

УДК 533.95

В. А. Шувалов, Д. Н. Лазученков, С. В. Носиков, Г. С. Кочубей

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

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЗОНДОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ВОЗМУЩЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА КА «СИЧ-2»

Разработана процедура идентификации флуктуаций пространственно-временного распределения нейтральных и заряженных частиц по зондовым измерениям научной аппаратурой ИТМ на КА «Сич-2». Определена локализация извержений вулканов, эпицентров землетрясений, которые зарождаются и происходят на подспутниковой трассе КА, а также локализацию южного и северного авроральных пиков в ионосфере Земли.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферная плазма — индикатор, чутко реагирующий на воздействие «сверху» (Солнце, гелиосферные возмущения) и воздействие «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» (разрушение земной коры, процессы в литосфере, землетрясения) — с опережением. Это обстоятельство может быть использовано для прогнозирования, идентификации пространственно-временной локализации природных и техногенных катастрофических явлений.

Состояние ионосферной плазмы, ее нейтрального и заряженных компонентов характеризуют основные кинетические параметры: температура электронов, ионов и нейтралов T_e , T_i , T_n ; концентрации нейтральных (N_n) и заряженных ($N_{i,e}$) частиц (ионов и электронов); степень неизотермичности T_i/T_e , степень ионизации $\epsilon = N_i/(N_i + N_n)$ и потенциал пространства (плазмы) ϕ_0 . Пространственно-временные распре-

деления, флуктуации основных кинетических параметров нейтрального и заряженных компонентов, электрических и магнитных полей, развитие неустойчивостей в ионосферной плазме могут быть использованы для прогноза землетрясений, извержений вулканов, для определения пространственно-временной локализации зон сейсмической активности, торнадо, песчаных бурь и прочих катаклизмов [11, 12, 14].

Для диагностики, мониторинга и регистрации флуктуаций основных кинетических параметров ионосферной плазмы как предвестников землетрясений и индикаторов извержений вулканов, их локализации может быть использована научная аппаратура на орбитальных космических платформах [2, 4, 5, 10–12, 25]. При этом зондовые методы диагностики потоков неравновесной разреженной плазмы в ионосфере не замкнуты: вольтамперные характеристики (ВАХ) электрических зондов не позволяют определить параметры нейтральных частиц.

С целью повышения информативности зондовых методов при диагностике неизотермической плазмы низкой плотности в ионосфере в состав комплекса научной аппаратуры КА «Сич-2» (запущен 17 августа 2011 г. на гелиосинхронную орбиту высотой 700 км и наклоном 98°) включены две зондовые системы, разработанные и изготовленные в ИТМ:

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 ВАХ ось симметрии зонда Ленгмюра должна быть ортогональна к вектору скорости U_∞ полета КА и параллельна поверхности Земли;

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 взаимно ортогональны. При измерениях нормаль к апертуре первого ИМП \mathbf{n}_1 должна быть параллельна вектору скорости U_∞ полета КА, а нормаль \mathbf{n}_2 к апертуре второго ИМП — перпендикулярна к вектору скорости U_∞ . В работах [21–23] показано, что 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 основных кинетических параметров, характеризующих состояние околоспутниковой среды.

Цель данной работы — показать, что пространственно-временные распределения кинетических параметров нейтральных и заряженных частиц, измеренные зондовыми системами ИТМ на КА «Сич-2», позволяют определять локализацию южного и северного авроральных пиков концентрации электронов в ионосфере Земли; локализацию эпицентров произошедших, происходящих в момент пролета КА и зарождающихся землетрясений и извержений вулканов на подспутниковой трассе на поверхности Земли.

ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА КА «СИЧ-2»

Нейтральные частицы. Для измерения параметров нейтрального компонента ионосферной разреженной плазмы на КА «Сич-2» использовался детектор DN при достаточно жестких ограничениях по ориентации зондов давления относительно вектора скорости U_∞ полета КА.

Для выходных сигналов двух зондов давления детектора DN при $\theta_1 = 0$ и $\theta_2 = \pi/2$ и скоростном отношении $S_n = U_\infty / \sqrt{2kT_n/M_n} \geq 2.5$ согласно [22, 23] имеем для температуры нейтральных частиц

$$T_n = \xi \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^2 \frac{T_{w_1} \Psi_1}{T_{w_2} \Psi_2}, \quad (1)$$

концентрации

$$N_n = P_1 / k \sqrt{\xi T_{w_1} \Psi_1} \quad (2)$$

или

$$N_n = P_2 / k \sqrt{T_n T_{w_2} \Psi_2}, \quad (3)$$

где $\theta_{1,2}$ — углы между вектором скорости U_∞ полета КА и нормалью $\mathbf{n}_{1,2}$, $\xi^{0.5} = U_\infty \sqrt{2\pi M_n / k}$, k — постоянная Больцмана, M_n — масса нейтральных частиц, $P_{1,2}$ — давление, измеряемое зондами 1 и 2, $T_{w_{1,2}}$ — температура стенок корпуса зондов, $\Psi_{1,2}$ — коэффициенты Клаузинга, затабулированные в работе [8].

Соотношения (1)–(3) позволяют оценить по выходным сигналам детектора DN значения температуры T_n и концентрации N_n нейтральных частиц, их пространственно-временные распределения в ионосфере вдоль траектории КА.

Заряженные частицы. Собираение заряженных частиц детектором DE, измерение ВАХ бесконечно длинного цилиндрического зонда на КА «Сич-2» осуществлялось при условиях, когда $l_p/r_p \gg 1$, $r_p/\lambda_d \ll 1$, $l_p/r_e \leq 2\pi$ и $r_p/r_e \ll 1$ (λ_d — дебаевский радиус в невозмущенной плазме,

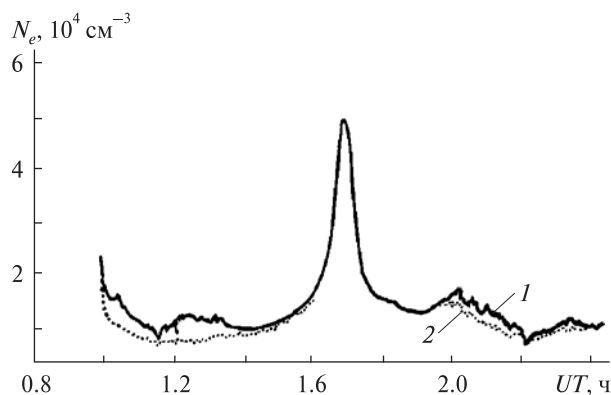


Рис. 1. Изменения концентрации электронов N_e со временем, полученные 14 сентября 2011 г. КА «Сич-2»: 1 — ток насыщения (9), (10), 2 — ток при $\phi_w = 0$ (8)

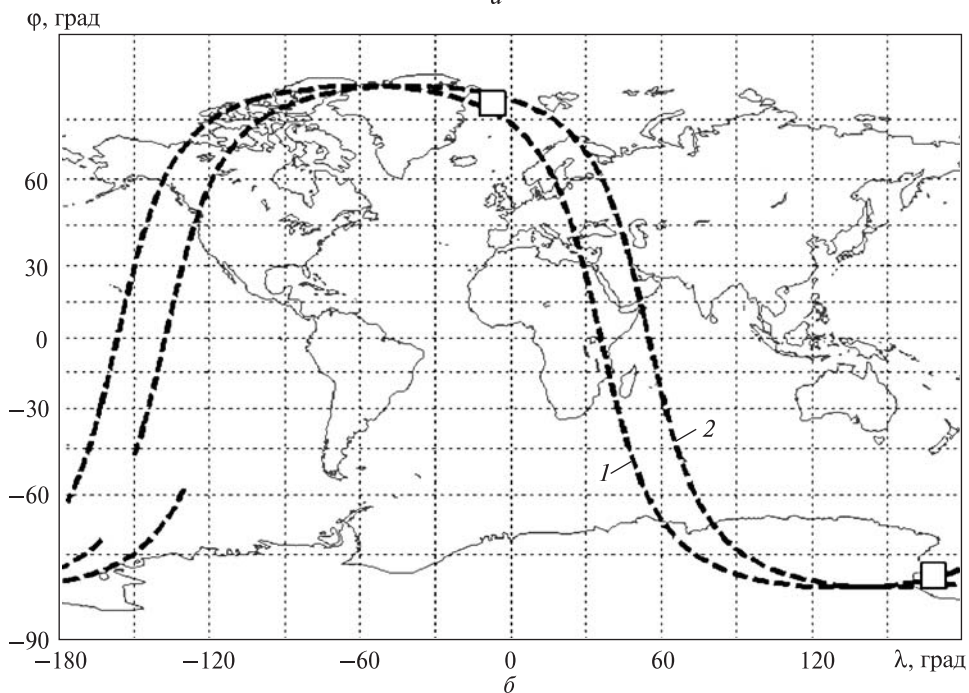
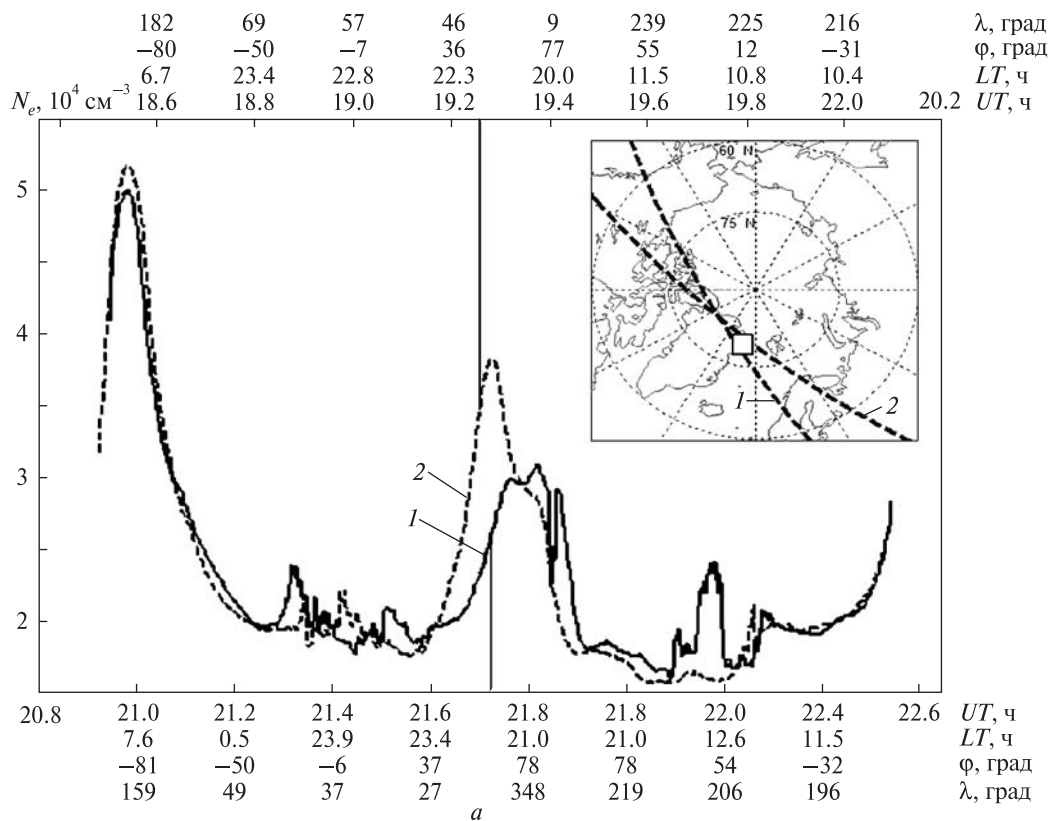


Рис. 2. а — пространственно-временные распределения концентрации электронов N_e , полученные 23 ноября (1) и 4 декабря 2011 г. (2) КА «Сич-2», б — подспутниковые трассы. Квадратики — южный и северный полярные пики

$r_{i,e}$ — ларморовский радиус ионов и электронов). В полярной ионосфере на высоте $h \approx 700$ км при средних значениях $\lambda_d \approx 3.5$ см; $r_e \approx 2.5$ см; $r_i \approx \approx 330$ см и $l_p \approx 12$ см все приведенные выше условия выполняются.

При измерениях ВАХ ось зонда параллельна поверхности Земли. Участок вольтамперных характеристик, 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 [5, 26], 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). На собирание электронов практически не влияет и ориентация зонда относительно вектора скорости U_∞ полета КА. Для определения температуры T_e и концентрации N_e использовались области торможения и насыщения электронного тока на зонд и формулы [20, 22, 23]:

$$T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{d \ln I_e}{d\varphi_p} \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$T_e = \frac{4e}{\pi k} \frac{I_{0e}^2}{(dI_e^2/d\varphi_p)} \quad (5)$$

и

$$T_e = \frac{e}{k} \left(\frac{1}{I_e} \frac{dI_e}{d\varphi_p} \right)^{-1}. \quad (6)$$

Величина

$$I_{0e} = A_p j_{0e} = 2\pi r_p l_p e N_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{0.5}$$

характеризует электронный ток при $\varphi_W = \varphi_p - \varphi_0 = 0$ ($A_p = 2\pi r_p l_p$ — собирающая площадь зонда, j_{0e} — плотность хаотического тока электронов на зонд).

Потенциал плазмы φ_0 определялся по точке пересечения асимптот линейных участков тока при тормозящих электронах потенциалах и электронного тока насыщения I_e

$$\varphi_0 = \varphi_p - I_e^2 \left(\frac{dI_e^2}{d\varphi_p} \right)^{-1}. \quad (7)$$

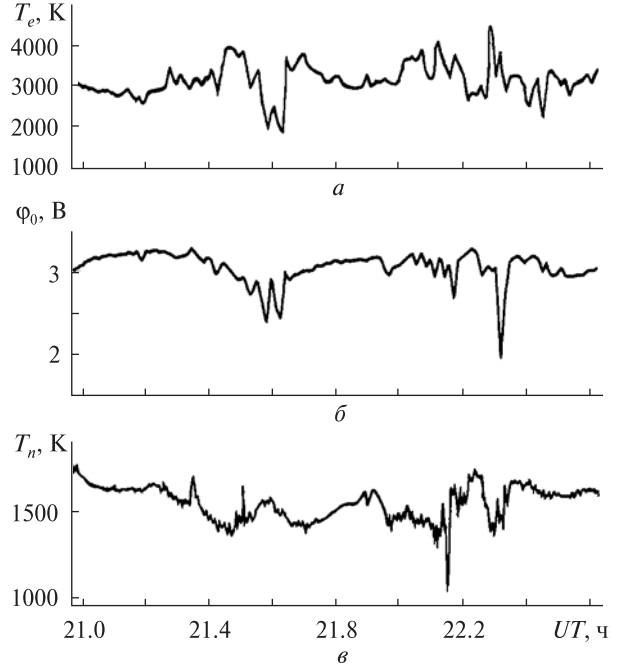


Рис. 3. Изменение параметров плазмы: а — температуры T_e электронов, б — потенциала φ_0 , в — температуры T_n нейтралов вдоль траектории КА «Сич-2» 23 ноября 2011 г.

Концентрация электронов при $\varphi_W = 0$ определялась из выражения

$$N_e = \frac{I_{e0}}{A_p e (kT_e / 2\pi m_e)^{0.5}}, \quad (8)$$

а при $\Phi_W \geq 10$ и $\varphi_p \gg \varphi_0$ — из выражения

$$N_e = \left(\frac{\pi^2 m_e}{2A_p^2 e^3} \frac{dI_e^2}{d\varphi_p} \right)^{0.5}, \quad (9)$$

или

$$N_e \approx \frac{\pi I_e}{A_p e (2e\varphi_p / m_e)^{0.5}}. \quad (10)$$

На рис. 1 для сравнения приведены кривые изменения концентрации N_e со временем, измеренные детектором DE на КА «Сич-2» 14 сентября 2011 г.: кривая 1 — ток насыщения, формулы (9)—(10), кривая 2 — ток при $\varphi_W = 0$, формула (8). При вычислении N_e по (9) и (10) знание T_e и φ_0 не требуется.

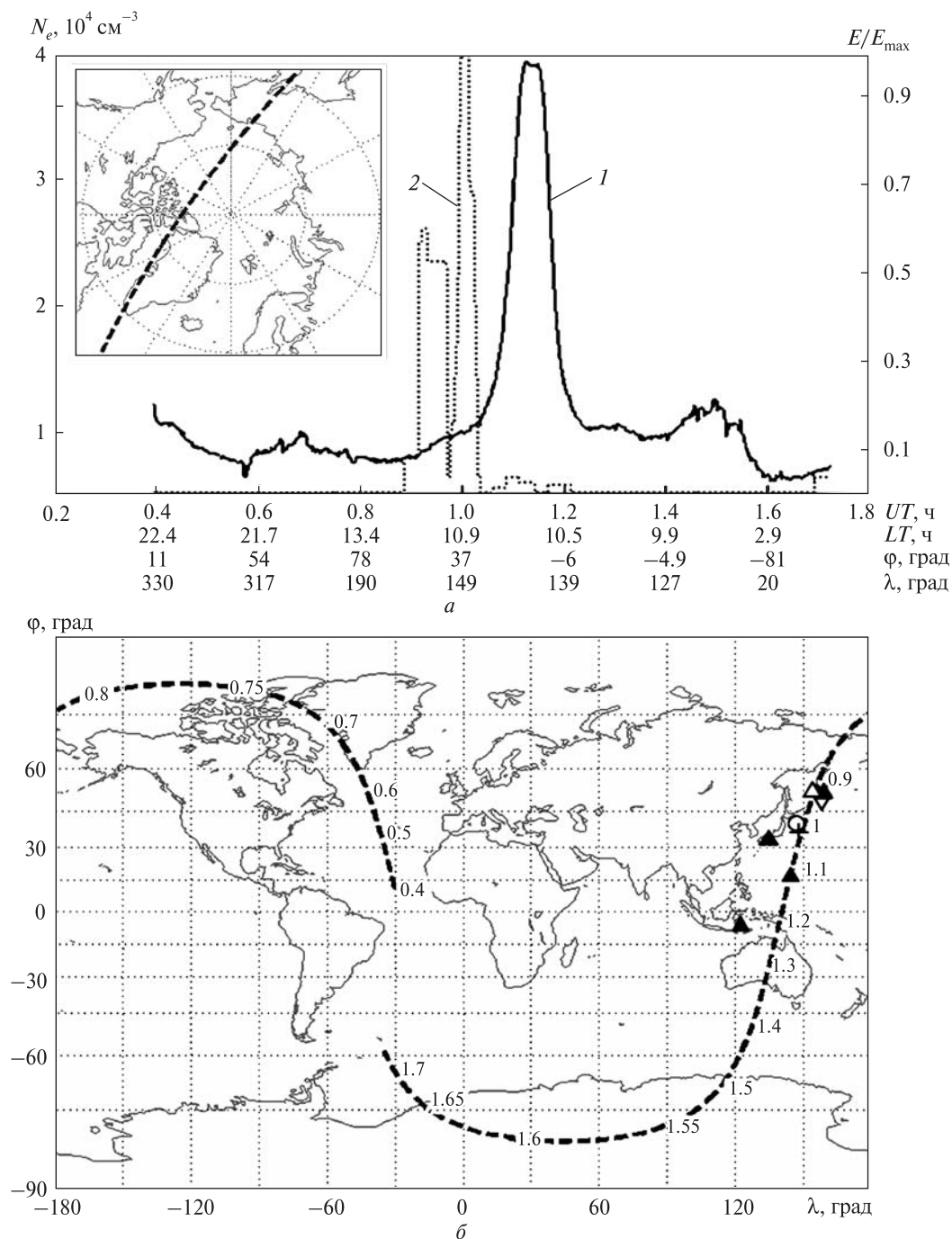


Рис. 4. *a* — распределение концентрации N_e электронов (кривая 1) и энергии землетрясения E (кривая 2) вдоль траектории КА «Сич-2» 1 сентября 2011 г., *б* — положения эпицентров землетрясений и извержений вулканов на подспутниковой трассе: кружок и треугольник — землетрясения 31 августа 2011 г. ($UT = 5:53$, глубина $h = 27$ км, магнитуда $M = 4.9$ и $UT = 12:28$, $h = 46$ км, $M = 4.8$); перевернутый треугольник и крестик — зарождающиеся землетрясения (произошедшие 1 сентября 2011 г. $UT = 3:53$, $h = 39$ км, $M = 4.7$ и 2 сентября 2011 г., $UT = 5:57$, $h = 23$ км, $M = 4.7$); темные треугольники — извержения вулканов с 31 августа по 6 сентября 2011 г. Вдоль подспутниковой трассы указано время UT пролета КА (пик N_e зарегистрирован в $UT = 1:01$)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Авроральные пики. Пространственно-временные распределения кинетических параметров ионосферной плазмы, вычисленные по выходным сигналам зондов на КА «Сич-2» с использованием соотношений (1)–(10), представлены на рис. 2, *а*: кривая 1 — измерения 23 ноября 2011 г., 2 — 4 декабря 2011 г. На рис. 2, *б* показаны подспутниковые трассы, квадратиками обозначены зоны полярных пиков — максимумов N_e . Положения максимумов N_e характеризуют авроральные (полярные) пики: дневной полярный пик соответствует широтам $\varphi \approx 80^\circ$ южной широты, ночной — широтам $\varphi \approx 75^\circ$ северной широты. Максимумы N_e отстоят на $\Delta UT \approx 0.8$ ч. Распределения температуры T_e электронов, потенциала плазмы ϕ_0 и температуры T_n нейтральных частиц 23 ноября 2011 г. на рис. 3 имеют сложную изрезанную структуру. Приведенные распределения соответствуют представлениям об особенностях структуры F2-области высокоширотной ионосферы [1, 3], а точность определения положения авроральных пиков подтверждает корректность процедуры идентификации пространственно-временных распределений кинетических параметров ионосферной плазмы.

Извержение вулкана. Пространственно-временное распределение концентрации электронов N_e , вычисленной по зондовому току насыщения детектора DE на КА «Сич-2» 1 сентября 2011 г. — формулы (9), (10), приведено на рис. 4, *а* (кривая 1). На рис. 4, *б* штриховой линией показана траектория КА (подспутниковая трасса), эпицентры землетрясений и извержений вулканов, произошедших к моменту пролета КА. Информация об извержениях вулканов и землетрясениях — данные United State Geological Survey (USGS), а также Главного центра специального контроля ГКАУ.

Кривая 2 на рис. 4, *а* — зависимость энергии землетрясения от магнитуды $E(M)/E_{\max}$. Оценки охватывают временной диапазон ± 2 сут от 1 сентября 2011 г., полосу шириной $\Delta z = \pm 700$ км относительно подспутниковой трассы; землетря-

сения с магнитудой $M > 4.5$ и глубиной $h \leq 60$ км. Для оценок использовалось упрощенное нами для $M \geq 4.5$ соотношение Гутенберга [19]: $E(M) = 10^{-M(0.025M-1.9)}$ кДж. Порядок величин энергии, выделяющейся при землетрясении, иллюстрирует зависимость $E(M)/E(5)$ на рис. 5.

Сопоставление структуры пространственно-временного распределения концентрации электронов N_e (кривая 1, рис. 4, *а*), локализации эпицентров произошедших и зарождающихся землетрясений (рис. 4, *б*) и зависимости $E(M, UT)/E_{\max}$ (кривая 2 на рис. 4, *а*) позволяют предположить, что ответственным за максимум N_e , структуру кривой 1 рис. 4, *а* является извержение вулкана, происходившее в рассматриваемом районе с 31 августа по 6 сентября 2011 г. Координаты извержений вулканов показаны на рис. 4, *б*.

Землетрясения. Рис. 6 иллюстрирует пространственно-временное распределение концентрации электронов N_e (кривая 1 на рис. 6, *а*) на траектории КА «Сич-2» 2 октября 2011 г. и сейсмоактивную обстановку на подспутниковой трассе (штриховая кривая рис. 6, *б*).

В день пролета КА «Сич-2» 2 октября 2011 г. землетрясения с магнитудой $M \geq 4.5$ в рассматриваемой районе не наблюдались. Оценки выделяющейся энергии $E(M, UT)/E_{\max}$ соответствуют произошедшим (кривая 2 на рис. 6, *а*) и зарождающимся (кривая 3 на рис. 6, *а*) землетрясениям. Максимум распределения N_e обусловлен, по-видимому, произошедшими 1 октября 2011 г. землетрясениями.

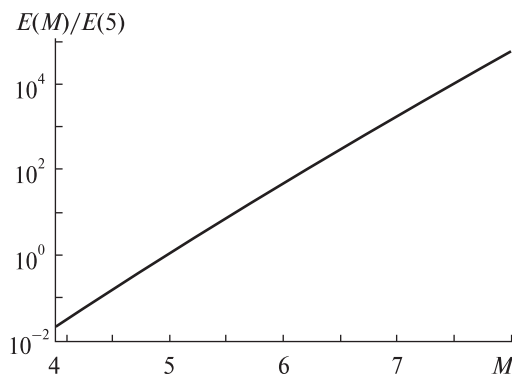


Рис. 5. Нормированная зависимость энергии $E(M)/E(5)$, выделяющейся при землетрясении, от магнитуды M

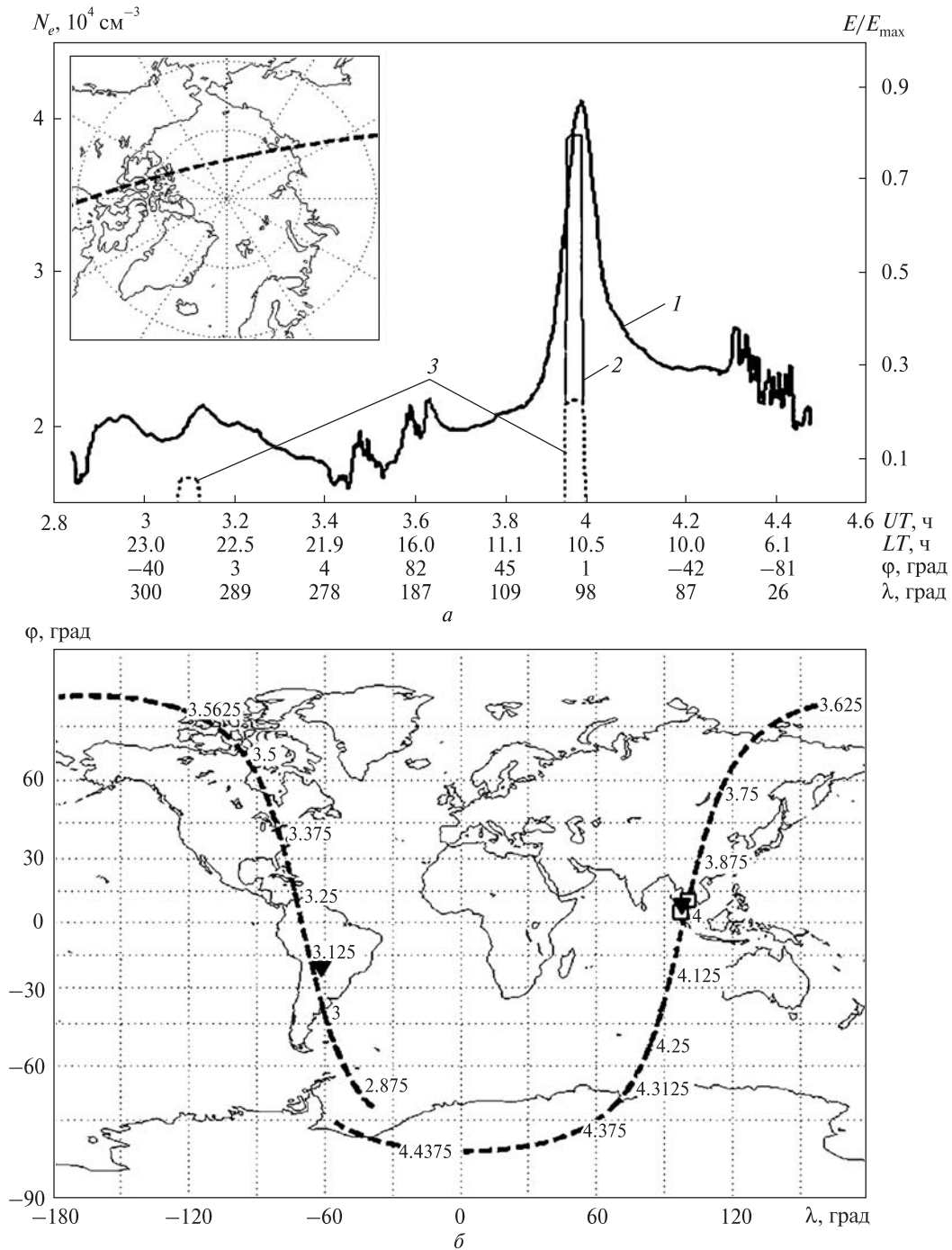


Рис. 6. а — распределение концентрации N_e электронов вдоль траектории КА «Сич-2» 2 октября 2011 г. (кривая 1) и энергии $E(M)/E_{\text{max}}$ землетрясения 1 октября 2011 г., $UT = 04:00$ (кривая 2), а также землетрясения 3 октября 2011 г. (кривая 3); б — положения эпицентров землетрясений вдоль подспутниковой трассы КА «Сич-2» 2 октября 2011 г.: треугольники — землетрясения 1 октября 2011 г. ($UT = 04:47$, $h = 46$ км, $M = 5.2$ и $UT = 12:47$, $h = 15$ км, $M = 5.1$), квадратики — зарождающиеся землетрясения 3 октября 2011 г. ($UT = 04:53$, $h = 42$ км, $M = 4.8$ и $UT = 17:53$, $h = 40$ км, $M = 4.6$)

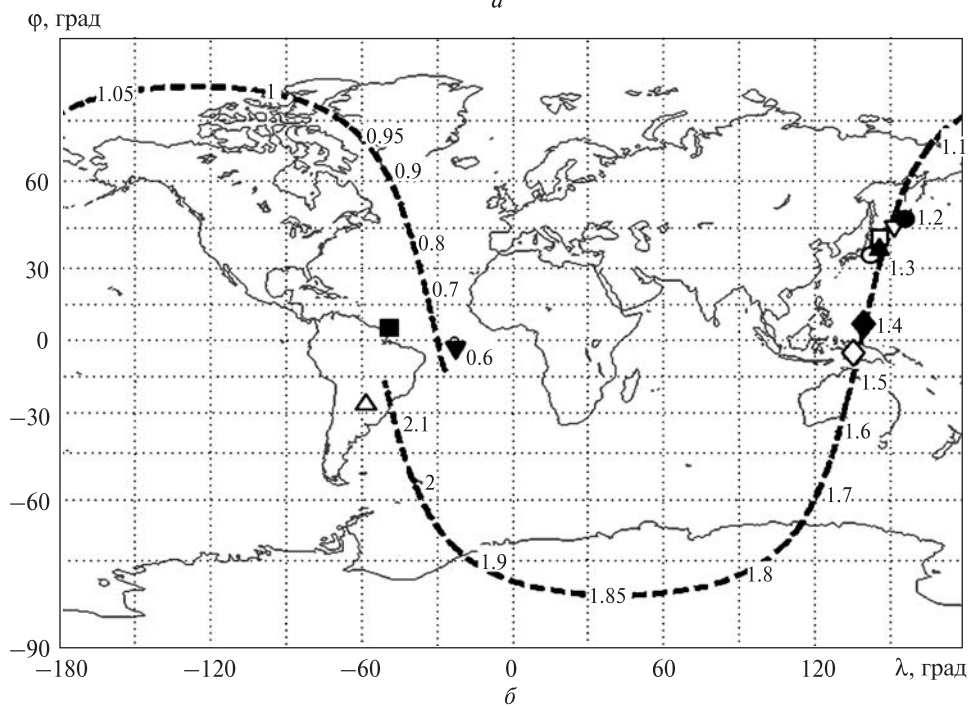
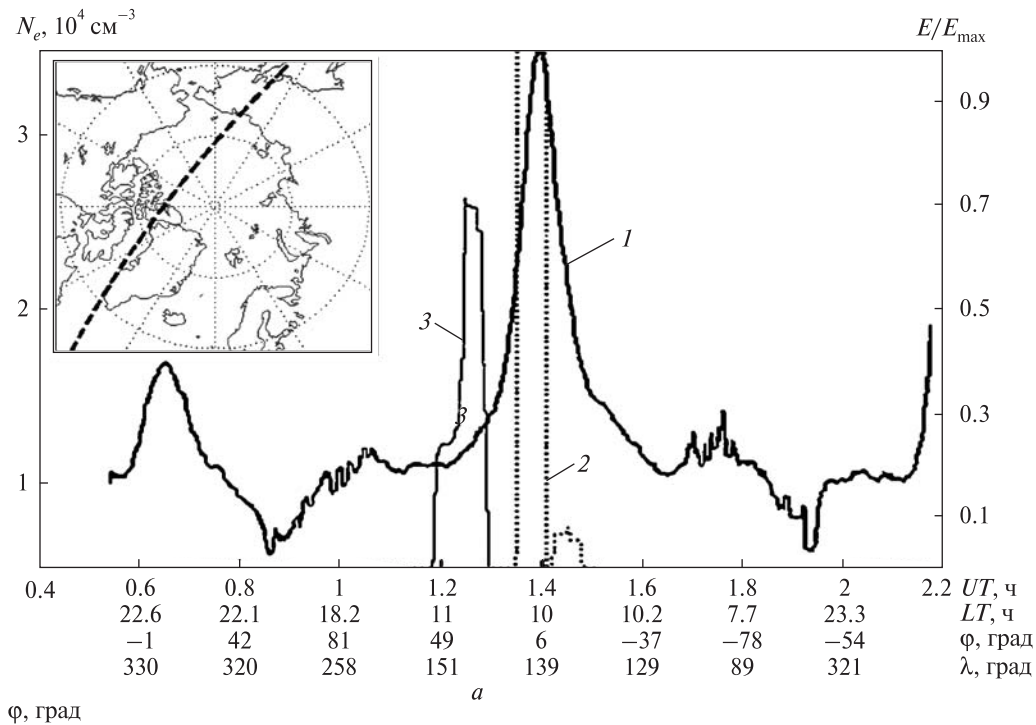


Рис. 7. *a* — распределение концентрации N_e электронов вдоль траектории КА «Сич-2» 5 марта 2012 г. (кривая 1), энергии $E(M)/E_{\max}$ для землетрясений $M > 5$, (кривая 2) и энергии $E(M)/E_{\max}$ для землетрясений $4.5 < M \leq 5$ (кривая 3); *б* — положения вдоль подспутниковой трассы КА «Сич-2» 5 марта 2012 г. эпицентров землетрясений (произошедших к моменту пролета $UT = 1:04$ либо зарождающихся): прямой темный треугольник — 3 марта, $UT = 8:53$ ч, $h = 27$ км, $M = 4.8$, светлый кружок — 4 марта, $UT = 13:53$, $h = 19$ км, $M = 4.7$, темный кружок — 5 марта, $UT = 3:53$, $h = 55$ км, $M = 4.7$, светлый квадратик — 5 марта, $UT = 6:53$, $h = 52$ км, $M = 5.0$, темный ромбик — 6 марта, $UT = 6:53$, $h = 45$ км, $M = 5.3$, обратный светлый треугольник — 6 марта, $UT = 22:53$, $h = 37$ км, $M = 4.9$, светлый ромбик — 7 марта, $UT = 12:53$, $h = 53$ км, $M = 5.6$, светлый треугольник — 5 марта, $UT = 14:01$, $h = 50$ км, $M = 4.8$, темный квадратик — 6 марта, $UT = 14:20$, $h = 10$ км, $M = 4.8$, обратный темный треугольник — 6 марта, $UT = 16:05$, $h = 12$ км, $M = 4.8$

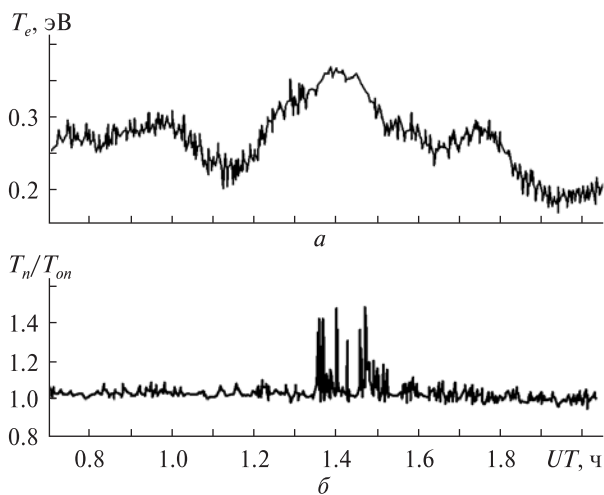


Рис. 8. Распределения параметров плазмы вдоль траектории КА «Сич-2» 5 марта 2012 г.: а — температуры электронов T_e , б — температура нейтралов T_n/T_{on}

Пространственно-временное распределение концентрации электронов N_e , измеренное детектором DE вдоль траектории КА «Сич-2» 5 марта 2012 г., показано на рис. 7, а (кривая 1). Сейсмоактивная обстановка для ± 2 сут и $h \leq 60$ км приведена на рис. 7, б.

Зависимости $E(M, UT)/E_{max}$ на рис. 7, а представляют: кривая 2 — землетрясения с магнитудой $M > 5$, кривая 3 — землетрясения с магнитудой $4.5 < M \leq 5$. Таким образом, кривая 1 — N_e и штриховая кривая 2 рис. 7, а характеризуют зарождающиеся землетрясения с магнитудой $M > 5$ (6 и 7 марта 2012 г.).

Максимум распределений температуры электронов T_e и температуры нейтралов T_n/T_{on} 5 марта 2012 г. на рис. 8 ($T_{on} = 1540$ К — среднее значение температуры нейтральных частиц) может служить дополнительным признаком для идентификации эпицентра зарождающегося землетрясения.

Учитывая, что связь между температурами электронов T_e , ионов T_i и нейтралов T_n в ионосферной плазме может быть представлена в виде [3, 6, 23]

$$T_i = T_n + \frac{T_e - T_n}{1 + \frac{\delta_m v_{in}}{\delta_{ei} v_{ei}}}, \quad (11)$$

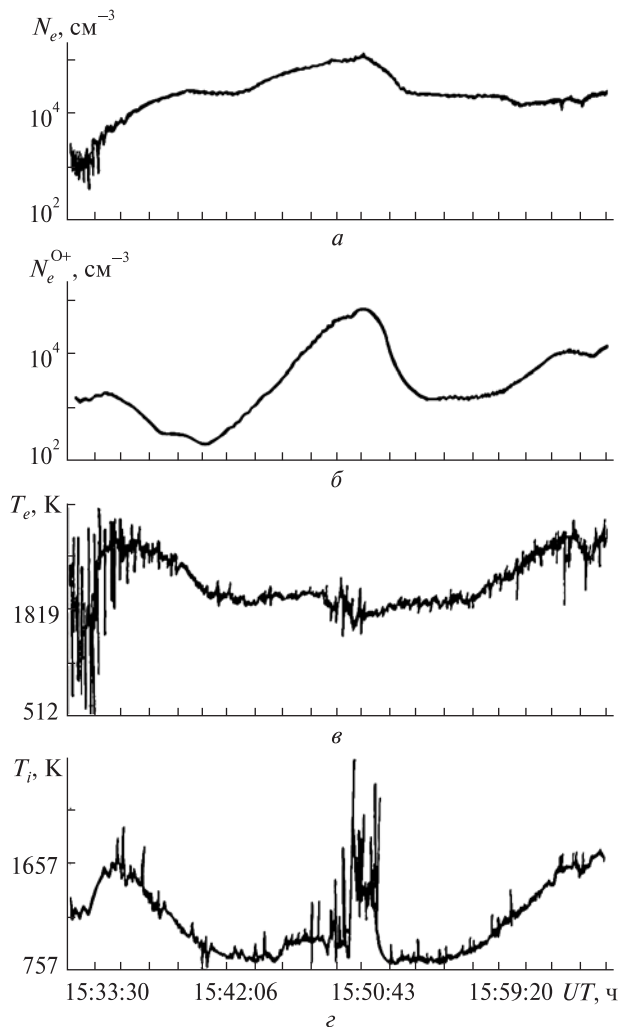


Рис. 9. Распределения параметров плазмы, измеренные на КА DEMETER 28 марта 2005 г. по данным [25]

максимуму температуры нейтралов T_n в ионосфере должен соответствовать максимум температуры ионов T_i с погрешностью до 10 %. В выражении (11) для атомарного кислорода в ионосфере

$$\delta_{in} = \frac{8}{3} \frac{M_i M_n}{(M_i + M_n)^2} \left(1 - \frac{T_n}{T_i} \right),$$

$$v_{in} = N_n \sigma_{in} \sqrt{\frac{8k}{\pi M_n} (T_i + T_n)},$$

$$v_{ei} = 3.7 N_i \ln \Lambda / T_e^{3/2},$$

где $\delta_{en} = \delta_{en}(T_e)$ — средняя доля энергии, теряе-

мой при соударении электронов и ионов с нейтралами, значения $\delta_{en}(T_e)$ приведены в работах [13, 15, 16, 19, 24], ν_{ei} — частота соударений для пар «ион-нейтрал» и «электрон-ион», $\ln \Lambda$ — кулоновский логарифм [15], σ_{in} — эффективное сечение для соударений ионов и нейтралов.

Вывод о том, что максимумы распределений концентраций $N_{i,e}$ заряженных частиц (ионов и электронов) и температуры $T_{i,n}$ тяжелых частиц (ионов и нейтралов) могут быть использованы для идентификации эпицентров землетрясений, согласуется с результатами зондовых измерений параметров ионосферной плазмы 28 марта 2005 г. на КА DEMETER [25]. На рис. 9 приведены вариации N_e и T_e , измеренные одиночным цилиндрическим зондом Ленгмюра (ISL), а также $N_i^{O^+}$ и T_p , измеренные анализатором ионов тепловой плазмы, согласно данным [25]. Максимумы возмущений на пространственно-временных распределениях ионов и электронов, измеренные на высоте 700 км, соответствуют эпицентру землетрясения на о. Суматра с магнитудой $M = 8.6$ при $UT = 15:50$ [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана процедура идентификации флуктуаций пространственно-временных распределений параметров нейтральных и заряженных частиц, измеренных зондовыми методами и средствами в ионосферной плазме на КА «Сич-2».

По результатам зондовых измерений возмущений параметров ионосферной плазмы на КА «Сич-2» и КА DEMETER показано, что максимумы распределений концентрации заряженных частиц (электронов и ионов) и температуры тяжелых частиц (ионов и нейтралов) могут быть использованы, с учетом динамики подспутниковой точки, для идентификации локализации южного (дневного) и северного (ночного) авроральных пиков в полярной ионосфере, а также для идентификации извержений вулканов, локализации эпицентров произошедших к моменту пролета КА, происходящих в момент пролета КА и зарождающихся землетрясений.

1. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. — М.: Наука, 1972. — 563 с.

2. Боярчук К. А., Ораевский В. Н., Пулинец С. А. и др. Система малых спутников для прогнозирования землетрясений // Космонавтика и ракетостроение. — 2002. — № 1 (26). — С. 43—50.
3. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 528 с.
4. Гохберг М. Б., Лапшин М. Н., Стеблов Г. М., Шалимов С. Л. Ионосферный отклик на подводные Курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS // Исслед. Земли из космоса. — 2011. — № 1. — С. 30—38.
5. Губский В. Ф. Влияние магнитного поля на измерения концентрации и температуры электронов цилиндрическими зондами в ионосфере Земли // Солнечно-земная физика. — 2008. — 1, вып. 12. — С. 261—269.
6. Гуревич А. В., Шварцбург А. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 272 с.
7. Короновский Н. В., Абрамов В. А. Землетрясения: причины, последствия, прогноз // Соросовский образовательный журн. Науки о Земле. — 1988. — № 12. — С. 71—78.
8. Кошмаров Ю. А., Рыжов Ю. А., Свищевский С. Б. Экспериментальные методы в механике разреженных газов. — М.: Машиностроение, 1981. — 200 с.
9. Кринберг И. А. Кинетика электронов в ионосфере и магнитосфере Земли. — М.: Наука, 1978. — 215 с.
10. Кузнецов В. Д., Ораевский В. Н. «Полярно-эклиптический патруль» для исследования Солнца и контроля космической погоды // Космонавтика и ракетостроение. — 2002. — № 1 (26). — С. 51—59.
11. Курт В. Г., Зайдель Р. М. Геофизические исследования космологического происхождения космических гамма-всплесков // Космич. исследования. — 1996. — 34, № 4. — С. 400—406.
12. Лазарев В. И., Тельцов М. В., Школьников С. И. Пространственное распределение и динамика продольных токов во время магнитных возмущений по наблюдениям ИСЗ «Интеркосмос-Болгария-1300» // Космич. исследования. — 1998. — 26, № 4. — С. 604—613.
13. Мессис Т., Бархон Е. Электронные и ионные столкновения. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959. — 567 с.
14. Павлов В. А. Воздействие землетрясений и извержений вулканов на ионосферную плазму // Изв. вузов. Радиофизика. — 1979. — 22, № 2. — С. 19—37.
15. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 592 с.
16. Саттон Дж., Шерман А. Основы технической магнитной газодинамики. — М.: Мир, 1968. — 402 с.
17. Сказик А. И. Определение положения источника акустико-гравитационной волны, находящейся вблизи земной поверхности по данным спутниковых

- измерений электронной концентрации в ионосфере // Радиолокационные исследования природных сред: Тр. 23 Всероссийского симп. (Санкт-Петербург). — 2005. — Вып. 5. — С. 455—459.
18. Фаткуллин М. Н., Солодовников Г. К., Можжаев А. А., Мигулин В. В. Флуктуации амплитуды радиоволн в ионосфере, вызванные землетрясением в Спитаке // Космич. исследования. — 1998. — **36**, № 4. — С. 387—390.
19. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. — М.: Мир, 1977. — 672 с.
20. Шотт Л. Электрические зонды // Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. — М.: Мир, 1971. — С. 459—495.
21. Шувалов В. А., Корепанов В. Е., Лукенюк А. А. и др. Моделирование зондовых измерений параметров околоспутниковой плазмы на КА «Сич-2» // Космична наука і технологія. — 2012. — **18**, № 6. — С. 5—13.
22. Шувалов В. А., Лукенюк А. А., Письменный Н. И., Кулагин С. Н. Зондовая диагностика околоспутниковой среды на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2013. — **19**, № 1. — С. 13—19.
23. 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. — № 4. — С. 98—100.
24. Энгель А. Ионизованные газы. — М.: Физматгиз, 1959. — 332 с.
25. Lebreton J. P., Stverak S., Travnicek P., et al. The ISL Langmuire probe experiment processing on board Demeter: Scientific objectives, description and first results // Planetary and Space Sci. — 2006. — N 54. — P. 472—486.
26. Rubinstein J., Laframboise J. G. Upper-bond current to a cylindrical probe in a collisionless magnetoplasma // Phys. Fluids. — 1978. — **21**, N 9. — P. 1655—1656.
- Стаття надійшла до редакції 25.06.13*
- В. О. Шувалов, Д. М. Лазуценков,
С. В. Носиков, Г. С. Кочубей
- ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ ЗА ЗОНДОВИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ ЗБУРЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ НА КА «СІЧ-2»**
- Розроблено процедуру ідентифікації флуктуацій просторово-часового розподілу нейтральних і заряджених часток за зондовими вимірюваннями науковою апаратурою ІТМ на КА «Січ-2». Визначено локалізацію вивержень вулканів, епіцентрів землетрусів, що зароджуються та відбуваються на підсупутниковій трасі КА, а також локалізацію південного і північного авроральних піків у іоносфері Землі.
- В. А. Shuvalov, D. N. Lazuchenkov,
S. V. Nosikov, G. S. Kochubey
- IDENTIFICATION OF EARTHQUAKES WITH THE USE OF SICH-2 PROBE MEASUREMENTS OF IONOSPHERIC PLASMA PERTURBATIONS**
- We developed a procedure for the identification of perturbations of the spatial-temporal distribution for neutral and charged particles on the basis of probe measurements with the use of ITM scientific equipment aboard the spacecraft “Sich-2”. The locations of volcano eruptions and epicenters of the earthquakes on the subsatellite path as well as the location of the North and South auroral peaks in the Earth’s ionosphere are determined.