Delta t = \pm 5$ сут
12.03.1995 г.	08:22:54	17.74°N; 73.77°E	10	4.7	623 ± 28	798 ± 16	783 ± 81
21.10.1995 г.	19:39:39	31.43°N; 78.96°E	33	4.9	1024 ± 51	1153 ± 29	1094 ± 137
09.12.1995 г.	10:04:44	15.44°N; 88.43°E	10	4.8	824 ± 38	1033 ± 54	972 ± 125
12.02.1996 г.	20:39:54	22.62°N; 82.89°E	33	4.3	861 ± 42	1030 ± 17	989 ± 158
25.09.1996 г.	17:41:17	27.43°N; 88.55°E	33	5.0	1136 ± 63	1320 ± 101	1224 ± 149
10.11.1996 г.	09:00:04	18.30°N; 76.69°E	33	4.1	545 ± 30	633 ± 42	578 ± 63

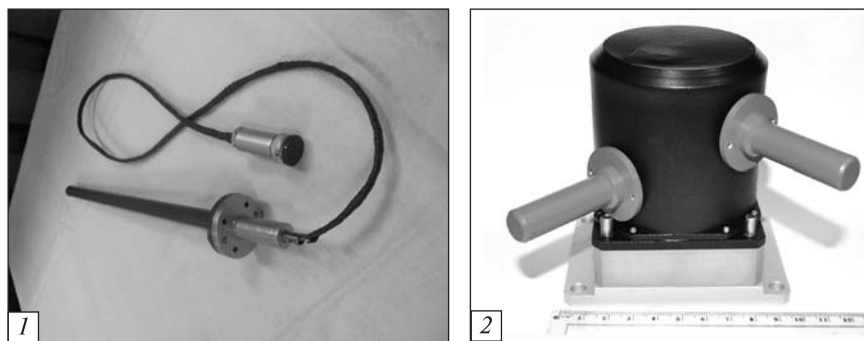


Рис. 5. Зонды КА «Сич-2»: 1 — детектор заряженных частиц (DE, цилиндрический зонд Ленгмюра), измерительный электрод радиусом $r_p = 0.05$ см и длиной $l_p = 12.0$ см; охранный электрод радиусом $r_g = 0.2$ см и длиной $l_g = 12.5$ см; 2 — детектор нейтральных частиц (DN) с двумя инверсно-магнетронными преобразователями в качестве чувствительных элементов

Таблица 2. Сравнительные характеристики КА «Сич-2» и DEMETER

Параметры	«Сич-2», Украина	DEMETER, Франция
Ракета-носитель	«Днепр»	«Днепр»
Вес	145 кг	125 кг
Высота	700 км	712 км
Наклонение	98.1	98.2°
Аппаратура	1) цилиндрический зонд Ленгмюра, 2) детектор нейтральных частиц	1) цилиндрический зонд Ленгмюра, 2) сферический зонд Ленгмюра, 3) анализатор ионов тепловой плазмы

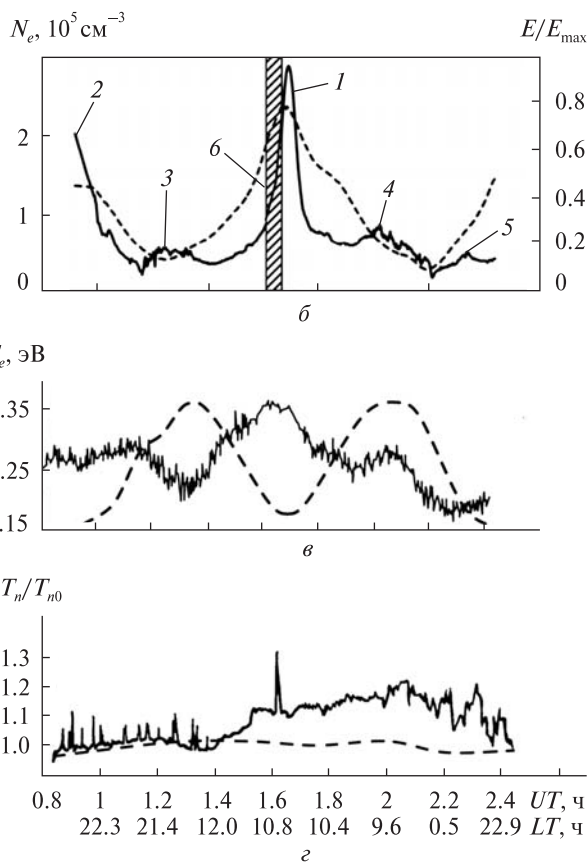
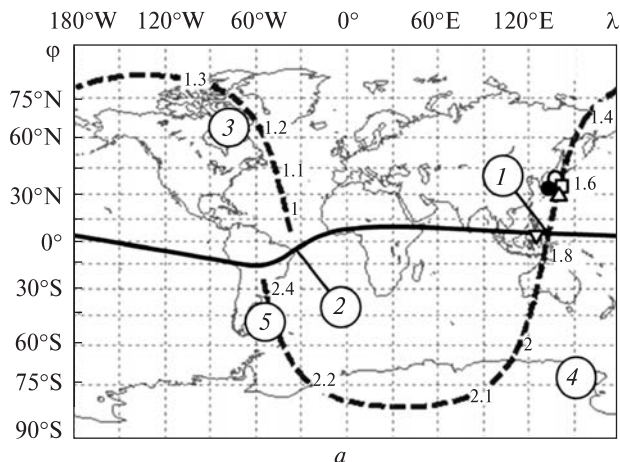
КА «Сич-2» (Украина) выведен ракетой-носителем «Днепр» 17.08.2011 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой около 700 км и наклонением 98.1°. Сравнительные характеристики КА «Сич-2» и КА DEMETER приведены в табл. 2. В состав бортовой аппаратуры КА «Сич-2» включены две зондовые системы: детектор заряженных частиц (DE, зонд Ленгмюра) и детектор нейтральных частиц (DN), разработанные и изготовленные в Институте технической механики НАНУ и ГКАУ (рис. 5).

Использование специальных процедур анализа и обработки выходных сигналов детекторов DN и DE позволяет замкнуть задачу диагностики неравновесной разреженной плазмы в ионосфере и определить локальные значения и пространственно-временные распределения комплекса кинетических параметров: температуры электронов T_e , ионов T_i и нейтралов T_n , концентрации

электронов N_e , ионов N_i и нейтральных частиц N_n , характеризующих состояние нейтрального и заряженных компонентов ионосферной плазмы на орбите КА «Сич-2» [8, 28].

Землетрясения в Японии. На рис. 6, а показана сейсмическая обстановка 14.09.2011 г. вдоль подспутниковой трассы КА «Сич-2» (штриховая кривая). Сплошной кривой 1 на рис. 6, б показаны пространственно-временные распределения измеренной концентрации электронов N_e . Измерения N_e выполнены в период средней солнечной активности (количество солнечных пятен $R = 78$ [13]) в спокойной геомагнитной обстановке ($K_p = 1+...1$, дневной индекс $\Sigma K_p = 10$ и эквивалентный планетарный индекс $a_p = 5...4$). Источники информации:

1) солнечные пятна — National Geophysical Data Center (NGDS), Boulder, Colorado, USA (<http://sidc.oma.be/sunspot-data/>);



2) K_p -индекс — World Data Center (<http://swd-cdb.kugi.kyoto-u.ac.jp>).

3) сейсмическая обстановка — United State Geological Survey (USGS, USA) (<http://neic.usgs.gov>).

Рис. 6. Изменения параметров ионосферной плазмы 14.09.2011 г. на орбите КА «Сич-2»: а географическое положение землетрясения (штриховая линия — подспутниковая трасса, сплошная линия — магнитный экватор; 1, 2 — ЭМА; 3, 4 — полярные (авроральные) пики; 5 — Южно-Атлантическая (Бразильская) аномалия); б — вариации концентрации N_e (цифры 1–5 — см. фрагмент а); заштрихованная полоса б — распределение энергии землетрясения вдоль трассы в зависимости от магнитуды; в — температура T_e ; г — температура T_n ($T_{n0} = 1056$ К — температура нейтральных частиц в невозмущенной ионосферной плазме). На фрагментах б–г сплошные линии — измеренные распределения, штриховые линии — расчетные значения, полученные в рамках «IRI-2007» в отсутствие землетрясений

Корректность измерения концентрации электронов аппаратурой КА «Сич-2» на орбите подтверждает регистрация естественных возмущений ионосферы, показанных на рис. 6, а: ЭМА — 1 и 2, полярные (авроральные) пики — 3 и 4, Южно-Атлантическая (Бразильская) аномалия — 5. Соответствующие этим источникам измеренные возмущения N_e показаны на рис. 6, б.

Для идентификации эпицентров землетрясений на подспутниковой трассе 14.09.2011 г. КА «Сич-2» использовались: пик концентрации электронов N_e на кривой 1 рис. 6, б и зависимость распределения энергии землетрясения вдоль трассы от магнитуды $E(M)/E_{max}$ ($M = 6.1$) — заштрихованная полоса б для землетрясений с магнитудой $M \geq 5$. При расчетах распределения энергии землетрясения использовалось соотношение: $E(M) = 10^{-M(0.025M-1.9)} \alpha_z \alpha_t$ и модель сферического источника

$$\alpha_z = \frac{h^2}{h^2 + z^2} \left[\frac{h}{R_E} \sqrt{\frac{R_E^2 - z^2}{h^2 + z^2}} - \frac{z^2}{R_E L} \right], \quad (2)$$

$$\alpha_t = \exp(-0.5\Delta t), \quad (3)$$

где $h = 700$ км — высота орбиты КА, z — расстояние от подспутниковой точки до эпицентра, км, $R_E = 6371$ км — радиус Земли, $L = \sqrt{h^2 + z^2}$, $\Delta t = |t_2 - t_1|$ — время опережения (задержки), сут, t_1 — время пролета КА над эпицентром землетрясения, t_2 — время события (землетрясения).

На рис. 6, б пик концентрации электронов 1 и распределение энергии землетрясения (заштри-

хованная полоса б) соответствуют времени пролета $UT_1 = 1.65$ ч КА «Сич-2» и характеризуют возмущения ионосферы, обусловленные влиянием произошедших до пролета, происходящих в момент пролета и зарождающихся на подспутниковой трассе землетрясений. Сейсмическая обстановка на подспутниковой трассе для землетрясений магнитудой $M \geq 4.5$, глубиной $h_d \leq 50$ км во временном диапазоне ± 2 сут от 14.09.2011 г. в полосе шириной $\Delta z = \pm 700$ км по данным USGS представлена на рис. 6, а (табл. 3).

На подспутниковой трассе 14.09.2011 г. не было землетрясений с магнитудой $M \geq 5$ и глубиной $h_d \leq 50$ км. Произошедшие к моменту пролета и происходившие в момент пролета КА «Сич-2» землетрясения из рассмотрения исключаются, так как фиксируются службой USGS.

Возмущение N_e (рис. 6, б) происходит на фоне ЭМА. Согласно оценке International Reference Ionosphere (IRI — 2007) пространственные распределения параметров ионосферной плазмы 14.09.2011 г. в районе ЭМА в точке пересечения подспутниковой трассы и магнитного экватора $UT_1 \approx 1.7$ ч характеризуются наличием максимума для N_e и минимумов для температур T_e и T_i ($T_n \approx \text{const}$).

Для возмущений, обусловленных сейсмической активностью, характерно наличие максимума для N_e и максимумов для температур T_e , T_i , T_n над эпицентром землетрясения. Наличие максимумов на распределениях T_e и T_n на рис. 6, в и г, измеренных аппаратурой КА «Сич-2» 14.09.2011 г., подтверждает принадлежность $N_{e_{\max}}$ к зарождающемуся землетрясению с магнитудой $M \geq 5$. Ближайшим к моменту пролета КА $UT_1 = 1.65$ ч зарождающимся землетрясением является толчок 15.09.2011 г. ($UT_2 = 08:00:09$, $M = 6.1$, $h_d = 28$ км, $\varphi = 36^\circ$ N, $\lambda = 141^\circ$ E) в рассматриваемом пространственно-временном диапазоне $\Delta t = \pm 2$ сут от 14.09.2011 г. в полосе шириной $\Delta z = \pm 700$ км от подспутниковой трассы (заштрихованная полоса б на рис. 6, б). Опережение во времени до главного толчка этого землетрясения по данным возмущений параметров ионосферы составляет $\Delta UT = UT_2 - UT_1 \approx 30$ ч 21 мин 9 с.

Таким образом, выходные сигналы зондовых систем КА позволяют по увеличению локальных

значений кинетических параметров идентифицировать зарождающиеся землетрясения с опережением $\Delta UT \geq 1$ сут.

В этом разделе приведены результаты только контактной зондовой диагностики изменений свойств ионосферной плазмы, обусловленных сейсмической активностью. В то же время флуктуации концентрации электронов N_e или производных этого параметра, таких как критическая частота f_0F2 ионосферной плазмы или полное электронное содержание (ПЭС), связанные с землетрясениями, многократно регистрировались радиофизическими средствами наземных станций. Зондовые измерения на борту КА дают информацию об изменениях локальных значений N_e и T_e , T_i , T_n непосредственно над эпицентром землетрясения, а зондирование ионосферы радиофизическими средствами дают усредненные по длине трассы зондирующей волны значения f_0F2 или ПЭС в области, примыкающей к месту расположения наземной станции [29]. Очевидно, что точность измерения N_e и информативность зондовых систем на борту КА выше.

Эффекты влияния вспышек на Солнце, магнитных бурь и геомагнитных возмущений на ионосферу носят глобальный, планетарный характер [7, 18, 22, 26], а влияние землетрясений ограничено зоной, расположенной непосредственно вокруг эпицентра. Локальность эффектов землетрясения и локальность многопараметрических зондовых измерений может служить удобным инструментом для идентификации эпицентра зарождающегося землетрясения.

Таблица 3. Сейсмическая обстановка на трассе

Обозначение на рис. 6, а	Дата, сентябрь 2011 г.	M	h_d , км	Время толчка UT_2	φ	λ
△	15	6.1	28	08:00:09	36°N	141°E
▽	15	4.9	44	10:46:31	3.3°N	126.7°E
○	12	5.0	20	23:02:41	36°N	143°E
●	13	4.8	35	09:10:21	35°N	141°E
□	16	6.7	35	19:26:40	40°N	143°E
□	16	5.9	18	21:08:05	40°N	143°E

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Разрушение горных пород сопровождается акустической эмиссией и электромагнитным излучением (ЭМИ) в низкочастотном диапазоне. Излучение регистрируется за несколько часов (максимум за сутки) до и после землетрясения. Большая часть зарегистрированных на сегодня событий приходится на низкоширотную область, где сильные землетрясения случаются наиболее часто. Одна из первых попыток установить связь по каналу «землетрясение — электромагнитное излучение в ионосфере Земли» предпринята по данным КА OGO-6 [6, 16].

На КА OGO-6 использовался трехкомпонентный индукционный магнитометр с чувствительностью 10^{-8} $\gamma/\text{Гц}$ ($\gamma = 10^{-5}$ Гс). Регистрировались всплески электромагнитных шумов в диапазоне $f \approx 100 \dots 1000$ Гц над эпицентрами зарождающихся землетрясений с магнитудой $M \geq 5.5$ глубиной $h_d < 80$ км.

На рис. 7, а приведена интенсивность излучения B_{\sim} (в произвольных единицах) только одной из составляющих [6, 16]. Параметры землетрясения: время главного толчка $UT_2 = 16:32$, $M \approx 5.4$, глубина $h_d = 69$ км, трехчасовой геомагнитный индекс $K_p = 2_+$. Высота орбиты спутника около 1000 км; опережение $\Delta UT = 3$ ч 29 мин. Измерения проводились в спокойной геомагнитной обстановке 05.08.1969 г. на низких широтах, где

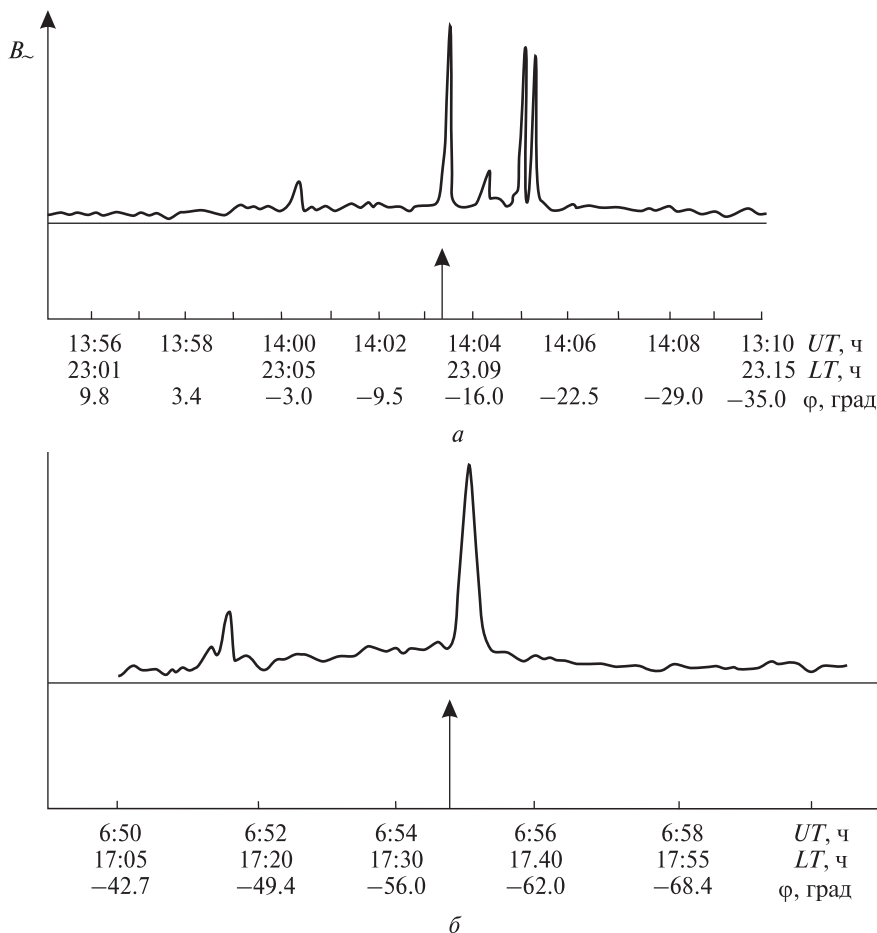


Рис. 7. Регистрограмма интенсивности электромагнитного излучения в ионосфере OGO-6 (произвольные единицы): а — 05.08.1969 г. на высоте 1000 км, б — 30.03.1970 г. на высоте 700 км. Стрелка — время пролета КА над эпицентром землетрясения

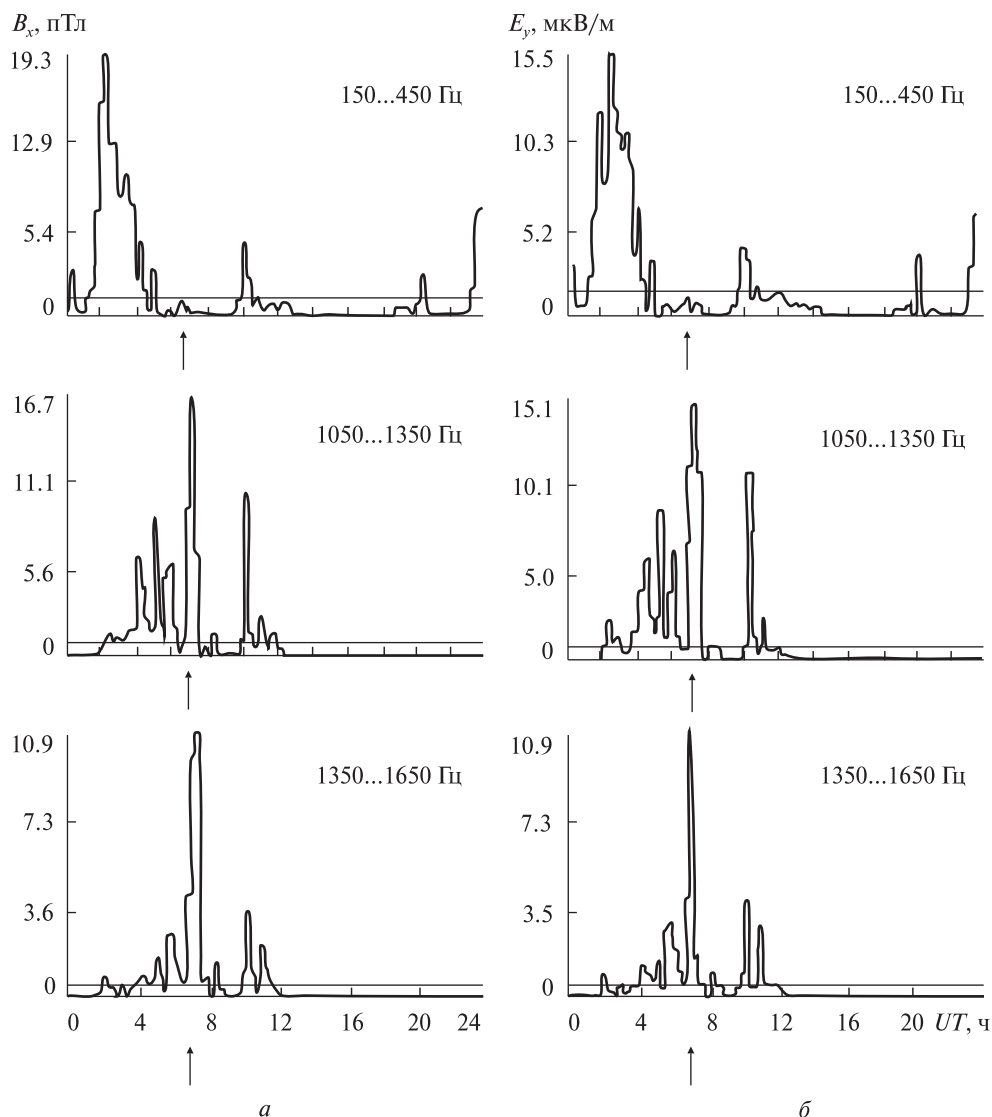


Рис. 8. Измеренные 03.11.1978 г. на КА GEOS-2 вариации амплитуд: *a* — квазипостоянного магнитного поля B_x , *б* — электрического поля E_y ЭМИ [15] (стрелка — момент толчка $UT_2 = 06:45$, тонкая горизонтальная линия — средний уровень сигнала за день)

интенсивность фоновых (естественных) излучений мала. Рис. 7, *б* иллюстрирует всплеск ЭМИ, зарегистрированный КА OGO-6 30.03.1970 г. на высоте 700 км. Параметры землетрясения $UT_2 = 20:41$, $M = 5.4$, $h_d = 33$ км, $K_p = 4$. Опережение толчка составляет $\Delta UT = 13$ ч 46 мин.

КА GEOS-2 зарегистрировал 03.11.1978 г. вариации амплитуды компонентов квазипостоянных магнитного B_x (Гс) и электрического E_y (мкВ/м) полей ЭМИ [16]. Время землетрясения $UT_2 = 06:45$,

магнитуда $M = 4.5$, $h_d < 80$ км. На рис. 8, *a* и *б* наблюдается увеличение интенсивности ЭМИ при приближении к моменту главного толчка (обозначен стрелкой). На низких частотах (150...450 Гц) амплитуда сигнала максимальна примерно за 2 ч до главного толчка; на высоких частотах (1050...1350 Гц) амплитуда максимальна непосредственно в момент главного толчка.

В процессе подготовки землетрясения на заключительной его фазе, по-видимому, происхо-

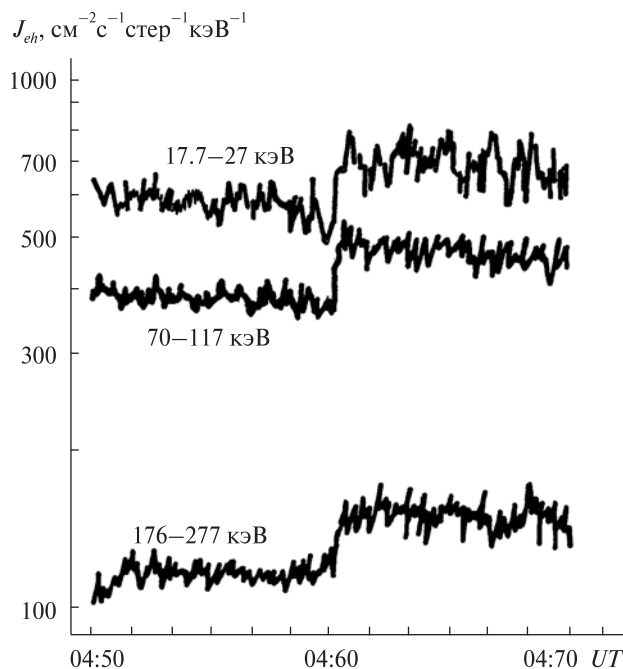


Рис. 9. Вариации потока высокоэнергичных электронов при пролете КА «Интеркосмос-24» в зоне эпицентра Иранского землетрясения 20 июня 1990 г.

дит перекачка энергии из низкочастотной части спектра ЭМИ в высокочастотную часть. Приведенные данные свидетельствуют о том, что регистрация ЭМИ над эпицентрами землетрясений аппаратурой КА в ионосфере позволяет контролировать и мониторить процесс подготовки землетрясения за несколько часов до главного толчка [3, 16].

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ВЫСЫПАНИЮ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ В ИОНОСФЕРЕ

Орбитальная станция «Салют-7» (высота 400 км) — впервые обнаружена взаимосвязь явления высыпания высокоэнергичных частиц из радиационного пояса Земли в ионосферу с сейсмической активностью [1, 4]. В большинстве случаев (8 из 10) в отсутствие геомагнитных возмущений через 2.5 — 3 ч после каждого всплеска потока высокоэнергичных протонов с энергией более 30 МэВ регистрировалось землетрясение с магнитудой $M > 4$.

КА «Метеор», «Интеркосмос-Болгария-1300», «Ореол-3», «Интеркосмос-24» регистрировали

возрастание потоков электронов с энергией более 100 кэВ. В 18 случаях из 20 пролетов зафиксированы землетрясения с магнитудой более 4.0 [5].

На рис. 9 приведена временная зависимость потока высокоэнергичных электронов J_{eh} , иллюстрирующая высыпание частиц с энергиями от 17.7 до 277 кэВ при пролете КА «Интеркосмос-24» (высота 2300 — 2500 км) в зоне эпицентра Иранского землетрясения 20.06.1990 г. перед главным толчком $UT_1 = 21:00:09$, $M = 6.4$, $\varphi = 37^\circ \text{N}$, $\lambda = 49.4^\circ \text{E}$. Зависимость иллюстрирует резкий всплеск потока высокоэнергичных электронов за 16 ч до главного толчка [9].

ВОЗМУЩЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ ПЛАТФОРМОЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Уровень откликов сейсмогенных возмущений в ионосфере мал. Для регистрации этих возмущений необходимо обеспечить выполнение условий (требований) электромагнитной чистоты платформы КА в части взаимодействия в системе «КА — плазма» и электромагнитной совместимости приборов, экспериментов и измерений на борту.

Движение спутника на орбите сопровождается возмущением околообъектовой среды, околоземной плазмы. Возмущенная зона занимает весьма протяженную область. Ее структура зависит от геометрической формы платформы КА, электрофизической структуры его поверхности, ориентации вектора скорости полета КА относительно вектора индукции магнитного поля Земли и т.п. [2, 24, 27, 30]. Возмущенная платформой КА плазма содержит зоны с повышенной и пониженной концентрацией заряженных частиц, повышенной степенью неизотермичности T_i/T_e , области с нарушением квазинейтральности ионосферной плазмы. В таких областях могут возникнуть условия, локально благоприятные для возникновения неустойчивостей и генерации некоторых типов электромагнитных колебаний в плазме в окрестности КА. В окрестности платформы КА и размещенных на ней диагностических средств на орбите складывается сложная волновая картина. В таких условиях исследования факторов проявления сейсмического

события в ионосфере с помощью аппаратуры, установленной платформе на КА, могут оказаться малоэффективными из-за высоких уровней электромагнитных помех, обусловленных неустойчивостями и резонансами в возмущенной ионосферной плазме.

Анализ взаимодействия в системе «КА — ионосферная плазма» позволяет выделить основные источники электромагнитных шумов на орбите:

— возмущения околоспутниковой среды, обусловленные сверхзвуковым движением КА относительно фоновых (тепловых) ионов плазмы;

— эффекты, связанные с воздействием потоков высокоэнергичных авроральных электронов в полярной ионосфере;

— электромагнитные шумы, генерируемые солнечными батареями при длительной эксплуатации на орбите;

— электромагнитная интерференция, генерация и эмиссия плазменных волн и электромагнитного излучения;

— возмущение и нагрев околоспутниковой плазмы электромагнитным излучением бортовой аппаратуры, антенн и т.п.

Электромагнитная чистота платформы КА относительно ионосферной плазмы — способность КА функционировать на орбите, не создавая электромагнитных помех, превышающих уровни ионосферных предвестников землетрясений.

Интегрально условие электромагнитной чистоты КА и его систем относительно околоспутниковой среды может быть представлено в виде

$$\Sigma P_{КА}^{\max} < P_{прб}^{\max} < P_{ссм}^{\min}, \quad (5)$$

где $P_{КА}^{\max}$ — мощность излучения электромагнитных помех КА, $P_{прб}^{\max}$ — максимальная мощность излучения диагностической аппаратуры, $P_{ссм}^{\min}$ — минимальная мощность излучения спектра колебаний j -го диапазона частот в ионосфере, обусловленных сейсмической активностью.

При этом для флуктуаций напряженности электрического поля и флуктуаций индукции магнитного поля должны быть справедливы неравенства

$$\delta E_{КА}^{\max} < \delta E_{прб}^{\max} < \delta E_{ссм}^{\min}, \quad (6)$$

$$\delta B_{КА}^{\max} < \delta B_{прб}^{\max} < \delta B_{ссм}^{\min}. \quad (7)$$

Тогда

$$\sum_k P_{воз}^{\max} < P_r^{\min}, \quad (8)$$

где $P_{воз}^{\max}$ — мощность излучения электромагнитных помех k -й системы платформы КА, P_r^{\min} — минимальная мощность спектра колебаний r -го диапазона частот в ионосфере.

Результатом взаимодействия КА с ионосферной плазмой и магнитным полем Земли является изменение электродинамических характеристик платформы и поля течения. Для электродинамически большого тела $R_w/\lambda_d \geq 50$ (R_w — характерный размер платформы КА, λ_d — дебаевский радиус в невозмущенной плазме), движущегося со сверхзвуковой скоростью в ионосфере, условия электромагнитной чистоты в системе «КА — плазма» могут быть сформулированы следующим образом:

— материалы поверхности КА должны обладать проводимостью $\sigma > 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$,

— энергетическая система КА не должна генерировать переменные токи с частотой $\omega^* > 1 \text{ кГц}$,

— для идеально электромагнитно чистого КА (энергетическая система не порождает токов утечки и индукционных токов) электрический ток в конструкции обусловлен только взаимодействием платформы с ионосферной плазмой, а флуктуации электрического и магнитного полей электромагнитного шума в окрестности КА имеют порядок $\langle \delta E \rangle \sim 1 \text{ мкВ/м}$ и $\langle \delta B \rangle \sim 1 \text{ пТл}$. Предвестники землетрясений могут регистрироваться бортовой аппаратурой такого КА, если флуктуации, обусловленные сейсмической активностью, для электрической составляющей превышают $\delta E_{ссм} > 1 \text{ мкВ/м}$, а для магнитной составляющей — $\delta B_{ссм} > 1 \text{ пТл}$.

Таким образом, при решении проблемы электромагнитной чистоты КА на орбите первостепенными являются оценки уровней электромагнитных шумов, генерируемых каждым из перечисленных источников, выделение максимальных шумов, разработка методов и средств снижения их до уровня, допустимого при реализации научных экспериментов и измерений на борту КА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что выходные сигналы комплекса бортовой аппаратуры, предназначенной для диагностики и мониторинга возмущений кинетических параметров ионосферной плазмы, электрических и магнитных полей, высыпания высокоэнергичных протонов и электронов (ионосферных предвестников землетрясений), при синхронном режиме эксплуатации приборов могут быть использованы для реализации краткосрочного прогноза землетрясений, зарождающихся на подспутниковой трассе.

По результатам анализа ионосферных возмущений 5742 землетрясений, зарегистрированных КА DEMETER, руководителем миссии DEMETER M. Parrot был сформулирован статистически обоснованный временной критерий прогнозирования землетрясения — около 5 сут перед главным толчком (доклад на «2012 Fall Session of American Geophysical Union» [19]).

1. Алёшина М. Е., Воронов С. А., Гальпер А. М. и др. О взаимосвязи положения очагов землетрясений и областей высыпаний высокоэнергичных частиц из радиационного пояса // Космич. исслед. — 1992. — **30**. — С. 79—85.
2. Альперт Я. Л. Волны и искусственные тела в приземной плазме. — М.: Наука, 1974. — 214 с.
3. Бирюков А. С., Григорян О. Р., Кузнецов С. Н. и др. Космическая физика и экология: эффекты от землетрясений на ионосферных высотах // Инженерная экология. — 1996. — № 5. — С. 92—115.
4. Воронов С. А., Гальпер А. М., Кириллов-Угрюмов В. Г. и др. Регистрация возрастания потоков высокоэнергичных частиц в районе Бразильской аномалии 10 сентября 1985 г. // Космич. исслед. — 1989. — **29**. — С. 629—634.
5. Гальперин Ю. И., Гладышев В. А., Джорджио Н. В. и др. Высыпание энергичных захваченных частиц в магнитосфере над эпицентром готовящегося землетрясения // Космич. исслед. — 1992. — **30**. — С. 89—93.
6. Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А. Наблюдения со спутника электромагнитного излучения над эпицентральной областью готовящегося землетрясения // Докл. АН СССР. — 1983. — **268**, № 1. — С. 56—58.
7. Легенька А. Д., Хегай В. В., Ким В. П. Сравнение вариаций критической частоты F2-области перед сильными итальянскими землетрясениями и в период магнитной бури по данным станций наземного вертикального зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. — 2007. — **47**, № 4. — С. 563—570.
8. Шувалов В. А., Лазученков Д. Н., Носиков С. В., Кочубей Г. С. Идентификация землетрясений по зондовым измерениям возмущений параметров ионосферной плазмы на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 5. — С. 26—36.
9. Boskova J., Smilauer J., Triska P., Kudela K. Anomalous behavior of plasma parameters as observed by the Intercosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 June 1990 // Stud. geophys. ed geod. — 1994. — **38**. — P. 213—217.
10. Bowman D. D., Ouillon G., Sammis C. G., et al. An observation test of the critical earthquake concept // J. Geophys. Res. — 1998. — **103**. — P. 24359—24372.
11. Davis B. Studying the ionosphere with Langmuir probe with an application to seismic monitoring // Final report. ASEN 5168: Remote Sensing. — 2012. — 11 p.
12. Dobrovolsky I. R., Zubrin S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones // Pageophys. — 1979. — **117**. — P. 1025—1044.
13. He Y., Yang D., Qian J., Parrot M. Anomaly of the ionospheric electron density close to earthquake: Case studies of Pu'er and Wenchuan earthquakes // Earthing Sci. — 2011. — **24**. — P. 549—555.
14. He Y., Yang D., Zhu R., et al. Variations of electron density and temperature in ionosphere based on the DEMETER ISL data // Earth Sci. — 2010. — **23**. — P. 349—355.
15. Huang Y. N., Cheng K. Solar cycle variations of the equatorial ionospheric anomaly in total electron content in the Asian region // J. Geophys. Res. — 1996. — **101A**, N 11. — P. 24513—24520.
16. Larkina V. I., Migulin V. V., Molchanov O. A., et al. Some statistical results on very low frequency radiowave emission in the upper ionosphere over earthquake zones // Phys. Earth and Planet. Int. — 1989. — **57**. — P. 100—103.
17. Lebreton J. P., Sverak S., Travnicek P., et al. Langmuir probe experiment processing on board DEMETER. Scientific objectives, description and first results // Planet. and Space Sci. — 2006. — **54**. — P. 98.
18. Oyama K. I., Lakshmi D. R., Kutiev I., Abdu M. A. Low latitude N_e and T_e variation at 600 km during 1 March 1982 storm from HINOTORI Satellite // Earth and Planets Space. — 2005. — **57**. — P. 871—878.
19. Pulnits S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquake and Global Electric Circuit // Adv. Space Res. — 2014. — **53**. — P. 709—723.
20. Pulnits S., Morozova L., Yudin I. Synchronization of atmospheric indicators at the lost stage of earthquake preparation cycle // Res. Geophys. — 2014. — **4**, N 1. — P. 45—50. — DOI: 10.4081/rg.2014.4898.
21. Reddy B. M., Brace L. H., Findlay J. A. The ionosphere at 640 kilometers on quiet and disturbed days // J. Geophys. Res. — 1967. — **72**, N 11. — P. 2709—2727.

22. Richards P. G. Ion and neutral density variations during ionospheric storms in September 1974: Comparison of measurement and models // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107A**, N 11. — P. 1—12.
23. Sarkar S., Chondhary S., Sonakia A., et al. Ionospheric anomalies associated with the Haiti earthquake of 12 January 2010 observed by DEMETER satellite // *Natural / Hazards and Earth System Sci.* — 2012. — **12**. — P. 671—678.
24. Senbett L., Henley J. Distribution of plasma density and potential around mesothermal ionospheric object // *J. Geophys. Res.* — 1989. — **94A**, N 5. — P. 5441—5448.
25. Sharma D. K., Ray J., Chand R., Israil M. Effects of seismic activities on ion temperature in the F2 region of the ionosphere // *Atmosfera.* — 2006. — **19**, N 1 — P. 1—7.
26. Sharma D. K., Ray J., Israil M., et al. Enhancement in electron and ion temperatures due to solar flares as measured by SROSS — C2 satellite // *Ann. Geophys.* — 2004. — **22**. — P. 2047—2052.
27. Shawhan S. D., Murphy G. B., Fortna D. L. Measurement of electromagnetic interference on OV12 Columbia using the plasma diagnostics package // *J. Spacecraft and Rockets.* — 1984. — **21**, N 4. — P. 392—397.
28. Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Lazuchenkov D. N., Kochubey G. S. Probe diagnostics of laboratory and ionospheric rarefied plasma flows // *Instrum. and Experimental Techniques.* — 2013. — **56**, N 4 — P. 459—467.
29. Singh V., Chanhan V., Singh O., Singh B. Ionospheric effect of earthquakes as determined from ground based TEC measurement and satellite data // *Indian J. Radio and Space Phys.* — 2010. — **39**, N 4 — P. 63—70.
30. Vagner B. V., Ferguson D. C. Low-frequency waves in the plasma environment around the Shuttle // *J. Spacecraft and Rockets.* — 1996. — **33**, N 2. — P. 255—261.
31. Zhang X., Shen X., Lin J., et al. Analysis of ionospheric plasma perturbation before Wenchuan earthquake // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* — 2009. — **9**. — P. 1259—1266.
4. Voronov S. A., Gal'per A. M., Kirillov-Ugryumov V. G. et al. Measurements of the flux increase of the high-energy particles in the region of Brasil geomagnetic anomaly on the September 10, 1985. *Cosmic Research*, 27 (4), 629—631 (1989) [in Russian].
5. Galperin Yu. I., Gladyshev V. A., Jorjio N. V. et al. Energetic particles precipitation from the magnetosphere above the epicenter of approaching earthquake. *Cosmic Research*, 30 (1), 89—106 (1992) [in Russian].
6. Gohberg M. B., Pilipenko V. A., Pohotelov O. A. Observations of the electromagnetic radiation from satellite over the epicentral area of the forthcoming earthquake (Nabljudenija so sputnika jelektromagnitnogo izluchenija nad jepicentral'noj oblast'ju gotovjashhegosja zemletrjasenija). *Dokl. AN SSSR*, 268(1), 56—58 (1983) [in Russian].
7. Legen'ka A. D., Hegai V. V., Kim V. P. Comparison of variations in the F2 layer critical frequency before the strong Italian earthquakes and during the magnetic storm: Data of the stations for ground-based vertical sounding of the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*, 47 (4), 563—570 (2007) [in Russian].
8. Shuvalov V. A., Lazuchenkov D. N., Nosikov S. V., Kochubey G. S. Identification of earthquakes with the use of Sich-2 probe measurements of ionospheric plasma perturbations. *Kosm. nauka tehnol*, 19 (5), 16—26 (2013) [in Russian].
9. Boskova J., Smilauer J., Triska P., Kudela K. Anomalous behavior of plasma parameters as observed by the Interkosmos 24 satellite prior to the Iranian earthquake of 20 June 1990. *Stud. geophys. ed geod*, 38, 213—217 (1994).
10. Bowman D. D., Ouillon G., Sammis C. G., Sornette A., Sornette D. An observation test of the critical earthquake concept. *J. Geophys. Res.*, 103, 24359—24372 (1998).
11. Davis B. Studying the ionosphere with Langmuir probe with an application to seismic monitoring. Final report. *ASEN 5168: Remote Sensing*, 11 p. (2012)
12. Dobrovolsky I. R., Zubrin S. I., Myachkin V. I. Estimation of the size of earthquake preparation zones. *Pageophys.* 117, 1025—1044 (1979).
13. He Y., Yang D., Qian J., Parrot M. Anomaly of the ionospheric electron density close to earthquake: Case studies of Pu'er and Wenchuan earthquakes. *Earthing Sci.* 24, 549—555 (2011).
14. He Y., Yang D., Zhu R., Qian J., Parrot M. Variations of electron density and temperature in ionosphere based on the DEMETER ISL data. *Earth Sci.* 23, 349—355 (2010).
15. Huang Y. N., Cheng K. Solar cycle variations of the equatorial ionospheric anomaly in total electron content in the Asian region. *J. Geophys. Res.* 101A (11), 24513—24520 (1996).
16. Larkina V. I., Migulin V. V., Molchanov O. A., et al. Some statistical results on very low frequency radiowave emission in the upper ionosphere over earthquake zones. *Phys. Earth and Planet. Int.* 57, 100—103 (1989).

Стаття надійшла до редакції 25.05.15

REFERENCES

1. Aleshina M. E., Voronov S. A., Galper A. M. et al. On relationship between the earthquake centers and the region of the high-energy particle precipitations from the radiation belt. *Cosmic Research*, 30 (1), 79—83 (1992) [in Russian].
2. Al'pert Ja. L. Waves and artificial bodies in the surface plasma (Volny i iskusstvennye tela v prizemnoj plazme), 214 p. (Nauka, Moscow, 1974) [in Russian].
3. Birjukov A. S., Grigorjan O. R., Kuznecov S. N., Oraevskij V. N., Panasjuk M. I., Pulinec S. A., Chmyrev V. N. Space Physics and Ecology: effects of earthquakes on the ionospheric heights (Kosmicheskaja fizika i jekologija: jefekty ot zemletrjasenij na ionosfernyh vysotah), *Engineering Ecology*, N 5, 92—115 (1996) [in Russian].

17. Lebreton J. P., Stverak S., Travnicek P., et al. Langmuir probe experiment processing on board DEMETER. Scientific objectives, description and first results. *Planet. and Space Sci.* 54, P. 98 (2006).
18. Oyama K. I., Lakshmi D. R., Kutiev I., Abdu M. A. Low latitude Ne and Te variation at 600 km during 1 March 1982 storm from HINOTORI Satellite. *Earth and Planets Space*, 57, 871–878 (2005).
19. Pulnits S., Davidenko D. Ionospheric precursors of earthquake and Global Electric Circuit. *Adv. Space Res.* 53, 709–723 (2014).
20. Pulnits S., Morozova L., Yudin I. Synchronization of atmospheric indicators at the lost stage of earthquake preparation cycle. *Res. Geophys.*, 4(1), 45–50 (2014). DOI: 10.4081/rg.2014.4898.
21. Reddy B. M., Brace L. H., Findlay J. A. The ionosphere at 640 kilometers on quiet and disturbed days. *J. Geophys. Res.*, 72 (11), 2709–2727 (1967).
22. Richards P. G. Ion and neutral density variations during ionospheric storms in September 1974: Comparison of measurement and models. *J. Geophys. Res.*, 107A (11), 1–12 (2002).
23. Sarkar S., Chondhary S., Sonakia A., Vishwakarma A., Gwal A. K. Ionospheric anomalies associated with the Haiti earthquake of 12 January 2010 observed by DEMETER satellite. *Natural, Hazards and Earth System Sci.* 12, 671–678 (2012).
24. Senbett L., Henley J. Distribution of plasma density and potential around mesothermal ionospheric object. *J. Geophys. Res.* 94A (5), 5441–5448 (1989).
25. Sharma D. K., Ray J., Chand R., Israil M. Effects of seismic activities on ion temperature in the F2 region of the ionosphere. *Atmosfera*, 19 (1), 1–7 (2006).
26. Sharma D. K., Ray J., Israil M., Chopra P., Garg S. C. Enhancement in electron and ion temperatures due to solar flares as measured by SROSS – C2 satellite. *Ann. Geophys.*, 22, 2047–2052 (2004).
27. Shawhan S. D., Murphy G. B., Fortna D. L. Measurement of electromagnetic interference on OV12 Columbia using the plasma diagnostics package. *J. Spacecraft and Rockets*, 21 (4), 392–397 (1984).
28. Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Lazuchenkov D. N., Kochubey G. S. Probe diagnostics of laboratory and ionospheric rarefied plasma flows. *Instrum. and Experimental Techniques*, 56 (4), 459–467 (2013).
29. Singh V., Chanhani V., Singh O., Singh B. Ionospheric effect of earthquakes as determined from ground based TEC measurement and satellite data. *Indian J. Radio and Space Phys.*, 39 (4), 63–70 (2010).
30. Vagner B. V., Ferguson D. C. Low-frequency waves in the plasma environment around the Shuttle. *J. Spacecraft and Rockets*, 33 (2), 255–261 (1996).
31. Zhang X., Shen X., Lin J., Qnyang X., Qian J., Zhao S. Analysis of ionospheric plasma perturbation before Wenchuan earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1259–1266 (2009).

В. А. Шувалов¹, А. Л. Макаров², Д. Н. Лазученков¹

¹ Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ ЗБУРЕНЬ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ

Проведено аналіз іоносферних передвісників землетрусів, визначено можливості їхньої реєстрації за допомогою зондових систем діагностичної апаратури КА. Показано, що комплекс зондової діагностичної апаратури КА, призначеної для реєстрації збурень кінетичних параметрів іоносферної плазми, електромагнітного випромінювання, висипання високоенергійних протонів і електронів (іоносферних передвісників землетрусів), може бути використаний при синхронному режимі експлуатації приладів для реєстрації землетрусів, що зароджуються на підсупутниковій трасі.

Ключові слова: космічний апарат, іоносферна плазма, зондові вимірювання, землетрус, збурення, ідентифікація.

V. A. Shuvalov¹, A. L. Makarov², D. N. Lazuchenkov¹

¹ Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Dnipropetrovsk

² Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipropetrovsk

IDENTIFICATION OF EARTHQUAKES USING SATELLITE MEASUREMENTS OF IONOSPHERIC PLASMA DISTURBANCES

We analyze the ionospheric precursors of earthquakes; determine the possibilities of their recording using probing systems of the spacecraft diagnostics equipment. We consider a spacecraft diagnostics equipment designed to record disturbances of the kinetic parameters of ionospheric plasma, electromagnetic radiation, emission of high-energy protons and electrons (ionospheric precursors of earthquakes). It is shown that such a complex may be used in a synchronous mode of instruments operation for detecting earthquakes that emerge along the satellite ground track.

Key words: spacecraft, ionospheric plasma, probe, measurements, earthquake, perturbations, identification.