

УДК 621.384.8:541.12.011.4.082/084:621.039:534

**Мас-спектрометричні  
верхньої атмосфери і молекулярного  
космічних апаратів бортовими оточення  
СКТБ ФТІНТ НАН приладами України**

**Л. Л. Солодовник**

Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з кріогенної техніки  
Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

*Надійшла до редакції 29.03.99*

Проведено огляд серії бортових мас-спектрометрических приладів для дослідження верхньої атмосфери Землі і Венери, молекулярного оточення космічних апаратів. Розглядаються фізичні особливості роботи бортових мас-спектрометрів, їхні основні аналітичні та технічні характеристики, хід і результати натурних експериментів. Вивчені дані зондування Д-області юносфері на висотах менше 100 км з метеорологічних ракет МР-12, вимірювання хімічного складу підхмарного прошарку атмосфери Венери із спускних апаратів «Венера-9» і «Венера-10». Зроблено аналіз даних технологічних експериментів з визначення складу та динаміки молекулярного оточення ШСЗ серії «Космос».

Інтенсивний розвиток космічної техніки 1960—1970-х рр. відкрив перед науковцями нові горизонти для безпосередніх досліджень верхньої атмосфери Землі та інших планет, відкритого космічного простору і натурних технологічних експериментів. Ці можливості не вдавалося реалізувати без розвитку нового напрямку техніки — спеціального бортового приладобудування, яке повинно було задовільнити досить специфічні вимоги галузі: високу механічну стійкість, унікальні механічні характеристики, незначне енергоспоживання та жорсткі обмеження на масу та габарити [10]. Одним із напрямків спеціального приладобудування є мас-спектрометричні прилади. Саме мас-спектрометрія стала одним з найплідніших методів дослідження верхньої атмосфери Землі. Вже у перших експериментах наприкінці 1950-х років вдалося отримати цікаві результати з розподілу за висотою та добові варіації відносної та абсолютної іонної концентрації вище 100 км. За допомогою мас-спектрометрів (МС), розташованих на геофізичних ракетах, були відкриті суттєві деталі будови верхньої атмосфери:

наявність іонів металів та іонів кометного походження в області Е, наявність та роль іонів-зв'язок в області Д. Доки не було безпосередньо встановлено газовий склад верхньої атмосфери, неможливо було точно визначити її тиск та температуру, знайти рівень гравітаційного розподілу компонентів атмосфери, нижче якого атмосфера переміщана, а вище — має місце регулярний розподіл компонентів за висотою.

Залежно від наукової або практичної доцільності, типу носія і задачі конкретного експерименту вирішувалось питання типу і конструкції застосованого МС. Проте у світовій практиці домінуюче положення здобули радіочастотні динамічні МС, найчастіше квадрупольного або монопольного типу, що обумовлено оптимальним поєднанням високих аналітичних, масогабаритних та енергоспоживчих якостей.

Розроблений у 1969 р. у Спеціальному конструкторсько-технологічному бюро з кріогенної техніки ФТІНТ НАН України радіочастотний монопольний мас-спектрометр РОМС [4] став основою серії бортових приладів для вивчення верхньої атмосфери

Землі і Венери, молекулярного оточення космічних апаратів, а також взаємозв'язку між процесами у термосфері та літосфері планет.

Монопольний МС [11], який можна вважати модифікацією квадрупольного МС, побудовано на основі частини квадрупольної електростатичної лінз, яка живиться від генератора складного електричного струму (суперпозиція високочастотного і постійного компонентів у певному співвідношенні). Якщо паралельно до полеутворюючих електродів датчика інжектувати заряджену частку — іон, то під впливом складного електричного поля гіперболічної форми до зворотного кінця датчика дійуть іони лише з певним відношенням маси до заряду, а змінюючи параметри електричного поля, можна по черзі створювати умови для проходження іонів різних елементів (це так званий діапазон

аналізованих масових чисел). Для застосування в умовах ракетно-космічної техніки була розроблена відповідна конструкція датчика, пристосована до значних механічних навантажень, і блок електроніки на напівпровідниковій основі [17]. Проте для функціонування МС необхідно забезпечити високий вакуум на рівні  $10^{-4} \dots 10^{-7}$  тор. Цю проблему було вирішено шляхом застосування високопродуктивного кріосорбційного насоса на рідкому азоті [15].

Монопольний радіочастотний МС РОМС-3 з кріосорбційним насосом на рідкому азоті [3] було використано для серії геофізичних експериментів з вивчення верхньої атмосфери Землі, які були проведені разом з Центральною аерологічною обсерваторією гідрометцентр у 1972 р. Прилад мав відкрите джерело іонів з іонізацією електронним ударом, який було винесено за вакуумний об'єм таким чином, щоб набігаючий потік атмосфери, потрапляючи до зони іонізації, не мав контактів з елементами конструкції. РОМС-3 (див. рис. 1) складається з джерела іонів 1, розкриваючого пристрою 2, кріосорбційного насоса 3, аналізатора 4, патрубків для заливання та випарювання рідкого азоту 9, які проходять крізь кришку люка 10 у герметичний приладовий контейнер, вторинного електронного помножувача 5 жалюзійного типу ВЕП-1Б. Іони, інжектовані в аналізатор, проходять через діафрагму Д.

Основні аналітичні та технічні характеристики РОМС-3 приведені в табл. 1. Однієї заправки рідким азотом достатньо для години роботи.

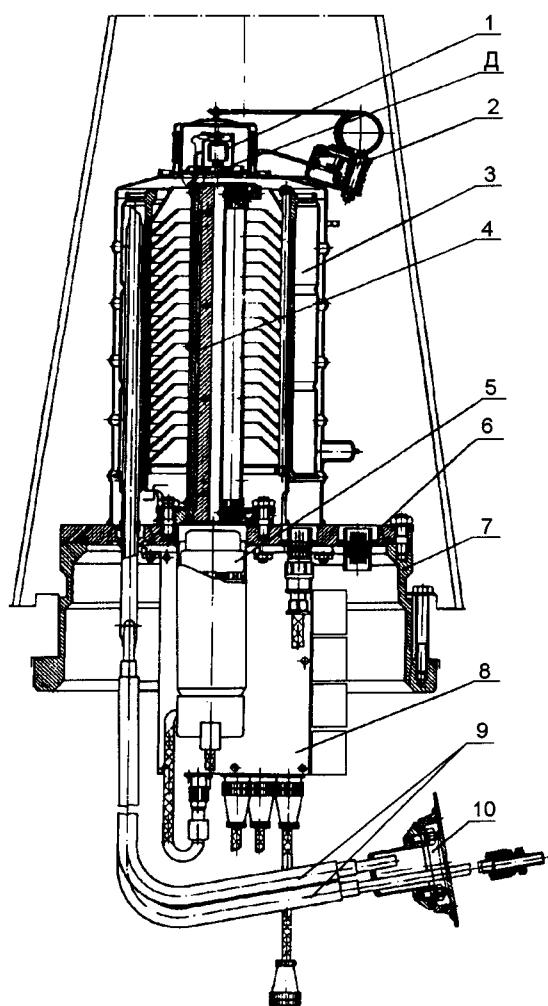


Рис. 1. Схематичне зображення датчика МС

Таблиця 1. Технічні характеристики МС для космічних досліджень розробки СКТБ з КТ ФІНТ НАНУ

Параметри	РОМС-3	РОМС-5	РОМС-6	Р-8	Р-11
Об'єкт аналізу	Нейтрони	Нейтрони	Нейтрони та іони	Нейтрони та іони	Нейтрони та іони
Діапазон аналізованих масових чисел, а.о.м.	1...60	10...55	1...50; 1...100	1...150	1...200
Швидкість розгортки спектру мас, а.о.м./с	1.4	1.0	1.5 i 15 3 i 30	2±0.5	0.4
Роздільна здатність на рівні 10 % амплітудного значення, $\Delta M/M$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$	$\leq 1$
Наявність засобів відкачування	Насос рідкому азоті	Магніто-розрядний насос	—	—	—
Маса, кг	12	9.5	6.6	1.5	8

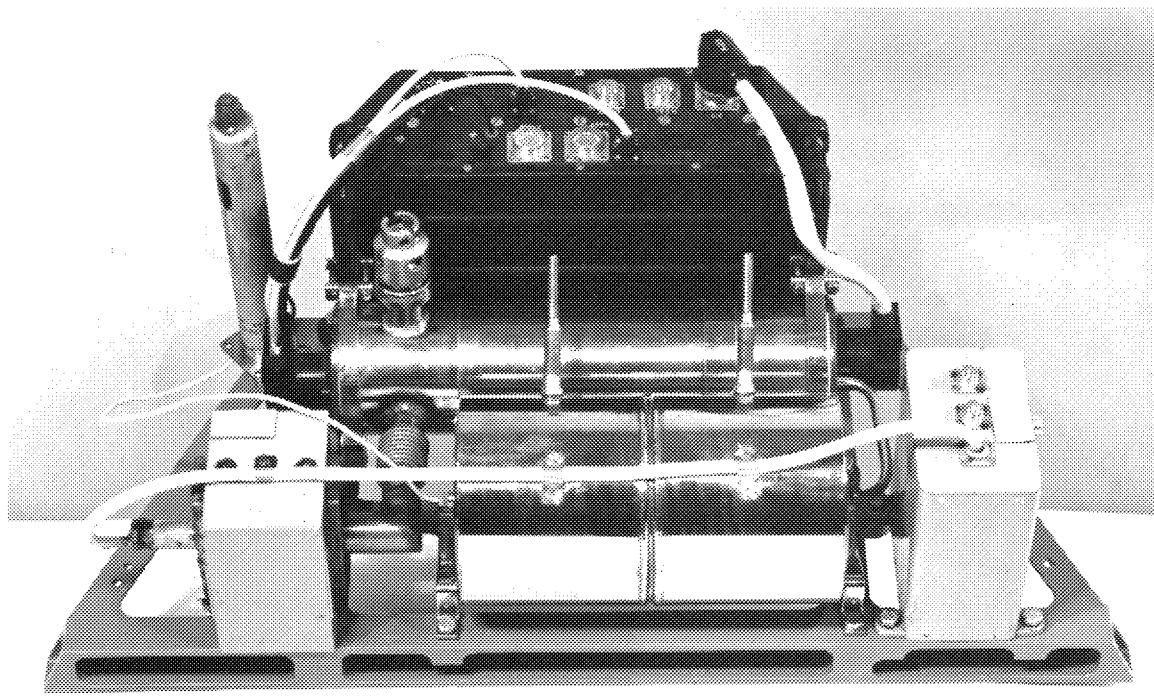


Рис. 2. Загальний вигляд мас-спектрометра РОМС-5

Одночасно з інтенсивними безпосередніми вимірюваннями при вивчені верхньої атмосфери Землі проводилися дослідження планетних атмосфер, зокрема Венери. Непрямими методами атмосфера Венери вивчалась кілька десятиліть. Було встановлено існування в надхмарному прошарку атмосфери малих складових HCl, HF, CO та деяких інших компонентів. Газоаналізаторами, встановленими на автоматичних станціях «Венера-4», «Венера-5», «Венера-6», «Венера-8», було виявлено рівень основного компонента атмосфери — вуглециклого газу, виміряні порогові значення концентрацій кисню та азоту, зафіксовані вода та аміак у хмарному та підхмарному прошарку атмосфери. Для отримання даних про вертикальний профіль хімічного складу атмосфери Венери на апаратах «Венера-9» та «Венера-10» було встановлено більш інформативні МС-прилади РОМС-5.

Загальний вигляд розробленого у ФТІНТ НАНУ мас-спектрометра РОМС-5 показано на рис. 2. Аналітична частина МС складається з пристрою для відбору атмосферного газу, системи подачі газової суміші в джерело іонів, датчика МС, магніторозрядного насоса, блоку живлення датчика та обробки інформації та високовольтного джерела живлення вакуумного насоса. Всі складові частини приладу, за винятком пробовідбірника, було розміщено на монтажній плиті в герметичному відсіку

для наукової апаратури. Пробовідбірник було винесено за межі гермовідсіку і розміщено в зоні з найменшим впливом десорбційних процесів з поверхні апарату.

Пробовідбірник під час космічного перельоту станцій до Венери було герметизовано скляним ковпачком, котрий руйнувався спеціальним пристроєм під час початку вимірювань. Для обмеження потоку газу до системи натікання було застосовано губчастий натікач. Система натікання забезпечує надходження до джерела іонів такої кількості газів, при якій залишається робочий вакуум в аналізаторі (тиск не більше  $5 \cdot 10^{-5}$  тор) при зміні тиску на вході в пробовідбірник від 0.1 до 10.0 атм. Датчик МС РОМС-5 має деякі суттєві особливості. Він складається з монопольного фільтра мас; вторинно-електронного помножувача і джерела іонів, складених на одному жорсткому каркасі і розташованих в тонкостінному герметичному корпусі. Джерело іонів має оригінальну конструкцію [2], підвищену світосилу та надійність. Застосований детектор — вторинно-електронний помножувач каналового типу — мав коефіцієнт підсилення  $10^6$ . За весь час польоту від Землі до Венери та під час спуску в атмосфері вакуум у зоні датчика МС підтримувався за допомогою магніторозрядного насоса зі швидкістю відкачування по азоту при тиску  $10^{-4}$  тор не менше 4 л/с. На обох станціях МС було включено

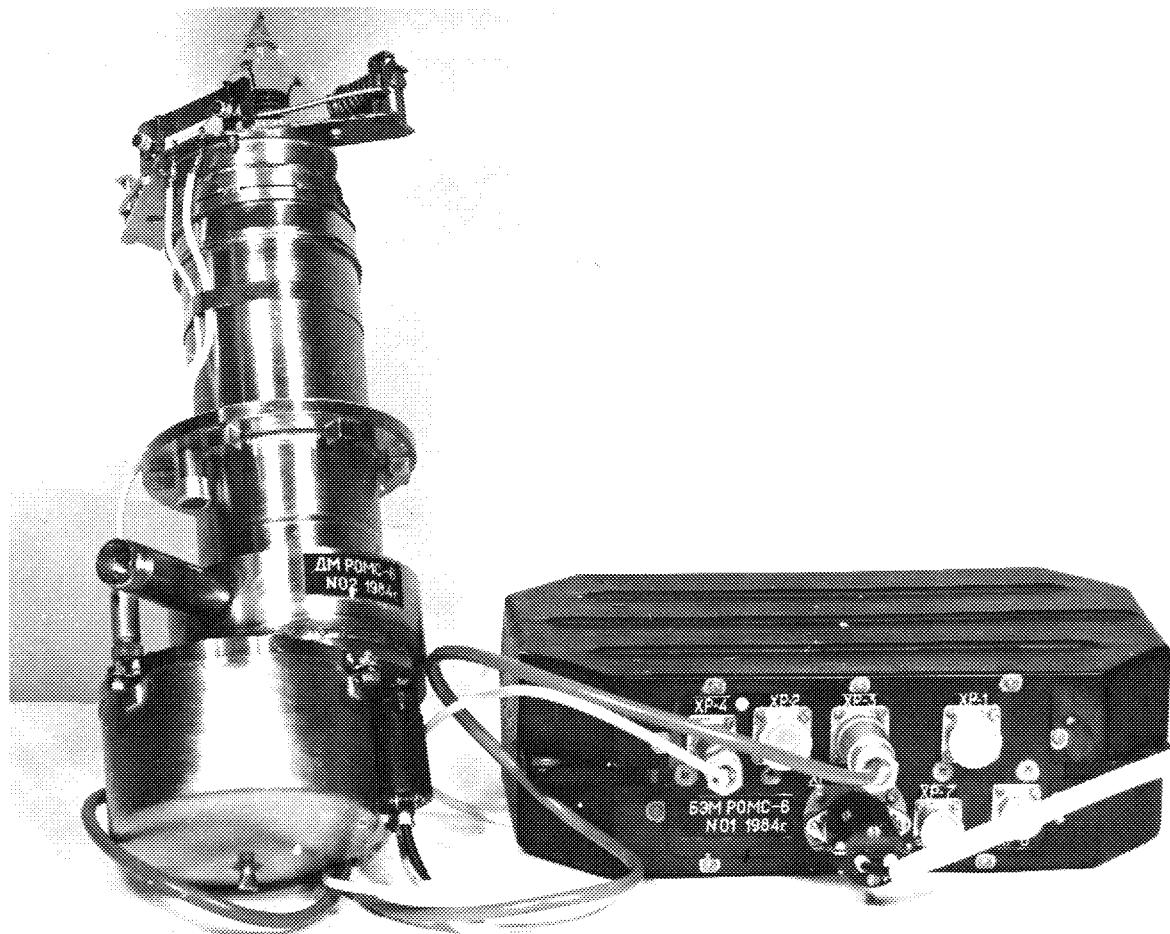


Рис. 3. Зовнішній вигляд мас-спектрометра РОМС-6

на висоті 63 км над поверхнею планети. За час роботи було одержано близько 60 мас-спектрів, а передані з борту станцій контролльні параметри свідчили про нормальну роботу приладів. Одержані важливі дані про хімічний склад атмосфери Венери, зокрема визначено вміст азоту, верхню межу вмісту аміаку, а токож простежено динаміку змін вмісту її компонентів з висотою [16]. Вперше було виявлено вміст з'єднань сірки у підхмарному прошарку.

Функціональні можливості МС-приладів щодо реєстрації та аналізу парціального складу іонізованих часток було розширене при розробці експериментів з дослідження верхніх шарів атмосфери Землі на орбітальних станціях «Мир» разом з Інститутом прикладної геофізики РАН. Розроблений для цих експериментів МС РОМС-6 було призначено для дослідження нейтрального та іонного складу верхньої атмосфери Землі у діапазоні

тиску  $10^{-5} \dots 10^{-8}$  тор. Основні технічні характеристики приладу РОМС-6 надані у табл. 1.

На рис. 3 показано зовнішній вигляд МС РОМС-6 з відкритим джерелом іонів. Прилад складається з двох функціонально пов'язаних частин: датчика та блоку електроніки, з'єднаних електричними кабелями, а також розкриваючого пристрою, який монтується на корпусі датчика. Для утримання приладу в робочому стані до експерименту датчик знаходиться у пасивному відкачаному стані і заповнений спеціальною газовою сумішшю при тиску  $10^{-6}$  тор, який гарантовано зберігається протягом 9 місяців. Це дає можливість постійно тестувати параметри МС.

Принциповим моментом є те, що оригінальна конструкція джерела іонів з іонізацією електронним ударом [1] дозволяє використовувати його в режимі збирання позитивних часток-іонів із навколошнього простору.

Технологічно датчик РОМС-6 став більш досконалою модифікацією попередніх конструкцій. Відпрацьована технологія попередньої обробки включає старанне очищенння деталей датчика, в т. ч. ультразвукове миття та відпаювання у середовищі водню та вакуумі. Зібраний датчик відкачується «безмасляним» насосом з кріогенною азотною пасткою при температурі 200...220 °C (максимально допустима температура для помножувача вторинних іонів каналового типу ВЕП-6) протягом 24 годин. Безпосередньо перед відпаюванням при тиску не вище за  $10^{-7}$  тор проводилася активація гетера локальним нагріванням до 650 °C з одночасним відкачуванням. Для досягнення високих аналітичних параметрів було забезпеченено високу точність виготовлення та юстування полеутворюючих електродів датчика (клас обробки — не нижче 12-го, розмір щілини між електродами аналізатора — не більше за 0.01 мм по всій довжині). Розкриваючий пристрій приладу був скляним і мав механічну систему приводу [5].

Принципово новий прилад, що може розміщуватися у відкритому космічному просторі на зовнішній поверхні космічного апарату, було розроблено та виготовлено для проведення експериментів у верхній атмосфері Землі та технологічних дослідів на штучних супутниках серії «Космос». Ці експерименти започаткували фундаментальні дослідження молекулярного оточення космічних апаратів [8].

При переміщенні у навколоzemному та міжпланетному просторі фізичне тіло знаходиться у збуреному космічному вакуумі. Це збурення створюється особливим молекулярним оточенням космічного апарату, що виникає внаслідок змін властивостей середовища самим апаратом та різноманітних викидів із космічного апарату (за рахунок десорбції, сублімації, деструкції та ерозії матеріалів з негерметизованих поверхонь матеріалів, а також витікання газів та конденсату із гермовідсіків, продуктів функціонування двигунів). При цьому частина молекул і атомів цього оточення знаходиться в іонізованому стані, а частина твердофазних часток — у зарядженному. Характеристики молекулярного оточення залежать від конструкції та геометрії об'єкта, швидкості та умов, в яких він рухається, типу та технічних даних двигунів, номенклатури, якостей та кількості застосованих конструкційних матеріалів, особливостей функціонування об'єкта і т. і. Комплекс цих характеристик можна вважати своєрідною «дактилоскопічною» карткою космічного об'єкта. Збурення може бути настільки вагомим, що його доводиться враховувати навіть при аеродинамічних розрахунках траєкторії та періоду

обертання космічного апарату на перших витках навколо Землі. Проте основний вплив молекулярного оточення космічного об'єкта доводиться враховувати з огляду на ті негативні наслідки, які він має для самих конструкційних матеріалів космічного апарату, а також для контрольно-вимірювальної, радіотехнічної і оптичної техніки.

Таким чином, слід визнати, що забруднення елементів та обладнання космічних апаратів стало серйозною проблемою фізики та техніки космічних польотів, особливо коли мова йде про їхню тривалість у кілька десятків років.

Динамічна модель молекулярного оточення базується на припущеннях, що весь процес є класичним переміщенням мас в особливі специфічних умовах. Переміщення газоподібної пари забруднень формується головним чином вільномуолекулярними потоками від джерел на зовнішню поверхню космічного апарату. Вторинним механізмом переміщення є фотоіонізація молекул оточення з наступним відхиленням їх магнітними полями, зокрема магнітним полем Землі, та електростатичними полями космічного апарату (зокрема на його локальних зовнішніх діелектричних поверхнях).

Потоки забруднень складаються з таких компонентів: а) пряма сонячна фотоіонізація:  $M + h\nu \rightarrow M^+ + e$ , ( $M$  — атом чи молекула леткої сполуки;  $h\nu$  — енергія фотона; б) термічна іонізація пари при роботі двигунів; в) непряма сонячна фотоіонізація  $M + \Delta E \rightarrow M^*$ , фотозбудження чи термічне збудження пари при роботі двигунів, а потім  $M + h\nu \rightarrow M^+ + e$ , де  $M^*$  — збуджений стан атома чи молекули; г) електростатичний механізм зарядження продуктів роботи двигунів з причини їхнього тертя зі стінками сопел.

Сили, які діють на тверді та рідкі компоненти забруднень, виникають внаслідок взаємодії з оточенням. Ними можна знецтувати у порівнянні з газодинамічними силами. Механізм осідання часток газу на поверхню залежить від його тиску та коефіцієнта акомодації конкретного газу поверхнями космічного апарату. Осідання заряджених чи поляризованих часток молекулярного оточення на струмопровідні поверхні відрізняється від осідання на діелектричні поверхні через вплив електростатичних сил.

Взаємодія між захопленими частками та матеріалом поверхонь визначається хімічним зв'язком, а іноді навіть призводить до їхнього сплаву. При відсутності цього дуже сильного зв'язку є такі фізичні взаємодії, як дальнодіючі сили Ван-дер-Ваальса та електростатичні сили (чи подвійний прошарок). Ці сили сприяють захопленню твердих часток і в'язкій течії на поверхні, призводячи до

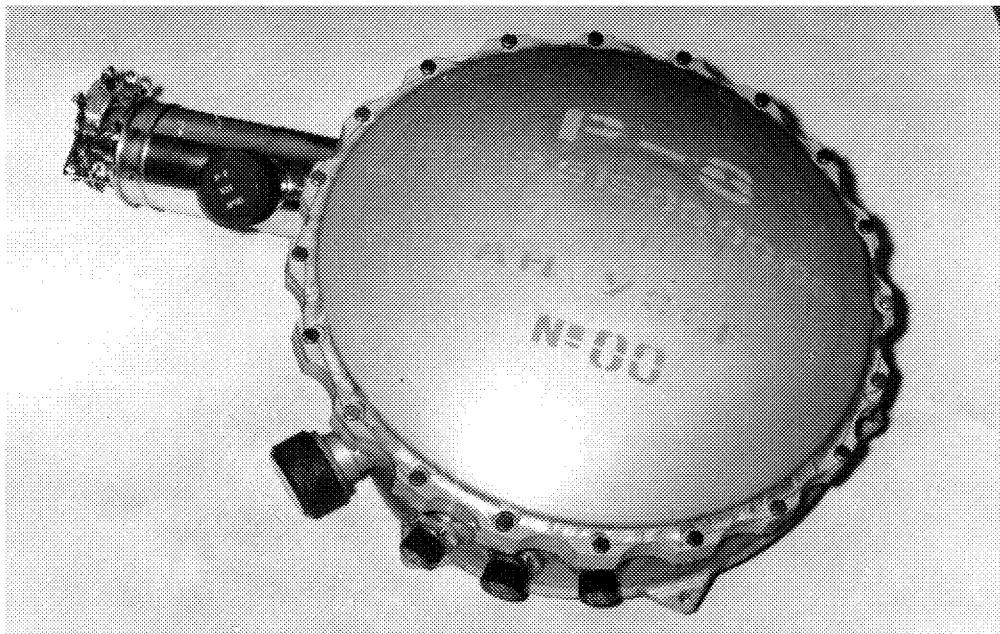


Рис. 4. Загальний вигляд МС Р-8

рівномірного розподілу по поверхні (двовимірний газ).

При цьому можна виділити три домінуючі фактори: прямі молекулярні потоки, зворотні потоки за рахунок зіткнень молекул від джерел забрудненіз навколошньою атмосферою та між собою, а також потоки, спричинені перевідбиванням від сусідніх елементів конструкції об'єкта [7]. З приведених вище причин натурні експерименти на серійних супутниках Землі «Космос-1643» і «Космос-2007» мали велику теоретичну та практичну цінність.

Акцент було зроблено на вивчення газодинамічної структури течії у місцях встановлення на супутниках мас-спектрометрів Р-8 та наступний аналіз із інтерпретацією даних цих експериментів. МС Р-8 (рис. 4) мали поліпшені аналітичні характеристики (табл. 1). Конструктивно прилад виконано у вигляді моноблоку, з якого виглядає датчик із розкриваючим пристроєм, який не має частин, що відокремлюються у процесі роботи. Відповідно до умов експериментів МС розташовувалися на зовнішній поверхні супутників і були спрямовані перпендикулярно до вектора швидкості руху в бік Землі.

Ці експерименти проходили в різних геофізичних умовах: перший під час мінімуму сонячної та геомагнітної активності, а другий — в умовах максимуму. Супутники функціонували на висотах 200...300 км над поверхнею Землі, що характеризуються таким станом верхньої атмосфери [13]: до

висоти приблизно 180 км зберігається основний компонент земної атмосфери — молекулярний азот. Вище превалює легший атомарний кисень, який виникає при дисоціації молекул кисню під дією УФ-випромінювання Сонця. На вищих орбітах атмосфера складається з найлегших газів: гелію та водню. Усі ці компоненти сильно залежать від температури екзосфери  $T_e$ : при мінімальній активності  $T_e = 500$ , а при максимальній —  $T_e = 1900$ . Вплив  $T_e$  на концентрацію гелію значно менший [13], ніж на концентрацію атомарного кисню та азоту (вдвічі та втрічі відповідно). На це слід звернути увагу, бо співвідношення легких та важких компонентів визначає середню молекулярну вагу часток верхньої атмосфери на розглянутій висоті. Саме ці варіації корелюють з бортовими вимірюваннями, які було зроблено на нижчих витках, коли вже закінчилося інтенсивне зневаження конструкційних матеріалів зовнішнього покриття, і потік часток верхньої атмосфери на вхідний отвір датчика мас-спектрометра став домінуючим.

Як було зазначено вище, одним з головних джерел формування молекулярного оточення космічних апаратів є продукти ранньої десорбції поверхні, що в свою чергу залежить від матеріалу покриття. Найінтенсивніше проходить втрата маси з поверхні на перших витках орбіти ( $\approx 10^{-5} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Проте вже через 100 годин цей темп уповільнюється до  $10^{-7} \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \text{s}^{-1}$  і може зрівнятися з тиском атмосфери Землі на висотах 200...300 км. На рис. 5 показана

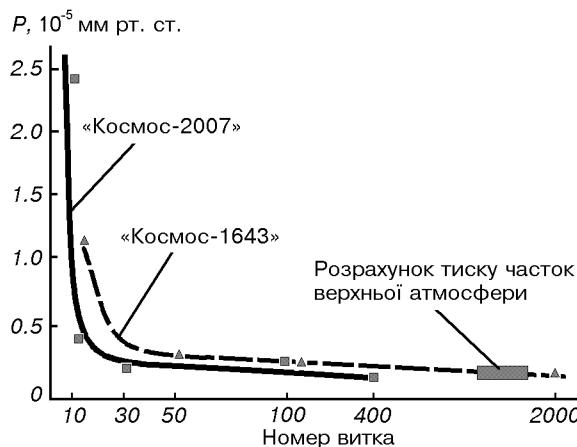


Рис. 5. Тиск у місці розміщення МС Р-8 на ШСЗ «Космос»

Таблиця 2. Усереднене значення масових чисел молекулярного оточення в зоні розташування МС Р-8 на ШСЗ

Засіб отримання інформації	«Космос-1643»		«Космос-2007»	
	Витки орбіти			
	17...50	50...2000	6...32	32...387
Значення масових чисел, а.о.м.				
Натурний експеримент	23...24	16	23...24	17
Чисельне моделювання	22...24.5	16...17	22...24.5	17...18

зміна тиску в місці розташування приладу на штучному супутнику Землі, виміряна під час двох експериментів, а також результати розрахунків тиску часток верхньої атмосфери на висоті 270 км. Аналіз мас-спектрограм, проведений за результатами двох експериментів [9], показав, що на перших витках (приблизно до 100) середнє значення масових чисел продуктів молекулярного оточення дорівнює 23...24 а. о. м. і зменшується до значення 16...18 а. о. м. на пізніших витках (табл. 2). У тій же таблиці наведені результати чисельного моделювання газодинамічних параметрів у зоні вхідного отвору аналізатора мас-спектрометра з наступним усередненням молекулярного складу. Обидва експерименти підтвердили, що основним компонентом верхньої атмосфери Землі на висотах  $H = 200\ldots 300$  км навколоземних орбіт є атомарний кисень, який чітко проявився в мас-спектрограмах обох експериментів.

Аналіз динаміки течії в області розташування МС

свідчить, що головними джерелами масопереносу у цій зоні ШСЗ «Космос» є прямі та відбиті від циліндричної і конічної частин корпусу супутника потоки часток верхньої атмосфери, а також потоки часток ранньої десорбції з тих же елементів корпусу.

Описані експерименти, кожен з яких тривав декілька місяців, вперше проводилися українськими дослідниками з використанням виготовлених в Україні приладів. Отримані дані збігаються з даними, отриманими американськими науковцями на аналогічних супутниках [6, 12].

Значний інтерес фахівців різних напрямів фундаментальних наук і практиків останнім часом викликає взаємодія процесів у літосфері та нижній термосфері (іоносфері) Землі, а саме — ефекти збурень іоносфери, пов’язані з сейсмічними явищами. Особлива увага звертається на іоносферні провісники землетрусів. Зараз вже обґрунтовано необхідність вивчення цих провісників та вказано на переваги космічних засобів при вимірюванні параметрів іоносфери, які можуть бути використані для побудови короткострокових прогнозів землетрусів в глобальній системі прогнозування сейсмічних явищ [14]. Одним з провісників є стан іонізованих часток верхньої атмосфери Землі. Міжнародний експеримент «Попередження», що готується у рамках державної космічної програми України, має зібрати відповідний статичний матеріал наукових даних, які дозволять відповісти на питання про можливість достовірного прогнозування сейсмічної активності цими методами. До складу комплексу наукової апаратури, що планується використати у ході довгострокового експерименту, входить мас-спектрометр Р-11. Цей прилад здатний аналізувати як нейтральний, так й іонізований компонент верхньої атмосфери Землі, він відповідає усім вимогам щодо роботи апаратури вимірювального комплексу в умовах відкритого космічного простору. Його основні параметри наведені у підсумковій порівняльній таблиці мас-спектрометрів розробки СКТБ ФТІНТ НАН України (табл. 1).

Наведені матеріали безумовно свідчать про значний науковий і технологічний доробок СКТБ ФТІНТ НАН України у галузі бортового мас-спектрометричного приладобудування, значний практичний досвід натурних експериментів, високий сучасний рівень обладнання.

Висловлюємо ширу подяку академіку В. В. Єрьоменку за підтримку та корисні дискусії.

1. А. с. 538629 СССР, МКИ<sup>2</sup> Н 01 Я 3/04 Ионный источник / Н. Н. Багров, Л. Л. Солодовник, В. Х. Тесленко. — № 2115908 с приор. от 21.03.75 г., зарег. 13.08.76.

2. А. с. 695446 СССР, МКИ<sup>2</sup> Н 01 Я 37/08 Ионный источник / Н. Н. Багров, В. Е Гальченко., Л. Л. Солововник. — № 2549535 с приор. от 02.12.77 г., зарег. 06.07.79 г.
3. Багров Н. Н., Веркин Б. И., Мартынкевич Г. М. и др. Однопольный масс-спектрометр с криосорбционной откачкой для анализа состава верхней атмосферы Земли // Криогенная и вакуумная техника.—1973.—Вып. 3.—С. 45—49.
4. Багров Н. Н., Гусляков А. А., Фурманский А. Г. Радиочастотный одномерный масс-спектрометр // Приборы и техника эксперим.—1969.—№ 4.—С. 136—139.
5. Багров Н. Н., Пилипенко А. П., Ярмак А. Д. и др. Радиочастотный однопольный масс-спектрометр РОМС-6. — Харьков, 1984.—14 с.—(Препринт / ФТИНТ АН УССР; № 37-84).
6. Барейсс Л. И. Метод расчета параметров собственной внешней атмосферы орбитальной станции «Спейслэб» // Ракетн. техн. и космонавтика.—1980.—18, № 2.—С. 97—108.
7. Басс В. П. Наблюдения искусственных спутников Земли // Набл. искусственных спутников Земли 1986.—№ 24.—С. 158—179.
8. Басс В. П., Бразинский В. И., Пилипенко А. П. и др. Постановка и реализация натурного эксперимента по исследованию процессов массопереноса в окрестностях ИСЗ серии «Космос» // Механика жидкостей и газа: Сб. докл. междунар. школы-семинара ЦАГИ. 25.02.93 г.—01.03.93 г. — М., 1994.—Ч. 5.—С. 8.1—8.17.
9. Басс В. П., Солововник Л. Л., Ярмак А. Д. Результаты натурных экспериментов по исследованию параметров внешней атмосферы ИСЗ «Космос-1643» и «Космос-2007» // Тр. II-го Российско-Китайского симпозиума по космической науке и технике. Россия, Самара, 30 июня—4 июля 1992. — Самара, 1992.—С. 183—184.
10. Бондаренко С. И., Кислов А. М. Криогенная техника в космических исследованиях: разработки ФТИНТ НАН Украины // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 80—96.
11. Джейрам Р. Масс-спектрометрия: Теория и приложения. — М.: Мир, 1969.—252 с.
12. Кейзер Д. К., Чэттер У. Т., Чауз К. К. и др. Спектрометр для определения состава верхней атмосферы // Аэрокосмическая техника.—1987.—№ 8.—С. 83—90.
13. Келдыш М. В., Маров М. Я. Космические исследования. — М.: Наука, 1981.—192 с.
14. Коцаренко М. Я., Корепанов В. С., Івченко В. М. Дослідження іоносферних провісників землетрусів (експеримент «Попередження») // Космічна наука і технологія.—1995.—1, № 1.—С. 96—100.
15. Пилипенко А. П., Багров Н. Н. Криосорбционный насос геофизического масс-спектрометра РОМС-3 // Криогенная и вакуумная техника.—1973.—Вып. 3.—С. 55—57.
16. Сурков Ю. А., Иванова В. Ф., Веркин Б. И. и др. Масс-спектрометрические исследования атмосферы Венеры на АМС «Венера-9» и «Венера-10» // Геохимия.—1978.—№ 4.—С. 506—513.
17. Тесленко В. Х., Багров Н. Н. Транзисторный генератор высокой частоты для однопольного масс-спектрометра // Приборы и техника эксперим.—1973.—№ 1.—С. 135—136.

---

**MASS SPECTROMETRY OF THE UPPER  
ATMOSPHERE AND MOLECULAR SURROUNDING  
OF SPACECRAFT BY ON-BOARD SRDB ILTPh&E  
INSTRUMENTS**

L. L. Solodovnik

A series of on-board mass spectrometers designed at the Special Research and Development Bureau of Institute for Low Temperature and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine (SRDB ILTPh&E) for the research of the Earth's and Venus's upper atmospheres and of molecular environment of spacecraft is described. We consider some peculiarities in the operation of the on-board mass-spectrometers, their basic analytical and technical characteristics, and some results of space experiments. The experiences on sounding the ionospheric D-region by meteorological MR-12 rocket at heights below 100 km and measuring the chemical composition of the layer under clouds in the Venusian atmosphere by the «Venera-9» and «Venera-10» modules landing is examined. The data obtained in the technological experiments on defining the composition and dynamics of the molecular environment of the «Cosmos» series satellites are analyzed.