

УДК 629.78:550.38

КОНСТРУКЦИЯ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВОГО КОМПЛЕКСА (ПВК) ЭКСПЕРИМЕНТА «ОБСТАНОВКА» НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (МКС)

*А.М. Дынин¹, С.И. Климов², В.А. Масленников¹, В.Д. Мягких²,
В.С. Трошин²*

¹ Ракетно-космическая корпорация (РКК) «Энергия», Королев,
Московская область

² Институт космических исследований РАН, Москва

1. Основные цели и задачи космического эксперимента «Обстановка, 1-й этап»

«Долгосрочная программа научных и прикладных исследований на РС МКС», сформированная РАН и Росавиакосмосом, включает около 40 космических экспериментов (КЭ) в области геофизики и космической физики. Научная аппаратура, разрабатываемая для реализации этих КЭ, в значительной части может быть использована для изучения солнечно-земной физики.

Опыт научных исследований, проведенных на орбитальной станции (ОС) «Мир», свидетельствует о возможности и целесообразности использования долгоживущих орбитальных комплексов для изучения факторов окружающего космического пространства (ОКП) на долговременной основе. Знание процессов в ОКП, способных повлиять на изменение известных защитных свойств магнитосферы и ионосферы, для человека жизненно необходимо.

Исследования в приповерхностной зоне плазменно-волновых процессов взаимодействия сверхбольшого космического аппарата (КА) с ионосферой необходимы как для прикладных, так и для фундаментальных геофизических исследований [1, 2]. Электрические и магнитные поля и токи у поверхности КА определяются параметрами окружающей космической плазмы и характером взаимодействия материалов, находящихся на поверхности КА, с этой средой [3]. Проводимые на борту КА изме-

рения позволяют проследить изменения этих полей в полете в зависимости от параметров орбиты и характеристик окружающей среды, которые определяются степенью внешних геофизических возмущений и их природой. Опыт проведения этих измерений свидетельствует о том, что в ряде случаев эти поля достигали значений, приводящих к выходу из строя отдельных приборов и систем. Подобные измерения ранее проводились на орбитальном комплексе (ОК) «Мир». По нашему мнению, эксперимент «Обстановка» должен предшествовать любым геофизическим экспериментам на борту РС МКС, так как, являясь по существу комплексным плазменно-волновым экспериментом, выполняющим прямые (*in situ*) измерения в окружающей МКС плазме, позволит определить эффективность подобных измерений для геофизических исследований.

Геофизические исследования (на фоне исследования взаимодействия МКС с ионосферной плазмой) предполагают долгосрочные мониторинговые измерения параметров плазмы и плазменно-волновых процессов, связанных с проявлением в ионосфере солнечно-магнитосферных и атмосферно-ионосферных связей; получение новых данных для уточнения моделей ближнего космоса в той его области, где осуществляются долгосрочные полеты с человеком на борту. При длительных сроках функционирования орбитальных станций (10–15 лет и более), наряду с кратковременными возмущениями (суббури и магнитные бури), можно исследовать долговременные колебания геомагнитных возмущений, например 11-летний цикл солнечной активности [4]. Одним из направлений исследований является изучение и предсказание «космической погоды» [5, 6], то есть текущего и прогнозируемого состояния ионосферы. Эти данные необходимы для групп, управляющих работой прикладных КА на орбите, с целью обеспечения их долговременной активной работы. Например, не исключено, что при прогнозе сильных магнитосферных возмущений некоторые КА необходимо переводить в шадящий режим функционирования бортовой аппаратуры.

Космический эксперимент «Обстановка, 1-й этап» реализуется с помощью плазменно-волнового комплекса научной аппаратуры (ПВК), разрабатываемого на основе приборов, успешно использовавшихся ранее ИКИ РАН в международной кооперации при проведении фундаментальных исследований в космосе

[7]. Основой волновых измерений является комбинированная волновая диагностика (КВД) [8], которая позволяет в широком диапазоне частот, включая и постоянные поля, исследовать мощность электромагнитных, электростатических и магнитных полей, а также спектр флуктуаций частиц плазмы [9–11].

В результате измерений комплекса физических параметров и их бортовой обработки будут получены следующие параметры плазмы и окружающих электромагнитных полей:

- спектральная плотность электростатических плазменных волн и электрической компоненты электромагнитных излучений E в диапазоне 0–10 мГц;
- спектральная плотность магнитной компоненты электромагнитных излучений B в диапазоне 0–40 кГц;
- спектральная плотность флуктуаций плотности тока J в диапазоне 1 Гц – 40 кГц;
- вектор напряженности постоянного магнитного поля B ($\pm 50\,000$ нТ) и градиент поля DB (100–1000 нТ) по нормали к поверхности ОС;
- вектор напряженности квазистационарного электрического поля E (± 10 В/м) и градиент поля DE (10–1000 мВ/м) по нормали к поверхности ОС;
- потенциал точки заземления ОС относительно плазмы ϕ (0–200 В);
- параметры тепловой и низкоэнергичной плазмы N_e , N_i , T_e , T_i (0,01–10 кэВ);
- радиочастотный состав электромагнитного спектра;
- спектры электронов в диапазоне энергий 10 эВ – 10 кэВ.

Космический эксперимент «Обстановка» органически сочетается с рядом других экспериментов, включенных в программу научных исследований на РС МКС, в частности КЭ «Трабант» (ИКИ РАН), «Скорпион» (НИИЯФ МГУ, ЦНИИМаш) и «Фламан» (НИИЯФ, РКК «Энергия»).

Долговременный мониторинг параметров ионосферы и некоторых областей магнитосферы с борта орбитальных станций может оказать неоценимую помощь для потребителей текущей информации о состоянии ионосферы (радиосвязь и навигация), а также для исследователей солнечно-земных связей [12, 13].

2. Основные принципы конструирования аппаратуры

Комплекс ПВК представляет собой ряд научных приборов, имеющих как самостоятельное, так и взаимосвязанное функциональное назначение, а также ряд аппаратурных средств, предназначенных для управления режимами работы научных приборов, сбора, обработки и хранения данных измерений, обеспечения связи с бортовыми системами РС МКС, поддержания теплового режима.

Учитывая, что каждый научный прибор индивидуален и конструктивно разработан и уже использовался в ряде космических проектов («Интеркосмос-Коперник 500», «Интеркосмос-Болгария 1300», «Интербол-Хвостовой зонд», «Марс 94/96» и др.), а также то, что изготовление приборов осуществляется в научной кооперации нескольких стран, было принято решение, в том числе по финансовым соображениям, использовать оригинальные конструкции приборов. Использование оригинальных конструкций также диктовалось оригинальностью датчиков научных приборов [14].

Конечно, прорабатывался вариант унифицирования конструкции электронных плат и блоков. Однако, учитывая, что научные приборы, входящие в ПВК, практически являются приемниками электромагнитных излучений широкого диапазона частот и имеют высокую чувствительность, к аппаратуре предъявляются жесткие требования по параметрам электромагнитной совместимости (ЭМС), которые в данном случае легче реализовывать по отдельным приборам. Такое решение имеет и отрицательные стороны, так как возникает необходимость использования достаточно сложной системы кабельных межблочных соединений и соответственно экранирования кабелей и выбора общей точки заземления (общего нуля).

Как отмечалось выше, для реализации высокой чувствительности приборов, по опыту предшествующих спутниковых проектов, как правило, датчики (антенны) приборов необходимо выносить на расстояния порядка нескольких метров от блоков электроники. Таким образом, в состав ПВК введены штанги.

Учитывая сложную конфигурацию конструкции МКС и соответственно распределения в ближней зоне электромагнитных полей, необходимо реализовать пространственно разнесенные измерения. Для этого формируются две штанги с датчиками.

Штанги размещаются на расстоянии ~ 3 м друг от друга. Рядом с каждой штангой размещается соответствующий электронный модуль.

Размещение на внешней поверхности штанг и электронных блоков, требующее выхода операторов из гермоотсека МКС, должно удовлетворять ряду специфических требований, таких как: удобство и безопасность работы операторов, обеспечение безопасного доступа операторов к различным частям МКС. Проработка всех требований показала (рис. 1) целесообразность размещения ПВК на продольных поручнях Служебного модуля (СМ) Российского сегмента МКС (СМ РС МКС).

Аппаратура комплекса ПВК доставляется на борт МКС транспортно-грузовым кораблем «Прогресс».

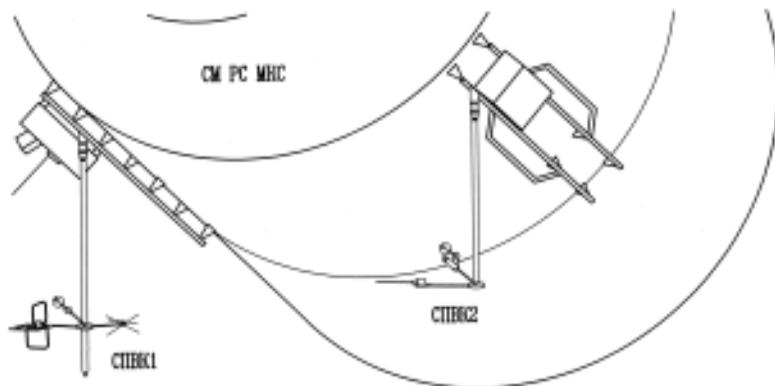


Рис. 1. Схема размещения ПВК на СМ РС МКС

3. Специфика конструкции комплекса ПВК и его отдельных приборов

Конструктивно ПВК состоит (рис. 2) из сборок СПВК1, СПВК2, размещаемых на внешней поверхности СМ (см. рис. 1) на расстоянии трех метров друг от друга, и блока системы хранения и управления ТМ-информацией (БХТИ), размещаемого внутри СМ.

Сборки СПВК (рис. 3), в свою очередь, состоят из моноблоков штанг ШВД1, ШВД2 и моноблоков датчиков КВДМ1 и КВДМ2.



Рис. 2. Схема деления ПВК

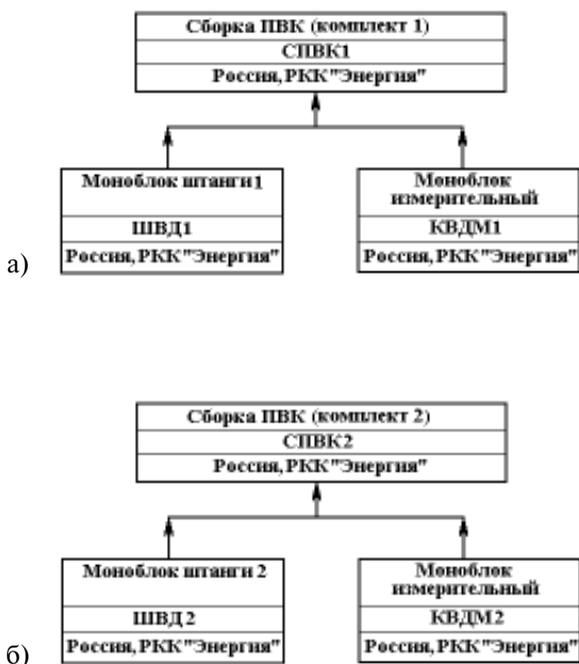


Рис. 3. Схема деления сборки СПВК1 (а) и СПВК2 (б)

Моноблоки штанг ШВД1, ШВД2 (рис. 4а и б) конструктивно состоят из штанг ШВ1, ШВ2, разрабатываемых и изготавливаемых РКК «Энергия», и комплектов датчиков КД1 и КД2, комплектуемых ИКИ РАН. Важным конструктивным элементом СПВК являются механические адаптеры МАД1, МАД2 (рис. 4в и г), разрабатываемые и изготавливаемые РКК «Энергия» и механически объединяющие моноблоки ШВД1-КВДМ1, ШВД2-КВДМ2 и осуществляющие крепление к поручням СМ как штанг ШВ1, ШВ2, так и блоков КВД1 и КВД2, разрабатываемых и изготавливаемых в ИКИ РАН в международной кооперации (рис. 5, 6).

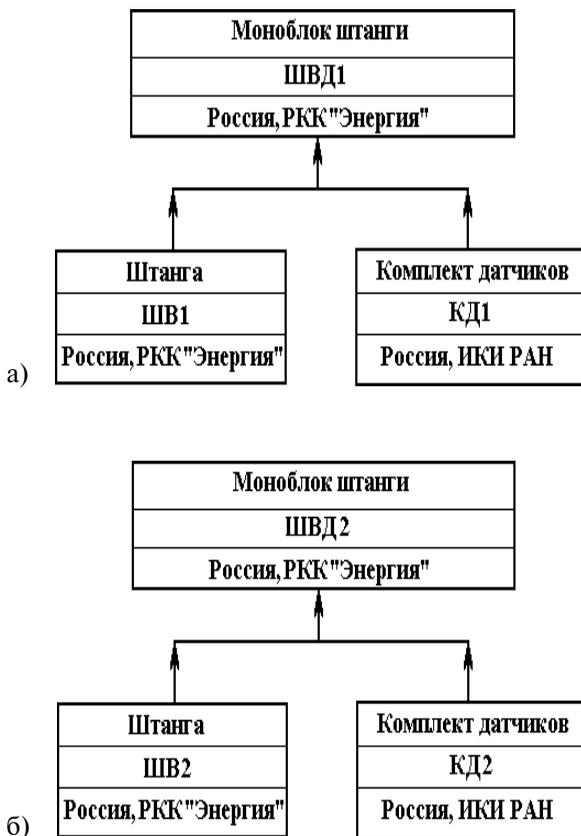


Рис. 4. Состав моноблока штанги ШВД1 (а) и ШВД2 (б)

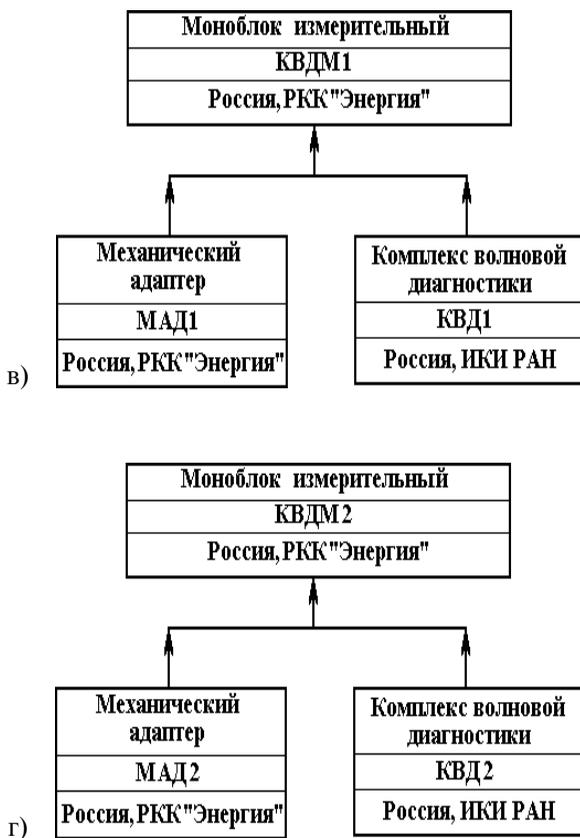


Рис. 4. Конструктивная схема КВДМ1 (в) и КВДМ2 (г)

Схемы деления и конструктивные схемы (рис. 1–6) отражают важные организационно-технологические факторы:

- участие ИКИ РАН, РКК «Энергия» и международной кооперации в разработке и изготовлении ПВК по соответствующей конструкторской документации;
- поэтапное проведение приемо-сдаточных и конструкторско-доводочных испытаний у изготовителей аппаратуры;
- формирование (сборка) ПВК операторами на борту МКС.

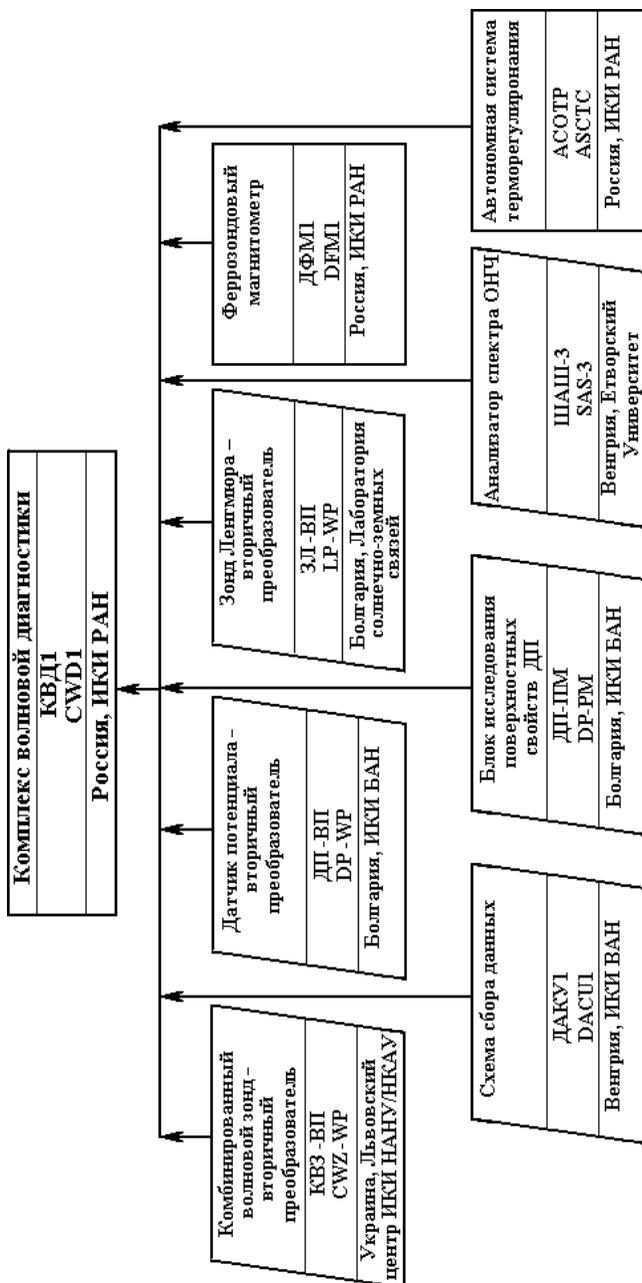


Рис. 5. Состав комплекса волновой диагностики КВД1

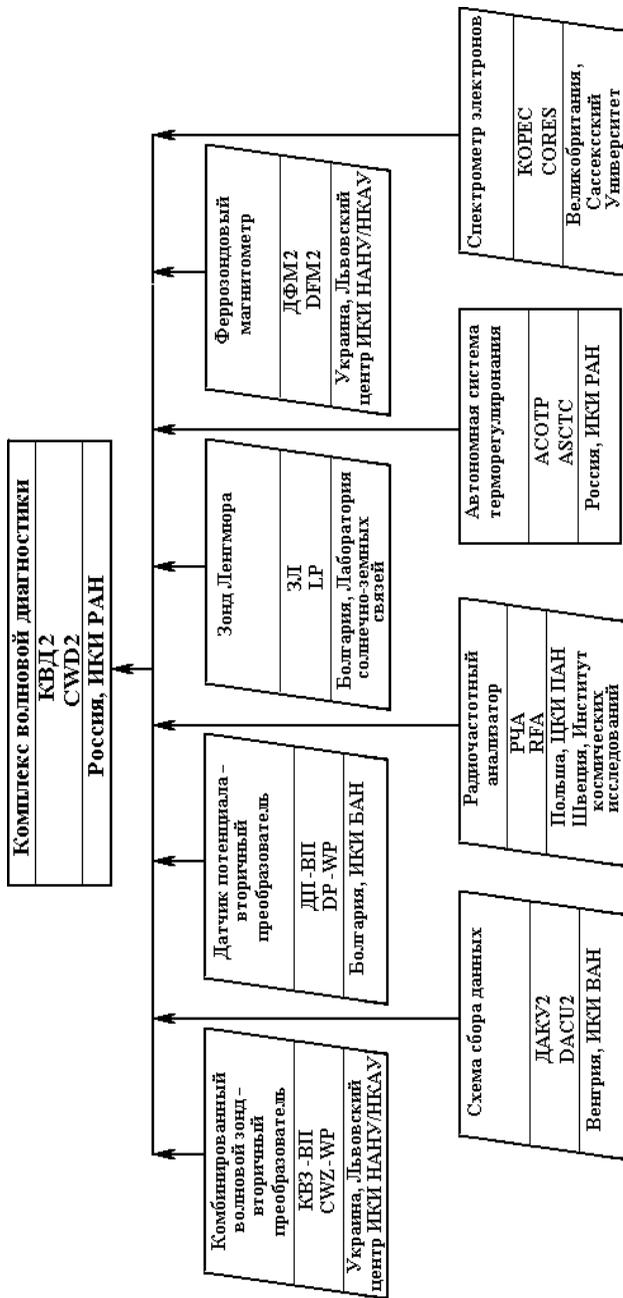


Рис. 6. Состав комплекса волновой диагностики КВД2

3.1. Конструкция КВД1, КВД2

В блоках КВД1 (см. рис. 5) и КВД2 (см. рис. 6) размещаются:

- научные приборы ДФМ1, ШАЗ3 в КВД1 и ДФМ2, КОРЕС в КВД2;
- вторичные преобразователи научных приборов (имеющие индекс ВП), датчики которых размещаются на штангах;
- устройства приема и управления ТМ-информацией (ДАКУ1, ДАКУ2);
- система автоматического поддержания температуры (АСОТР) в диапазоне от +5 до +35 °С.

Как видно на рис. 5, научные приборы, устройства приема и управления ТМ-информацией разрабатываются и изготавливаются международной кооперацией по своим конструкторско-технологическим нормативам и техническим заданиям, согласованным с ИКИ РАН — головным постановщиком космического эксперимента «Обстановка, 1-й этап».

Конструктивно блоки КВД1 и КВД2 представляют собой плиту, к которой по двум противоположным торцам прикреплены две пластины, являющиеся радиаторами. На плите размещаются электронные блоки приборов. С боков и сверху плита закрыта тонкостенным кожухом. Тепловые расчеты показывают, что температура на плите во время полета обеспечивается в пределах от –10 до +30 °С.

3.2. Конструкция ШВД1, ШВД2

Штанги ШВД1 и ШВД2 имеют аналогичные схемы крепления к адаптерам МАД1 и МАД2 и аналогичные кинематические схемы, но различны по конструкции из-за разной комплектации датчиками КД1 и КД2.

Штанга ШВД1 (рис. 7а) имеет центральный ствол длиной 1,5 м и два стержня длиной ~1 м, шарнирно раскрываемых с верхней части ствола и складываемых вдоль ствола при транспортировании ее на МКС. На верхнем конце ствола размещается также датчик КВЗ-ПП1. На концах стержней размещаются датчики ЗЛ-Д1 и ДП-Д1. Штанга ШВД2 (рис. 7б) также имеет центральный ствол длиной 1,5 м и три стержня длиной ~1 м. На конце ствола ШВД2 размещается датчик КВЗ-ПП2, а на концах стержней — датчики ДП-Д2, РЧА-АД и РЧА-АМ. На нижних концах

стволов обеих штанг имеются байонетные замки, с помощью которых операторы устанавливают штанги на механических адаптерах МАД1 и МАД2. Раскрытие стержней производят операторы вручную после фиксации штанг на механических адаптерах. Завершающей операцией (после ухода операторов) является автоматическое раскрытие по команде с борта датчиков РЧА-АД и РЧА-АМ.

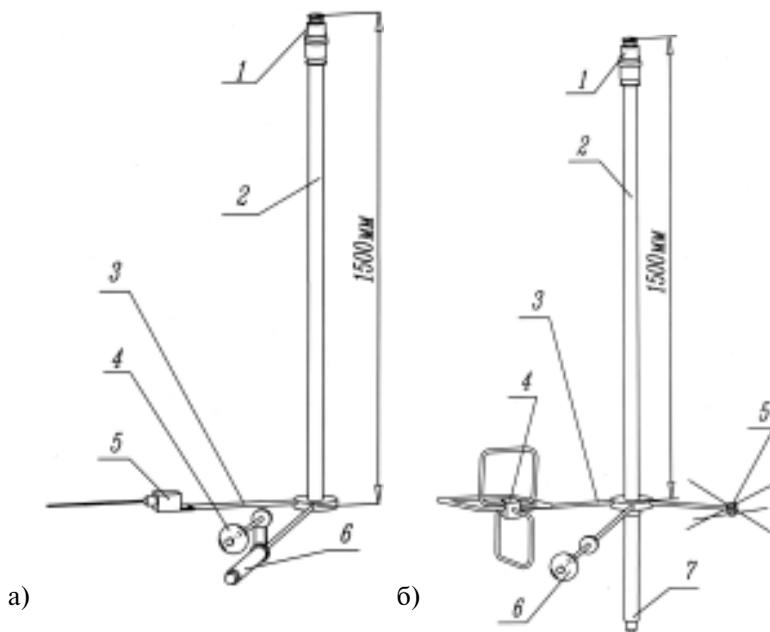


Рис. 7. Штанга ШВД1 (а): 1 — байонетный замок; 2 — центральный ствол; 3 — стержень; 4 — датчик потенциала — первичный преобразователь ДП-Д1; 5 — зонд Ленгмюра — первичный преобразователь ЗЛ-Д1; 6 — комбинированный волновой зонд КВЗ-ПП1.

Штанга ШВД2 (б): 1 — байонетный замок; 2 — центральный ствол; 3 — стержень; 4 — радиочастотный анализатор — антенна магнитная РЧА-АМ; 5 — радиочастотный анализатор — антенна электрическая РЧА-АД; 6 — датчик потенциала — первичный преобразователь ДП-Д2; 7 — комбинированный волновой зонд — первичный преобразователь КВЗ-ПП2

Для выполнения требований по пространственной ориентации датчиков, в частности относительно вектора скорости МКС, стволы и стержни в развернутом состоянии размещаются под определенными углами друг к другу с точностью не хуже $\pm 3^\circ$. Это, в свою очередь, требует обеспечения раскрытия стержней в определенных плоскостях по отношению к осям МКС. Важным требованием, предъявленным к раскрытым штангам, является обеспечение безопасного прохода операторов по поручням, к которым СПВК1 и СПВК2 крепятся с помощью механических адаптеров МАД1 и МАД2.



Рис. 8. Схема размещения блоков измерительных и штанг на поручнях РО2:

- 1 — блок измерительный КВД1; 2 — штанга 1; 3 — зонд Ленгмюра — первичный преобразователь ЗЛ-Д1; 4 — комбинированный волновой зонд КВЗ-ПП1; 5 — датчик потенциала — первичный преобразователь ДП-Д1;
- 6 — блок измерительный КВД2; 7 — штанга 2; 8 — спектрометр электронов; 9 — зонд Ленгмюра — первичный преобразователь ЗЛ-Д2;
- 10 — радиочастотный анализатор — антенна магнитная РЧА-АМ;
- 11 — радиочастотный анализатор — антенна электрическая РЧА-АД;
- 12 — датчик потенциала — первичный преобразователь ДП-Д2;
- 13 — комбинированный волновой зонд — первичный преобразователь КВЗ-ПП2

Размещение ПВК на внешней поверхности (см. рис. 1) оптимально обеспечивает требование — отсутствие между штангами (стволы штанг разнесены друг от друга на 3 м) и в полях зрения датчиков элементов систем и конструкций СМ РС МКС (рис. 8).

Размещение датчиков с предусилителями на штангах предъявляет жесткие требования к их рабочему температурному диапазону ± 50 °С. Нормальное функционирование датчиков обеспечивается тем, что в выключенном состоянии все комплектующие, согласно их техническим условиям, соответствуют данному диапазону температур, а во включенном состоянии, за счет выделения тепловой мощности в датчиках, их рабочая температура находится в пределах от -20 до $+50$ °С.

Как наглядно видно, необходимость использования штанг существенно увеличивает габаритно-массовые характеристики плазменно-волновых комплексов. Уменьшение количества штанг возможно при интеграции нескольких датчиков в единую конструктивную единицу. Положительным примером такой интеграции является комбинированный волновой зонд (первичный преобразователь КВЗ-ПП) [15, 16], объединяющий:

- индукционный датчик флуктуаций магнитного поля;
- датчик флуктуаций плотности тока — щелевой зонд Ленгмюра;
- датчик электрического потенциала — одиночный зонд Ленгмюра.

Заключение

Дальнейшее развитие КЭ «Обстановка» («Обстановка, 2-й этап») предполагает проведение многокомпонентных (векторных) измерений электрических полей, а также выполнение измерений параметров плазмы мобильными автономными мини-комплексами научной аппаратуры (буями), размещаемыми в любых местах на поверхности МКС. Важным требованием, предъявляемым к буям, является минимизация их массово-габаритных и энергетических характеристик. В этих целях проводится проработка [14] унифицирования и использования микротехнологий в конструкциях электронных плат, что должно привести к существенному сокращению объемов, номенклатуры и массы конструктивных элементов.

Важным фактором уменьшения массы является применение новых технологий в конструкциях электрических (замена кабельных) соединений.

Одним из путей решения этой проблемы, учитывая, что подавляющее большинство плазменно-волновых датчиков имеют аналоговые выходы, является проведение оцифровки аналоговых сигналов и формирование цифровых массивов непосредственно в датчиках. Учитывая, что датчики размещаются на штангах, т.е. должны работать в широком диапазоне температур, а также имеют большой динамический (~120 дБ) и частотный (от долей герц до десятков мегагерц) диапазоны, требования к АЦП предъявляются очень жесткие. Отработка такой методики успешно проведена в космическом эксперименте СПРУТ–VI на орбитальной станции «Мир» [12, 17, 18].

Компоновка датчиков и блоков электроники в единой конструкции – еще один путь уменьшения габаритно-массовых характеристик, впервые реализуется в магнитометрах ДФМ1 и ДФМ2. Это стало возможным благодаря очень «тонкой» подборке радиоэлементов, конструкции и размещению феррозондовых датчиков, обеспечивших хорошую электромагнитную совместимость приборов в целом. Следует отметить, что размещение феррозондового датчика совместно с блоком электроники прибора ТФМ-1 внутри микроспутника «Колибри-2000» также дало хорошие научные данные [19]. Уровни шумов в диапазоне частот 0,1–16 Гц оказались даже несколько ниже шумов, наблюдаемых магнитометром на спутнике «Интербол – Хвостовой зонд», где феррозонд размещался на специальной штанге на расстоянии ~11 м от центра космического аппарата [8].

Литература

1. *Климов С.И.* и др. Комплексное исследование электромагнитной обстановки Российского сегмента МКС в космических экспериментах «Обстановка» и «Грабант» // Сб. тез. докл. V Межотраслевая научно-технич. конф. «Электризация космических аппаратов и совершенствование их антистатической защиты как средства увеличения надежности и сроков активного существования». 16–17 мая 2002. ЦНИИмаш. 2002. С. 71–74.
2. *Klimov S.I.* et al. “Obstanovka” experiment for space weather research on board the Russian segment of the ISS // 54th Intern. Astronautical Congr. 29 Sept. – 03 Oct. 2003. Bremen, Germany. IAC-03-T. 4.09.2003.

3. *Сопрунюк П.М., Климов С.И., Корепанов В.Е.* Электрические поля в космической плазме. Киев: Наукова думка, 1994.
4. *Петрукович А.А., Климов С.И.* Использование измерений солнечного ветра для анализа и прогноза геомагнитной активности // Космич. исслед. 2000. Т. 38. № 5. С. 463–468.
5. *Климов С.И., Родин В.Г., Григорян О.Р.* Изучение и контроль «космической погоды» // Земля и Вселенная. 2000. № 3. С. 9–18.
6. *Klimov S.I. et al.* “Obstanovka” experiment on board International Space Station – The use for Space Weather research // Abstr. Magnetospheric Response to Solar Activity. 9–12 Sept. 2003. Prague Czech Republic. Charles University Faculty of Mathematics and Physics, Czech Acad. of Sciences Inst. of Atmospheric Physics. 2003. P. 60.
7. *Klimov S.I. et al.* The Plasma-Wave Complex of scientific instrumentation for wave and plasma parameters measurements in the frame of Russian Segment of ISS // Abstr. ESA Space Weather Workshop: Developing a European Space Weather Service Network. SWENET: Space Weather European Network. 3–5 Nov. 2003. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. 2003.
8. *Klimov S.I. et al.* ASPI Experiment: measurements of fields and waves on board the INTERBALL-1 spacecraft // Ann. Geophysical. 1997. V. 15. N. 5. P. 514–527.
9. *Лисаков Ю.В., Климов С.И., Лапишинова О.В., Медников Б.А., Машков А.С., Пушкин Н.М.* Флуктуации тока на плоские зонды прибора «Зонд-Заряд», установленного на орбитальном комплексе МИР // Космич. исслед. 2003. Т. 41. № 3. С. 265–276.
10. *Petrukovich A.A., Romanov S.A., Klimov S.I.* Direct measurements of AC plasma currents in the outer magnetosphere // Measurement Techniques in Space Plasmas: Fields. Geophysical Monograph 103. Copyring 1998 by American Geophysical Union, 1998. P.199–204.
11. *Klimov S.I., Lissakov Yu.V., Grushin V.A., Lapshinova O.V., Mednikov B.A., Pushkin N.M., Mashkov A.S.* Spacecraft potential — integral parameter of “Space Weather” // Proc. of Intern. Symp. for solar corona through interplanetary space, into Earth’s magnetosphere and ionosphere: Interball, ISTP satellites, and ground-based observations. Febr. 1–4, 2000. Kyiv, Ukraine. 2000. P. 335–338.
12. *Klimov S.I.* INTERBALL-1 and MIR Orbital Station coordinated magnetic field and energetic particles measurements // Adv. Space Res. 2002. V. 30, N. 7. P. 1847–1853.
13. *Климов С.И.* Исследования влияния космической погоды на состояние среднеширотной и приэкваториальной ионосферы.

- (Researches of influence of space weather on a condition of middle latitude and near-equator ionosphere.) // 10th Jubilee Intern. Scientific Conf. "Contemporary problems of solar-terrestrial influences". 20–21 Nov. 2003. Sofia, Bulgaria 2003. P. 12–13.
14. *Дудкин Ф.Л., Климов С.И., Корепанов В.Е., Марусенков А.А., Сухинюк А.Е.* Современные тенденции развития космического научного приборостроения. В настоящем сборнике.
 15. *Корепанов В.Е., Dudkin F.L.* Comparative analysis of current density meters operating in space plasmas // *Adv. Space Res.* 1999. V. 23. N. 8. P. 1541–1544.
 16. *Климов С.И.* и др. Волновой комплекс аппаратуры СПРУТ-VI // *Приборы и техника эксперимента.* 2004. № 1. С. 122–126.
 17. *Беляев А.А., Григорян О.Р., Климов С.И., Новиков Л.С., Рябуха С.Б., Чурило И.В.* Комплекс аппаратуры СПРУТ-VI для орбитальной станции МИР // *Приборы и техника эксперимента.* 2004. № 1. С. 95–100.
 18. *Грачев Е.А.* и др. Магнитометрическая система аппаратуры СПРУТ-VI // *Приборы и техника эксперимента.* 2004. № 1. С. 127–133.
 19. *Тамкович Г.М., Климов С.И., Григорян О.Р., Петров В.М., Радченко В.В.* Основные научно-образовательные результаты микроспутника «Колибри-2000» // IV Международ. конф.-выставка «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация. Области эффективного применения в XXI веке». Королев, Моск. обл. 31 мая – 4 июня 2004. Кн. 2. 2004. С. 287–302.