

76. Sibbett W, Ruddock I S, Bradley D J *Appl. Phys. Lett.* **27** 382 (1975); **29** 296 (1976)
77. Guyot L F et al., in *Kurzzeitphotographie Bericht IV Intern. Congr. Kurzzeitphotographie und Hochfrequenzkinematographie* (Ed. O Helwich) (Wien: Darmstadt Verlag, 1967) p. 448
78. Clement G, Loty C, Delmare C, in *Actes X^{eme} Congres Intern. Cinematographie Ultra-Rapide* (Ed. E Laviron) (Paris: ANRT, 1972) p. 134
79. Kalibjian R et al. *Rev. Sci. Instrum.* **45** 776 (1974)
80. Inuzuka E, Tsuchiya Yu, in *Proc. 14th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Ed. B M Stepanov) (Moscow: VNIIOFI, 1980) p. 121
81. Jean-François G et al., in *Proc. 11th Intern. Congr. High-Speed Photography* (Ed. P J Rolls) (London: Chapman and Hall, 1974) p. 190; *ПТЭ* (1) 254 (1975)
82. Prokhorov A M et al., in *Proc. 14th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Ed. B M Stepanov) (Moscow: VNIIOFI, 1980) p. 124
83. Прохоров А М *Труды ФИАН* **155** 233 (1985)
84. Prokhorov A M, Nebeker S J, Schelev M Ya *Laser Focus World* (February) 85 (1989); (December) 125 (1991)
85. Lozovoi V I et al., in *Proc. 20th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1801, Eds J M Dewey, R G Racca) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1992) p. 233
86. Degtyareva V P et al., in *Proc. 18th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1032, Ed. Wang Daheng) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1988) p. 79
87. Бабушкин А В и др. *Квант. электрон.* **16** 2036 (1989)
88. Babushkin A V et al., in *Proc. 18th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1032, Ed. Wang Daheng) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1988) p. 75
89. Hermann J, Wilhelm B *Laser für Ultrakurze Lichtimpulse* (Berlin: Akademie-Verlag, 1984)
90. Vorobiev N S et al., in *Proc. Intern. Conf. Ultrafast Lasers Probe Phenomena in Bulk and Microstructure Semiconductors* (Proc. SPIE, Vol. 793, Ed. R R Alfano) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1987) p. 178
91. Бабушкин А В, Баснев Т Т, Воробьев Н С *Квант. электрон.* **13** 2262 (1986)
92. Hamal K et al. *Rev. Sci. Instrum.* **50** 337 (1979)
93. De Souza E A et al., in *Proc. 19th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1358, Eds B Garfield, J Rendell) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1990) p. 556
94. Воробьев Н С, Груднин А Б, Дианов Е М *Письма в ЖЭТФ* **44** 15 (1986)
95. Майер А А и др. *Квант. электрон.* **14** 1157 (1987)
96. Водопьянов К Л и др. *Квант. электрон.* **10** 471 (1983)
97. Degtyareva V P et al., in *Proc. 20th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1801, Eds D Dewey, R G Racca) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1992) p. 44; *Proc. 22nd Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 2869, Eds D L Paisley, A M Frank) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1996) p. 112
98. Lozovoi V I et al., in *Proc. 22nd Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 2869, Eds D L Paisley, A M Frank) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1996) p. 179
99. Schelev M Ya, Serdyuchenko Yu N, Vaschenko G O, in *Proc. 22nd Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 2869, Eds D L Paisley, A M Frank) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1996) p. 154
100. Bryukhnevich G I et al., in *Proc. 22nd Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 2869, Eds D L Paisley, A M Frank) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1996) p. 157
101. Monastyrski M A et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **427** 225 (1999)
102. Vorobiev N S et al., in *Proc. 22nd Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 2869, Eds D L Paisley, A M Frank) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1996) p. 735
103. Нолле Э Л, Прохоров А М, Щелев М Я *Доклады РАН* **348** 45 (1996)
104. Chernikov A C et al., in *Proc. 19th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1358, Eds B Garfield, J Rendell) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1990) p. 134
105. Bryukhnevich G I et al., in *Proc. 20th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1801, Eds D Dewey, R G Racca) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1992) p. 836
106. Воробьев Н С и др. *Квант. электрон.* **28** 181 (1999)
107. Zewail A H *Science* **242** 1645 (1988); *J. Phys. Chem.* **100** 12701 (1996); *Nature* (London) **386** 159 (1997)
108. Mourou G, Williamson S *Appl. Phys. Lett.* **41** 44 (1982)
109. Bryukhnevich G I et al., in *Proc. 20th Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 1801, Eds D Dewey, R G Racca) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1992) p. 115
110. Schelev M Ya et al. *Opt. Eng.* **37** 2249 (1998)
111. Kinoshita K et al., in *Proc. Intern. Symp. Photoelectronic Detection and Imaging. Technology and Applications'93* (Proc. SPIE, Vol. 1982, Ed. Zhou Liwei) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1993) p. 180
112. Bowley D et al., in *Proc. 22nd Intern. Congr. High-Speed Photography and Photonics* (Proc. SPIE, Vol. 2869, Eds D L Paisley, A M Frank) (Bellingham, Wash.: SPIE, 1996) p. 76

PACS numbers: 07.07.Df, 07.87.+v, 95.55.-n, 95.55.Pe

Развитие научного приборостроения в космических исследованиях

Ю.А. Сурков

1. Введение

Как известно, четыре десятилетия назад первые советские космические аппараты (КА), направленные к Луне, Венере и Марсу, положили начало новому этапу в изучении и освоении тел Солнечной системы с помощью космических средств. За прошедшие годы накоплен огромный объем принципиально новой научной информации, позволившей значительно продвинуться в развитии представлений о формировании их поверхности, коры и внутреннего строения.

Рассказать обо всем, что сделано в научном космическом приборостроении за прошедшие годы, в кратком обзоре не представляется возможным. Поэтому мы уделим внимание трем главным направлениям в космическом приборостроении, в которые мы внесли наибольший вклад и которые в значительной мере способствовали успеху в исследовании тел Солнечной системы.

2. Создание научных приборов и проведение экспериментов по исследованию Луны и планет

Разработка научных бортовых приборов и подготовка научных экспериментов проводилась в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН) уже в 50-е годы, одновременно с подготовкой в стране КА к запуску на Луну, Венеру и Марс. Эта задача была поручена ГЕОХИ РАН решением Академии наук, а впоследствии постановлением Правительства Институт был назначен головной организацией по исследованию взвешенного вещества с помощью космических средств и образцов, доставленных КА на Землю. С тех пор практически на всех КА, направлявшихся к Луне, Венере и Марсу, стояли наши приборы и проводились эксперименты.

Укажем КА, на которых нами проведены наиболее результативные эксперименты: Луна-10, Луна-12, Луна-16, Луна-20, Луна-24, Венера-4, Венера-5, Венера-6, Венера-8, Венера-9, Венера-10, Венера-12, Венера-13, Венера-14, Вега-1, Вега-2, Марс-5, Марс-6, Фобос-1, Фобос-2, Салют-7, Мир.

Разрабатывались и устанавливались на эти КА приборы, предназначенные для определения химического состава, физических свойств и структуры пород, для исследования атмосферы и облачного слоя Венеры, для сбора и анализа космической пыли и др. Использовались различные модели масс-спектрометров, гамма-спектрометров и рентгеноспектрометров, кондуктометры, плотнометры, измерители влажности и другие приборы.

Первые бортовые приборы были относительно простыми и мало информативными. Это объясняется тем, что в ту пору мы не имели надежных исходных данных для создания приборов, например, не был известен основной состав атмосферы Венеры (а от этого зависели перегрузки прибора при входе КА в атмосферу), не была известна мощность ее атмосферы, поэтому первые посадочные аппараты венерианских станций погибали, не достигнув поверхности, ничего не было известно о поверхности Венеры (океан или скальная порода), поэтому по аналогии с Землей первые аппараты делались в расчете на посадку в океан. Однако уже в результате полета первых станций со спускаемыми аппаратами ("Венера-4, 5 и 6") стало ясно, что вся поверхность Венеры представляет собой раскаленную пустыню, где температура ~ 500 °С, а давление у поверхности планеты ~ 100 атм углекислого газа. Результаты каждого из этих пионерских полетов к Венере принесли множество открытий и объяснили различие в обликах Венеры и Земли — планет, имеющих сходство по многим другим параметрам.

Шло время, совершенствовалось космическое приборостроение, ширился и усложнялся состав экспериментов. Встала задача детального исследования поверхности планеты. Станции "Венера-8, 9, 10" первыми совершили посадки на поверхность планеты и в упомянутых экстремальных условиях определили с помощью созданных нами первых венерианских гамма-спектрометров типы пород по содержанию в них естественных радиоактивных элементов (урана, тория и калия). Наконец, наступило время осуществления, пожалуй, самого сложного в исследовании Венеры эксперимента — определения элементного состава пород, залегающих на поверхности планеты. Эта задача была решена вначале на КА "Венера-13 и 14", совершивших посадку на гладких низменностях, а позднее и на КА "Вега-2", совершившем посадку в горном районе "Афродита". Для определения состава пород грунтозаборными устройствами отбирались пробы пород, вводились внутрь герметичных отсеков станций и с помощью специально созданной рентгено-радиометрической аппаратуры определялся их состав.

Данные о венерианской породе, полученные нами впервые с помощью гамма-спектрометров в пяти районах посадок и с помощью рентгено-спектрометров в трех районах посадок, в настоящее время используются в нашей стране и за рубежом как основополагающие при развитии представлений о формировании поверхности, коры и внутреннего строения Венеры.

Мы показали, как развивалось космическое приборостроение и научные исследования на примере Венеры лишь потому, что Венера является самой экзотической планетой и к тому же наиболее трудной в исследовании. Однако заметим, что наши первые гамма-спектрометрические исследования Луны и Марса принесли множество неожиданностей и непредсказуемых данных об

истории формирования их поверхности и внутреннего строения.

3. Прием и исследование лунного грунта, доставленного космическими аппаратами на Землю

В 1970–1976 гг. советские автоматические станции "Луна-16, 20 и 24" доставили образцы лунного грунта на Землю. Эти миссии были осуществлены вполне успешно с соблюдением всех требований стерилизации КА, карантина возвращаемого аппарата на Землю, приема и хранения в нейтральной среде, исследования образцов грунта в хорошо оборудованных центрах в нашей стране и за рубежом.

Возвращаемые аппараты совершали посадки в Казахстане. После их обнаружения и эвакуации капсулы с грунтом доставлялись в ГЕОХИ РАН, стерилизовались и поступали в специально созданную приемную лабораторию. Определяющим фактором в решении проблемы взятия, доставки, приема и исследования образцов лунного грунта на Земле явилось создание следующих сложных высоконадежных устройств и установок:

— Грунтозаборное устройство (ГЗУ), которое позволило произвести бурение и отбор керна породы на Луне глубиной $\sim 2,5$ м, упаковать его без нарушения стратификации в капсулу малого размера для доставки на Землю.

— Приемная камера, оснащенная шлюзовым устройством, рабочими перчаточными узлами, иллюминаторами для кругового обзора исследуемого образца, устройства безмасляной откачки и наполнения ее инертным газом (гелием) и блоком высокотемпературного нагрева в канале откачки рабочего газа для уничтожения вредных и опасных веществ, доставленных с Луны.

— Сверхвысоковакуумная установка (до 10^{-13} мм рт. ст.), предназначенная для изучения физических свойств грунта в условиях, идентичных тем, в которых он формировался на Луне. Установка оборудована механическими манипуляторами для проведения экспериментов с грунтом в сверхвысоком вакууме.

— Низкофоновая установка, предназначенная для измерения предельно низких радиоактивностей образцов грунта. Установка располагалась в подземном боксе, имеющем метровые бетонные стены, являющиеся пассивной защитой от космических лучей. В боксе находилась гамма-спектрометрическая установка, имеющая дополнительную активную сцинтилляционную защиту от космических лучей и измерительный детектор (кристалл с "колодцем").

Все эти установки были оснащены соответствующими научными приборами, предназначенными для предварительного исследования образцов лунного грунта.

4. Создание внедряемых зондов (пенетраторов) для исследования тел Солнечной системы

Как известно, малые тела (Луна, астероиды, ядра комет), а также планеты, имеющие неплотные атмосферы (например, Марс), имеют на поверхности слой мелкозернистой, слабосвязанной породы (так называемый "реголит"), которая образовалась под воздействием, главным образом, космогенных факторов. Реголит является хорошо измельченной и перемешанной породой, имеющей усредненный химический состав, физические свойства и структуру. Он покрывает практически всю поверх-

ность слоев разной толщины. Поэтому, исследуя такую поверхность традиционными методами (со спутника, с посадочного аппарата или подвижного средства), мы получаем практически одни и те же характеристики породы. В то же время для понимания истории формирования поверхности, коры и внутреннего строения небесного тела необходимо исследовать первичную (а не измененную) породу.

В связи с этим, встала задача создания принципиально нового исследовательского космического средства — внедряемых зондов (пенетраторов). Разработку простейших внедряемых зондов разного назначения ведут США, Япония и Европейское космическое агентство. Однако наибольший прогресс в развитии этого направления достигнут в России. Первые летные пенетраторы, предназначенные для исследования атмосферы, поверхности и внутреннего строения Марса, были сделаны под руководством автора и установлены на КА "Марс-96".

Пенетраторы представляют собой автономные КА, оборудованные служебной аппаратурой (радиокомплексом, блоком энергопитания и системой управления) и комплексом научной аппаратуры в составе 8–10 научных приборов. Пенетраторы сбрасываются с орбитальных аппаратов, затормаживаются при спуске и при скорости $\sim 100 \text{ м с}^{-1}$ внедряются в поверхность. В момент проникновения в породу пенетратор разделяется на две части, головная часть отделяется и продолжает внедряться в глубь породы до заданной глубины, остальная часть пенетратора остается на поверхности. Научная аппаратура располагается в обеих частях. Головная часть проводит измерения, находясь

под слоем реголита и измеряя химический состав, физические свойства и структуру породы. Та часть пенетратора, которая остается на поверхности, производит исследование атмосферы и поверхности планеты в районе внедрения пенетратора. Обе части пенетратора соединены кабельной связью.

Кроме марсианских пенетраторов, в настоящее время нами уже разработаны пенетраторы для поиска и исследования летучих компонентов (и, в частности, льда) в вечно затененных кратерах полярных районов Луны (как известно, все образцы лунного грунта, доставленные советскими и американскими КА, не содержат летучих компонентов). Обнаружение летучих компонентов (и, в частности, льда) представляет не только большой научный интерес, но и имеет важное практическое значение, поскольку они могут использоваться как элементы ракетного топлива и жизнеобеспечения.

Наконец, разрабатываются пенетраторы для исследования малых тел Солнечной системы (астероидов и ядер комет).

В заключение заметим, что созданные нами внедряемые зонды не только значительно расширяют возможности решения научных и прикладных задач в исследовании и освоении космического пространства, но и могут быть использованы на Земле для работы в экстремальных условиях, например, в районах катастрофических бедствий (при авариях на атомных станциях или других опасных объектах), при контроле обстановки в активных вулканических кратерах, в качестве постов, контролирующей обстановку в отдаленных или труднодоступных районах и т.д.