

---

# **АППАРАТУРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ НЕЙТРАЛЬНОГО И ЗАРЯЖЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЕКТЕ «ИОНОСАТ-МИКРО»**

С.Н. КУЛАГИН, Н.И. ПИСЬМЕННЫЙ, Н.А.ТОКМАК, А.Г. ЦОКУР

---

Изменения состояния ионосферы являются индикатором, реагирующим как на воздействия «сверху» (Солнце, гелиосферные возмущения), так и воздействия «снизу» (процессы в Земле и на её поверхности). При этом ионосфера реагирует на воздействие «сверху», как правило, постфактум (с опозданием), а на воздействия «снизу» (скажем, землетрясения) может реагировать с опережением. Это обстоятельство целесообразно использовать для прогнозирования пространственно-временной локализации природных и техногенных катастрофических явлений. Флуктуации электрических и магнитных полей, основных кинетических параметров нейтрального и заряженных компонентов, развитие неустойчивостей в ионосферной плазме могут служить предвестниками землетрясений, извержений вулканов, торнадо, песчаных бурь и прочих катаклизмов [1–3]. Для мониторинга и регистрации флуктуаций основных кинетических параметров, как предвестников катастрофических явлений, их локализации могут быть использованы диагностические средства, и, прежде всего, средства контактной диагностики на орбитальных космических платформах [4–9].

Состояние ионосферной плазмы, ее нейтрального и заряженных компонентов характеризуется основными кинетическими параметрами, такими, как температуры электронов  $T_e$ , ионов  $T_i$  и нейтралов  $T_n$ , концентрации нейтральных  $N_n$  и заряженных частиц  $N_{i,e}$  (ионов и электронов), степени неизотермичности  $T_e / T_i$ , ионизации  $\varepsilon_i = N_i / (N_i + N_n)$  и потенциал пространства (плазмы)  $\phi_0$ . Для диагностики плазмы низкой плотности в ионосфере обычно используются зондовые методы. При этом зондовые методы диагностики потоков разреженной неизотермической плазмы в лабораторных условиях и в ионосфере при давлениях ниже, чем  $10^{-2}$  Па не замкнуты: вольтамперные характеристики (ВАХ) электрических зондов не позволяют определить параметры тяжелых частиц — ионов и нейтралов плазмы.

С целью повышения информативности зондовых методов при диагностике неизотермической плазмы низкой плотности в ионосфере в состав комплекса научной аппаратуры КА «Сич-2» (запущен 17.08.2011 г. на гелиосинхронную орбиту высотой 700 км и наклоном  $98^\circ$ ) включены две зондовые системы, разработанные и изготовленные в Институте технической механики (ИТМ):

1. Датчик электронных компонентов плазмы (ЭКП) — 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 вектору скорости  $\vec{U}_\infty$  полета КА.

2. Датчик нейтральных компонентов плазмы (НКП), состоящий из двух зондов давления с инверсно-магнетронными преобразователями (ИМП) в качестве чувствительных элементов. Нормали к апертурам входных отверстий ИМП взаимно-ортогональны. При измерениях нормаль к апертуре входного отверстия первого датчика ИМП  $\vec{n}_1$  должна быть параллельна вектору скорости  $\vec{U}_\infty$  полета КА ( $\theta_1 = 0$ ), а нормаль  $\vec{n}_2$  к апертуре второго датчика ИМП — перпендикулярна вектору скорости  $\vec{U}_\infty$  ( $\theta_2 = \pi/2$ ). Углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — между нормалью  $\vec{n}_{1,2}$  и вектором скорости полета КА.

Применение датчиков на КА «Сич-2» с использованием разработанных теории, процедур, анализа и обработки выходных сигналов приборов [10, 11] позволили замкнуть задачу диагностики неравновесной разреженной плазмы и определить полный комплекс локальных значений основных кинетических параметров, характеризующих состояние околоспутниковой среды [12—14].

При решении задачи научно-технического обеспечения диагностики ионосферной плазмы в проекте «Ионосат-Микро» в ИТМ были учтены некоторые сложности, возникшие при эксплуатации аппаратуры на КА «Сич-2» и анализе, интерпретации выходных сигналов приборов.

С учетом этих обстоятельств в ИТМ для проекта «Ионосат-Микро» на базе датчиков НКП и ЭКП разработаны и изготовлены усовершенствованные приборы для диагностики нейтральных (детектор DN) и заряженных частиц (детектор DE, состоящий из двух взаимно-перпендикулярных зондов Ленгмюра).

На рис. 1, а и 1, б (см. на цветной вкладке) показаны изготовленные в ИТМ в рамках проекта «Ионосат-Микро» приборы. Детектор DN показан с блоком электроники, изготовленным Львовским центром ИКИ НАНУ и ГКАУ.

Для повышения чувствительности детектора DN по сравнению с датчиком НКП улучшены параметры разряда в ионизационной камере ИМП, минимизировано влияние технологических факторов, ухудшающих параметры разряда, таких как стабильность, амплитуды выходных сигналов (ток, напряжение и пр.), уменьшено влияние газовыделения на ток разряда; упрощена конструкция, значительно уменьшены габаритные размеры и вес, улучшены магнитные характеристики, повышена прочность и надежность узла крепления магнитной системы.

Выходными сигналами детектора DN являются:

- ток газового разряда ИМП 1;
- ток газового разряда ИМП 2;
- температура корпуса ИМП 1;
- температура корпуса ИМП 2.



Диапазон тока газового разряда каждого из инверсно-магнетронных преобразователей датчика DN составляет от  $10^{-10}$  А до  $10^{-4}$  А. Диапазон изменения температур корпуса составляет от минус 80 до плюс 80 °С. Детектор DN управляется высоковольтным модулем питания с выходным напряжением постоянного тока от 500 до 4000 В.

Рабочий диапазон детектора DN:

- температура нейтралов  $5 \cdot 10^2 \leq T_n \leq 3 \cdot 10^3$  К;
- концентрация нейтралов  $10^4 \leq N_n \leq 10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

Массогабаритные характеристики детектора DN приведены в таблице 1 (для сравнения приведены характеристики датчика НКП).

Технические характеристики детектора DN приведены в таблице 2.

Детектор DE конструктивно включает два взаимно-ортогональных цилиндрических электрических зонда, каждый из которых состоит из измерительного и охранного электродов. Такая компоновка детектора DE позволяет в процессе эксплуатации определять по выходным сигналам ориентацию зондов относительно вектора скорости набегающего потока (полета КА).

Диапазон синхронного изменения потенциала измерительного и охранного электродов детектора DE составляет минус 15 — плюс 15 В относительно корпуса КА. Величина постоянного тока в цепи «измерительный электрод —

Таблица 1

Массогабаритные характеристики детектора DN и датчика НКП

Наименование составной части	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Детектор DN (с блоком электроники, но без учета кабельной группы)	117 × 100 × 100	1,264
Датчик НКП (без учета кабельной группы)	134 × 130 × 100	2,2

Таблица 2

Основные технические данные детектор DN

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон тока каждого из ИМП при изменении давления от $5 \cdot 10^{-3}$ до $10^{-7}$ Па в газовой среде, А	$10^{-10}—10^{-4}$
Рабочее напряжение постоянного тока, В	4,6
Величина нескомпенсированного магнитного момента, А · м <sup>2</sup>	0,02
Посадочная плоскость, мм	70,0 × 96,0

Примечание. Величина нескомпенсированного магнитного момента датчика НКП составила 0,12 А · м<sup>2</sup>

Таблица 3

**Массогабаритные характеристики детектора DE**

Наименование составной части	Габаритные размеры, мм, не более	Масса, кг, не более
Детектор DE, состоящий из двух взаимно-перпендикулярных электрических зондов (без учета кабельной части)	$245 \times 245 \times 35$	0,055
Габаритные размеры каждого из электрических зондов без учета кабельной группы, мм:		
— диаметр;	$35,0 \pm 0,2$	
— длина, не более	$245,0 \pm 0,5$	
Масса прибора (каждого из электрических зондов), г	$27,5 \pm 1,0$	

Таблица 4

**Основные технические данные детектора DE**

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон изменения потенциала электрода зонда, В	От минус 15 до плюс 15
Постоянный ток в цепи «измерительный электрод — корпус КА»:	
— при плюс 15 В, не более, мкА	30,0
— при минус 15 В, не более, мкА	1,0
Постоянный ток в цепи «охранный электрод — корпус КА»:	
— при плюс 15 В, не более, мкА	100,0
— при минус 15 В, не более, мкА	5,0

корпус КА» при изменении потенциала измерительного электрода от минус 15 до плюс 15 В ограничена диапазоном от  $10^{-10}$  до  $10^{-4}$  А.

Рабочий диапазон детектора DE:

- зондовый ток  $10^{-10} \leq I_p \leq 10^{-4}$  А;
- температура электронов  $10^3 \leq T_e \leq 10^4$  К;
- температура ионов  $5 \cdot 10^2 \leq T_i \leq 5 \cdot 10^3$  К;
- концентрация ионов и электронов  $10^2 \leq N_{i,e} \leq 10^8$  см<sup>-3</sup>.

Массогабаритные характеристики детектора DE приведены в таблице 3.

Технические характеристики детектора DE приведены в таблице 4.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Лазарев В.И., Тельцов М.В., Школьников С.И. Пространственное распределение и динамика продольных токов во время магнитных возмущений по наблюдениям на ИСЗ «Интеркосмос—Болгария—1300» // Космические исследования. — 1988. — Т. 26, № 4. — С. 604—613.

2. Николаева Н.С., Дубинин Э.М., Израйлевич П.Л., Подгорный И.М. Связь между электрическим полем и продольными потоками по данным спутника «Интеркосмос–Болгария–1300» // Космические исследования. — 1988. — Т. 26, № 3. — С. 463–467.
3. Курт В.Г., Зайдель Р.М. Геофизические исследования космологического происхождения космических гамма–всплесков // Космические исследования. — 1996. — Т. 34, № 4. — С. 400–406.
4. Горбехт М.Б., Лапшин М.Н., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. Ионосферный отклик на подводные Курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS // Исследования Земли из космоса. — 2011. — № 1. — С. 30–38.
5. Сказик А.И. Определение положения источника акустико–гравитационной волны, находящегося вблизи земной поверхности по данным спутниковых измерений электронной концентрации в ионосфере // Труды 23 Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». — Санкт-Петербург, 2005. — Вып. 5. — С. 455–459.
6. Фаткулин М.Н., Солодовников Г.К., Можаяев А.А., Мигулин В.В. Флуктуации амплитуды радиоволн в ионосфере, вызванные землетрясением в Спитаке. // Космические исследования. — 1998. — Т. 36, № 4. — С. 387–390.
7. Боярчук К.А., Ораевский В.Н., Пулинец С.А., Ружин Ю.Я., Хегай В.В. Система малых спутников для прогнозирования землетрясений // Космонавтика и ракетостроение. — 2002. — № 1 (26). — С. 50–59.
8. Кузнецов В.Д., Ораевский В.Н. «Полярно–эклиптический патруль» для исследования Солнца и контроля космической погоды // Космонавтика и ракетостроение. — 2002. — № 1 (26). — С. 50–59.
9. Jebreton J.P., Sverak S., Travnicek P., Maksimovic M., et al. The ISJ Langmuir probe experiment processing on board Demeter: Scientific objectives, description and first results. // Planetary and Space Science. — 2006. — № 54. — P. 472–486.
10. Шувалов В.А., Кочубей Г.С., Приймак А.И., Резниченко Н.П., Токмак Н.А., Лазученков Д.Н. Контактная диагностика высокоскоростных потоков разреженной плазмы // Теплофизика высоких температур. — 2005. — Т. 43, № 2. — С. 1–9.
11. Шувалов В.А., Письменный Н.И., Приймак А.И., Кочубей Г.С. Зондовая диагностика высокоскоростных потоков разреженной частично диссоциированной плазмы // Приборы и техника эксперимента. — 2007. — № 2. — С. 1–9.
12. Шувалов В.А., Корепанов В.Е., Лукенюк А.А., Токмак Н.А., Кочубей Г.С. Моделирование зондовых измерений параметров околоспутниковой плазмы на КА «Сич-2» // Космічна наука і технологія. — 2012. — Т. 18, № 6. — С. 5–13.
13. 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. — Т. 19, № 1. — С. 13–19.
14. Шувалов В.А., Письменный Н.И., Лазученков Д.Н., Кочубей Г.С. Зондовая диагностика потоков лабораторной и ионосферной разреженной плазмы // Приборы и техника эксперимента. — 2013 — № 3. — (в печати).