

В. А. Шувалов, член-корреспондент НАН Украины О. В. Пилипенко

Идентификация возмущений параметров ионосферной плазмы по зондовым измерениям на спутнике “Сич-2”

По результатам зондовых измерений параметров ионосферной плазмы аппаратурой ИТМ на космическом аппарате „Сич-2” показано, что возмущения распределений концентрации заряженных частиц (электронов, ионов) и температуры тяжелых частиц (нейтралов, ионов) могут быть использованы с учетом динамики подспутниковой точки для идентификации пространственно-временной локализации извержений вулканов, эпицентров и магнитуд зарождающихся землетрясений, а также локализации южного и северного авроральных пиков в ионосфере Земли.

Ионосферная плазма чутко реагирует на воздействия “сверху” (Солнце, гелиосферные возмущения) и “снизу” (Земля, процессы в литосфере, земной коре, на ее поверхности, в морях и океанах). На воздействие “сверху” (вспышки на Солнце, потоки плазмы солнечного ветра) ионосфера реагирует, как правило, постфактум — с опозданием, на воздействие “снизу” (землетрясения, извержения вулканов) — с опережением. Это обстоятельство может быть использовано для прогнозирования и идентификации пространственно-временной локализации природных и техногенных катастрофических явлений.

В публикациях [1–3] показано, что суточные вариации критических частот f_0 F2-области ионосферы и флуктуации пространственных распределений полного электронного содержания (ПЭС), измеренных радиофизическими методами и средствами на спутниках и наземных станциях GPS, позволяют идентифицировать эпицентры землетрясений. Критические частоты f_0 F2-области и ПЭС пропорциональны возмущениям концентрации электронов N_e , осредненной вдоль трассы зондирующей волны [4, 5]. Для регистрации и мониторинга локальных значений основных кинетических параметров ионосферной разреженной плазмы могут быть использованы зондовые системы, размещенные на орбитальных космических платформах [6–9].

В настоящем сообщении показано, что возмущения распределений концентрации заряженных частиц (электронов, ионов) и температуры тяжелых частиц (нейтралов, ионов), измеренных зондовыми системами Института технической механики НАН Украины и Государственного космического агентства Украины на космическом аппарате КА “Сич-2”, позволяют с учетом динамики подспутниковой точки идентифицировать и прогнозировать пространственно-временную локализацию эпицентров и магнитуду зарождающихся землетрясений, извержений вулканов, а также локализацию южного и северного авроральных пиков в ионосфере Земли.

КА “Сич-2” запущен 17.08.2011 г. на солнечно-синхронную орбиту высотой 700 км и наклонением $98,1^\circ$. Период обращения ~ 98 мин. В состав научной космической аппаратуры “Сич-2” включены две зондовые системы, разработанные и изготовленные в ИТМ НАН Украины:

1. Детектор заряженных частиц (DE) — одиночный цилиндрический зонд Ленгмюра радиусом $r_p = 0,05$ см и длиной $l_p = 12,0$ см с охранным электродом радиусом $r_g = 0,2$ см

и длиной $l_g = 12,5$ см. При измерениях вольт-амперной характеристики (ВАХ) ось симметрии зонда Ленгмюра должна быть ортогональна вектору скорости \vec{U}_∞ полета КА. Время регистрации (развертки) ВАХ 1,0 с. Диапазон изменения напряжения на зонде $\pm 12,5$ В.

2. Детектор нейтральных частиц (DN), состоящий из двух зондов давления с инверсно-магнетронными преобразователями (ИМП) в качестве чувствительных элементов. Нормали к плоскости входных отверстий ИМП взаимноортогональны. При измерениях нормаль к апертуре первого ИМП \vec{n}_1 параллельна вектору скорости \vec{U}_∞ полета КА, а нормаль к апертуре второго ИМП \vec{n}_2 перпендикулярна вектору скорости \vec{U}_∞ . Применение детекторов DE и DN на КА “Сич-2” с использованием специальных процедур анализа и обработки выходных сигналов приборов позволяет замкнуть задачу диагностики потоков неравновесной разреженной плазмы в ионосфере и определить полный комплекс локальных значений кинетических параметров основных компонентов частично ионизованной среды [7, 10].

Собирание заряженных частиц детектором DE на КА “Сич-2” осуществлялось при условиях, когда $l_p/r_p \gg 1$, $r_p/\lambda_d \ll 1$, $l_p/r_e < 2\pi$ и $r_p/r_e \ll 1$ (λ_d — дебаевский радиус в невозмущенной плазме; $r_{i,e}$ — ларморовский радиус ионов и электронов).

При измерениях ось зонда параллельна поверхности Земли. Участок ВАХ, соответствующий торможению электронов в поле отрицательно заряженного зонда, в полулогарифмическом масштабе остается прямолинейным. Признаков влияния магнитного поля Земли на области торможения ($\Phi_W < 0$) и насыщения ($\Phi_W \gg 1$) электронного тока на зонд при $0,02 \leq r_p/r_e \leq 0,008$, как и в работах [11, 12], не обнаружено (здесь $\Phi_W = e\varphi_W/kT_e$ — безразмерный потенциал зонда; e — заряд электрона; $\varphi_W = \varphi_p - \varphi_0$ — потенциал зонда φ_p относительно потенциала плазмы φ_0 ; k — постоянная Больцмана; T_e — температура электронов). На собирание электронов практически не влияет и ориентация зонда относительно вектора скорости \vec{U}_∞ полета КА. Для определения концентрации электронов N_e использовались области торможения и насыщения электронного тока на зонд [7, 10, 13]:

$$N_e = \frac{I_e^H}{A_p e \left(\frac{2e\varphi_p}{m_e} \right)^{0,5}} = \xi_e I_e^H,$$

где I_e^H — электронный ток насыщения на зонд; $\xi_e = \pi/A_p e (2e\varphi_p/m_e)^{0,5}$; m_e — масса электрона; $A_p = 2\pi r_p l_p$ — собирающая площадь зонда, $\xi_e = \text{const}$.

При фиксированном потенциале $\varphi_p \geq 10$ В время регистрации сигнала 0,1 с, что при скорости КА $U_\infty \approx 7,5$ км/с соответствует разрешающей способности $\Delta z \leq 750$ м.

Авроральные пики. Пространственно-временные распределения N_e ионосферной плазмы, вычисленные по выходным сигналам детектора DE на КА “Сич-2”, демонстрирует рис. 1 (здесь и далее: LAT — широта; LONG — долгота). Распределения концентрации электронов (см. а) соответствуют траектории спутника (см. б): штриховая линия — подспутниковая трасса; квадратами обозначены зоны полярных пиков — максимумов N_e). Максимумам N_e соответствуют авроральные пики: дневной полярный пик соответствует $\sim 80^\circ$ ю. ш., ночной — $\sim 70^\circ$ с. ш. Максимумы N_e разнесены на $\Delta UT \approx 0,8$ hr, что соответствует временному интервалу 1/2 орбиты КА “Сич-2”. Приведенные распределения N_e согласуются с представлениями об особенностях структуры F2-области высокоширотной ионосферы [4, 5], а точность определения положения пиков подтверждает корректность процедуры идентификации пространственно-временных распределений кинетических параметров ионосферной плазмы.

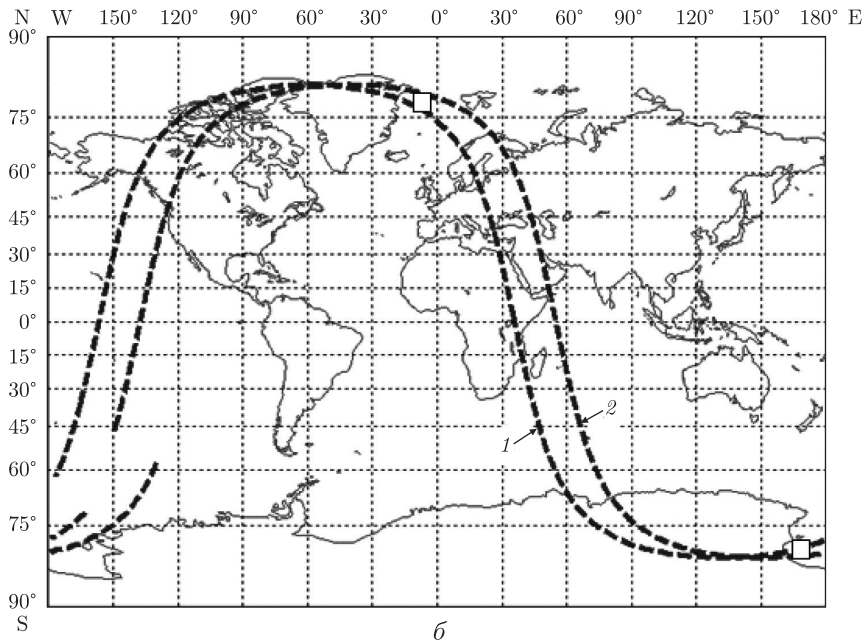
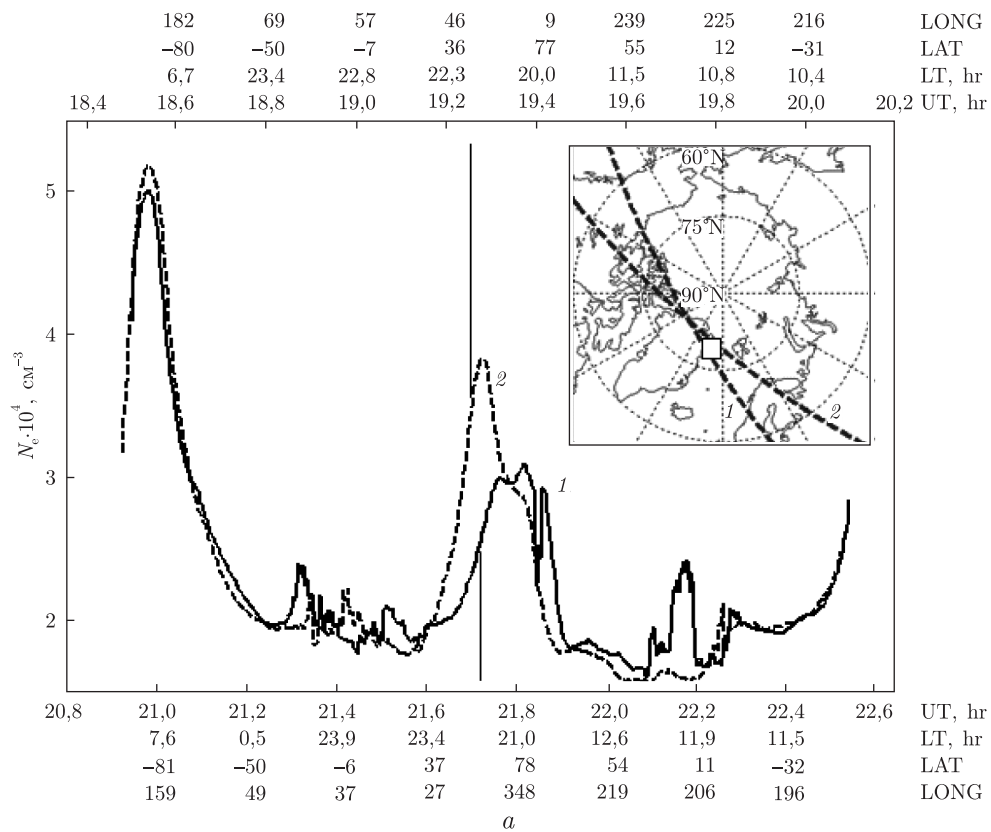


Рис. 1. Пространственно-временные распределения концентрации электронов (а) вдоль орбиты КА “Сич-2” (б), измеренные 23.11.2011 г. (кривая 1); 04.12.2011 г. (кривая 2)

Извержение вулкана. Пространственно-временное распределение N_e , вычисленное по зондовому току насыщения I_e^H детектора DE на КА “Сич-2” 01.09.2011 г., представлено на рис. 2 (см. *a*, кривая 1). Эпицентры извержений вулканов и землетрясений вдоль подспутниковой трассы КА “Сич-2” зарегистрированы в момент пролета 01.09.2011 г. UT = 1,1 hr (см. *б*). Данные об извержениях вулканов и землетрясениях приведены на веб-сайте United State Geological Survey (USGS).

На рис. 2, *б* вдоль подспутниковой трассы указано время UT пролета КА. Кривая 2 на рис. 2, *a* — зависимость энергии землетрясения от магнитуды. Расчетные значения для кривой 2 охватывают временной диапазон ± 2 сут от 01.09.2011 г., полосу шириной $\Delta z = \pm 700$ км относительно подспутниковой трассы; землетрясения с магнитудой $M > 4,0$ и глубиной $h \leq 60$ км. Для оценок использовалось упрощенное нами для $M \geq 4,5$ соотношение Гутенберга [14]: $E(M) = 10^{-M(0,025M-1,9)}$ кДж.

Сопоставление структуры пространственно-временного распределения N_e (см. *a* на рис. 2, кривая 1), локализации эпицентров произошедших и зарождающихся землетрясений (см. *б*) и зависимости $E(M)/E_{\max}$ (см. *a* на рис. 2, кривая 2) позволяют предположить, что ответственным за максимум N_e , структуру кривой 1 (см. *a*) является извержение вулкана, происходившее в сейсмоактивном районе с 31.08.2011 г. по 06.09.2011 г.

Землетрясения. Пространственно-временное распределение N_e , измеренное детектором DE вдоль траектории КА “Сич-2” 05.03.2012 г., иллюстрирует рис. 3, *a* (кривая 1). Сейсмоактивная обстановка для ± 2 сут и $h \leq 60$ км показана на рис. 3, *б*. Вдоль подспутниковой трассы указано время пролета КА. Кривая 1 — N_e и кривая 2 (см. *a*) характеризуют зарождающиеся землетрясения с магнитудой $M > 5$ (06.03.2012 г. и 07.03.2012 г.).

Зависимость амплитуды возмущения концентрации заряженных частиц $\delta n_e = N_e^{\max}/N_{0e}$ от магнитуды M землетрясения иллюстрирует рис. 4 (N_e^{\max} — максимальное значение концентрации на пространственно-временном распределении; N_{0e} — концентрация заряженных частиц в невозмущенной плазме).

Для оценки магнитуды землетрясения может быть использована эмпирическая зависимость (см. кривую 3 на рис. 4):

$$M = \sqrt{2} \ln \left(\frac{\delta n_e}{0,118} \right).$$

Дополнительным параметром для идентификации эпицентра землетрясения служит возмущение — максимум на распределении температуры тяжелых частиц T_n/T_{0n} (нейтралов, ионов) вдоль витка КА “Сич-2” 05.03.2012 г. (см. *в* на рис. 3): (T_{0n} — невозмущенное значение температуры нейтралов). Численные значения температуры нейтралов определены по двум выходным сигналам детектора нейтралов DN [7, 10]:

$$T_n = \xi_n \left(\frac{I_2}{I_1} \right),$$

где величина $\xi_n = \text{const}$ определяется размерами входных каналов ИМП детектора DN; $I_{1,2}$ — выходные сигналы ИМП.

Максимумы на пространственно-временных распределениях температуры тяжелых частиц (ионов) зарегистрированы также над эпицентрами землетрясений на о. Суматра (Индонезия) в момент пролета КА “DEMETER” и над сейсмоактивным районом Индии (КА “SROSS-C2”) [6, 8].

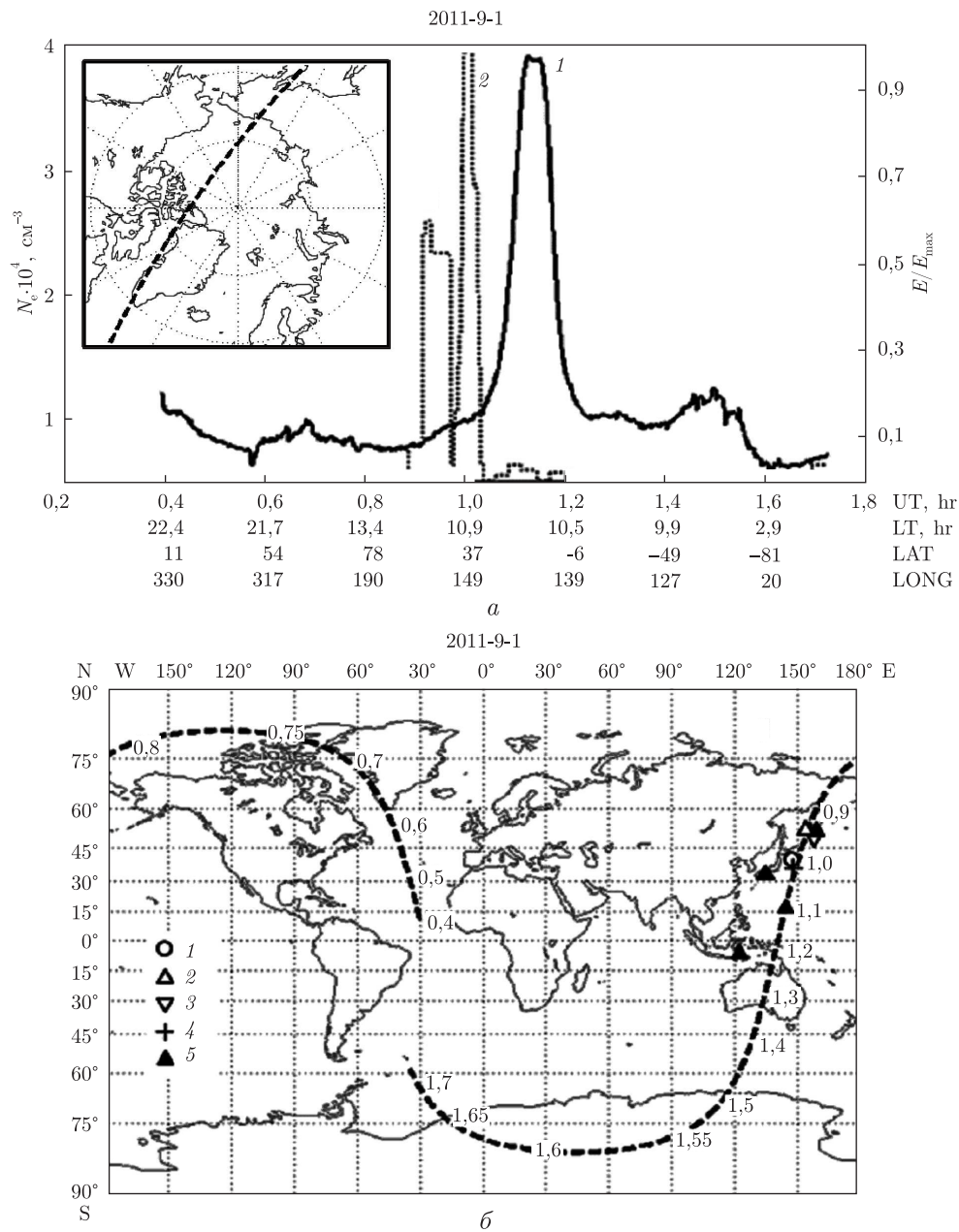


Рис. 2. Распределение концентрации электронов (кривая 1) вдоль траектории КА “Сич-2” 01.09.2011 г. и энергии землетрясений (кривая 2) вдоль подспутниковой трассы (а); локализация эпицентров землетрясений и извержений вулканов вдоль подспутниковой трассы (б): *землетрясения*, произошедшие 31.08.2011 г. до пролета КА 01.09.2011 г. (UT = 1,1 hr): 1 – UT = 5,53 hr, $h = 27$ км, $M = 4,9$; 2 – UT = 12,28 hr, $h = 46$ км, $M = 4,8$ и *зарождающиеся землетрясения*, произошедшие после пролета КА “Сич-2” 01.09.2011 г. (UT = 1,1 hr): 3 – UT = 3,53 hr, $h = 39$ км, $M = 4,7$; 4 – 02.09.2011 г. UT = 5,57 hr, $h = 23$ км, $M = 4,7$; 5 – извержения вулканов

В масштабе реального времени изложенная процедура идентификации и прогнозирования пространственно-временной локализации эпицентров и магнитуд землетрясений может быть реализована с использованием данных зондовых измерений при пролете КА над

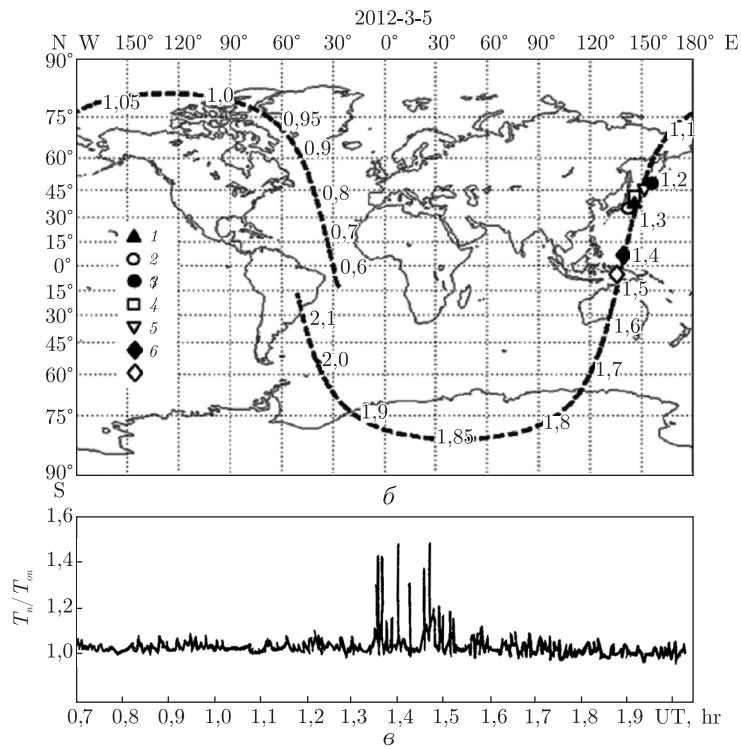
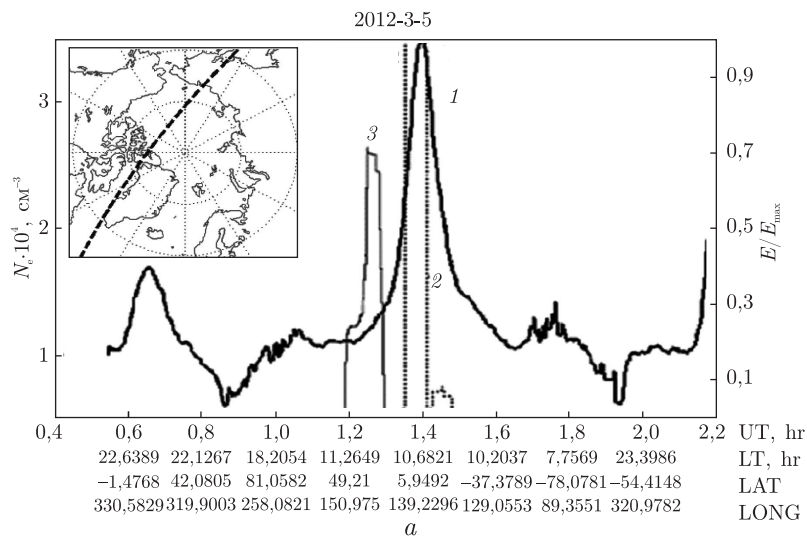


Рис. 3. Распределения параметров плазмы, энергии землетрясения (*a*, *в*) и эпицентров землетрясений (*б*) вдоль траектории КА “Сич-2” 05.03.2012 г.:

a: 1 — N_e , см^{-3} , 2 — $E(M)/E_{\text{max}}$ для землетрясений с $M > 5$; 3 — $E(M)/E_{\text{max}}$ для землетрясений с $4,0 < M \leq 5,0$;

б: эпицентры землетрясений, произошедших до пролета КА 05.03.2012 г. (UT = 1,4 hr): 1 — 03.03.2012 г. UT = 8,53 hr, $h = 27$ км, $M = 4,8$; 2 — 04.03.2012 г. UT = 13,53 hr, $h = 19$ км, $M = 4,7$ и зарождающиеся землетрясения, произошедшие после пролета КА 05.03.2012 г. (UT = 1,4 hr): 3 — 05.03.2012 г. UT = 3,53 hr, $h = 55$ км, $M = 4,7$, 4 — 05.03.2012 г. UT = 6,53 hr, $h = 52$ км, $M = 5,0$;

5 — 06.03.2012 г. UT = 6,53 hr, $h = 45$ км, $M = 5,3$, 6 — 06.03.2012 г. UT = 22,53 hr, $h = 37$ км, $M = 4,9$, 7 — 07.03.2012 г. UT = 12,53 hr, $h = 53$ км, $M = 5,6$;

в: температура нейтралов T_n/T_{0n}

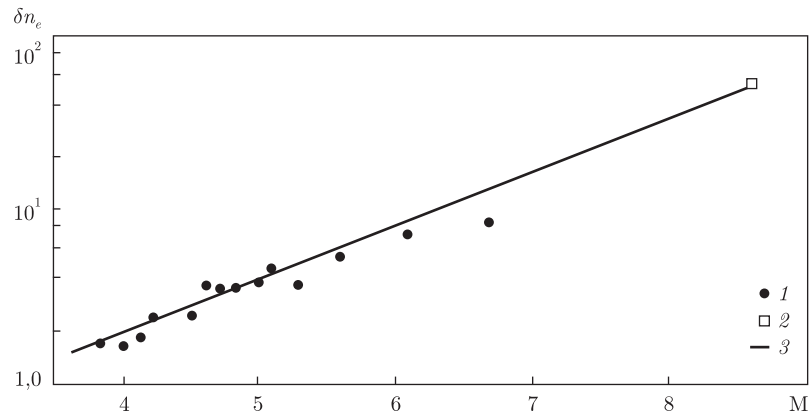


Рис. 4. Зависимость амплитуды возмущения концентрации электронов от магнитуды землетрясения: 1 — измерения на КА “Сич-2” с 01.09.2011 г. по 05.03.2012 г.; 2 — измерения на КА “DEMETER” 28.03.2005 г.; 3 — аппроксимация $\delta n_e = 0,118 \exp(M/\sqrt{2})$

сейсмоактивным районом не менее одного раза в сутки и данных USGS о сейсмических процессах вдоль подспутниковой трассы в режиме on-line.

1. Бирюков А. С., Григорян О. Р., Кузнецов С. Н. и др. Космическая физика и экология: эффекты от землетрясений на ионосферных высотах // Инженер. экология. – 1996. – № 5. – С. 92–115.
2. Фаткуллин М. Н., Солодовников Г. К., Можяев А. А., Мигулин В. В. Флуктуации амплитуды радиоволн в ионосфере, вызванные землетрясением в Спитаке // Косм. исследования. – 1998. – **36**, № 4. – С. 387–390.
3. Гохберг М. Б., Лапшин М. Н., Стеблов Г. М., Шалимов С. Л. Ионосферный отклик на подводные Курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 1. – С. 30–38.
4. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. – Москва: Наука, 1972. – 563 с.
5. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – Москва: Наука, 1988. – 528 с.
6. Sharma D., Chang R., Israil M. Effect of seismic activities on ion-temperature in the F2 region of the ionosphere // Atmosfera. – 2006. – **19**, No 1. – P. 1–7.
7. Шувалов В. А., Письменный Н. И., Лазуценков Д. Н., Кочубей Г. С. Зондовая диагностика потоков лабораторной и ионосферной разреженной плазмы // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – **56**, № 4. – С. 98–107.
8. Lebreton J. P., Stverak S., Travnicek P. et al. The ISJ Langmir probe experiment processing on board Demeter: scientific objectives, description and first result // Planet. and Space Sci. – 2006. – **54**. – P. 472–486.
9. Davis B. Studying the ionospheric plasma with Langmuir Probes with an application to seismic monitoring // Final Report, ASEN0 5168. – Remote Sensing. – 2012.
10. Шувалов В. А., Лукенюк А. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С. Зондовая диагностика околоспутниковой среды на КА “Сич-2” // Космічна наука і технологія. – 2013. – **19**, № 1. – С. 13–19.
11. Губский В. Ф. Влияние магнитного поля на измерения концентрации и температуры электронов цилиндрическими зондами в ионосфере Земли // Солнечно-земн. физика. – 2008. – **1**, вып. 12. – С. 261–269.
12. Rubinstein J., Laframboise J. G. Upper-bond current to a cylindrical probe in a collisionless magnetoplasma // Phys. Fluids. – 1978. – **21**, No 9. – P. 1655–1656.
13. Шотт Л. Электрические зонды // Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. – Москва: Мир, 1971. – С. 459–495.
14. Короновский Н. В., Абрамов В. А. Землетрясения: причины, последствия, прогноз // Сорос. образоват. журн. Науки о Земле. – 1988. – № 12. – С. 71–78.

Институт технической механики НАН Украины
и ГКА Украины, Днепрпетровск

Поступило в редакцию 16.07.2013

В. О. Шувалов, член-кореспондент НАН України **О. В. Пилипенко**

Ідентифікація збурень параметрів іоносферної плазми за зондовими вимірюваннями на супутнику “Січ-2”

За результатами зондових вимірювань параметрів іоносферної плазми апаратурою ІТМ на космічному апараті “Січ-2” показано, що збурення розподілів концентрації заряджених частинок (електронів, іонів) і температури важких частинок (нейтралів, іонів) можуть бути використані з урахуванням динаміки підсупутникової точки для ідентифікації просторово-часової локалізації вивержень вулканів, епіцентрів і магнітуд землетрусів, що зароджуються, а також локалізації південного і північного авроральних піків у іоносфері Землі.

V. A. Shuvalov, Corresponding Member of the NAS of Ukraine **O. V. Pilipenko**

Identification of perturbations of the ionospheric plasma parameters by the probe measurements on the satellite “Sich-2”

By the results of probe measuring of the ionospheric plasma parameters by the ITM's equipment on the spacecraft “Sich-2”, it is shown that perturbations of the concentrations of charged (electrons, ions) particles and the temperatures of heavy (neutrals, ions) particles could be used, considering the subsatellite point dynamics, for the identification of the spatio-temporal location of the volcano eruptions, epicenters and magnitudes of the inceptive earthquakes, and for the localization of the North and South auroral peaks in the Earth's ionosphere.