
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ПРОЕКТЕ «ИОНОСАТ-МИКРО»

В.Е. КОРЕПАНОВ, С.М. БЕЛЯЕВ

Введение

Одним из основных направлений экспериментальных космических исследований на сегодняшний день является изучение и, в особенности, прогноз космической погоды (КП). Не будем останавливаться на важности таких исследований — имеется множество публикаций на эту тему, как в отечественной, так и в зарубежной литературе. При этом, как правило, подразумевается, что КП контролируется солнечной активностью, и не упоминается о гораздо более слабом, но, тем не менее, существенном влиянии на околоземный космос мощных природных и антропогенных процессов, происходящих на Земле (см., например, [1]).

Наземные радиопередатчики, электростанции, линии электропередач и промышленные объекты образуют источники поступления в ионосферу электромагнитной (ЭМ) энергии, что порождает ряд специфических явлений, таких как генерация вторичных ЭМ эмиссий, отклонение хода ионосферных параметров от медианных значений и т.д. Происходит устойчивый рост техногенного воздействия на ионосферу, возможные последствия которого сегодня трудно оценить. Поэтому важно провести статистически достоверное исследование вариаций ионосферных параметров за счет природных и искусственных факторов, прежде всего связанных со значительным увеличением производства ЭМ энергии. Соответственно, задачей проекта «Ионосат-Микро» является мониторинг ЭМ волновых процессов в широком диапазоне частот (от КНЧ до ВЧ) с расширенной наземной поддержкой. Тем самым может быть создан инструмент для изучения техногенных возмущений ионосферы и определения их критического уровня. Значительный интерес также имеет практическое использование указанных наблюдений для контроля за распределёнными по Земле средствами производства и потребления ЭМ энергии, как в региональных, так и в глобальных масштабах.

Вызванные наземными процессами ЭМ эффекты наблюдаются в ионосфере, начиная с запуска первых научных спутников. Несмотря на долгую историю таких исследований, вопросы, связанные с ЭМ загрязнением окружающей среды, изучены недостаточно. ЭМ шумы земного происхождения

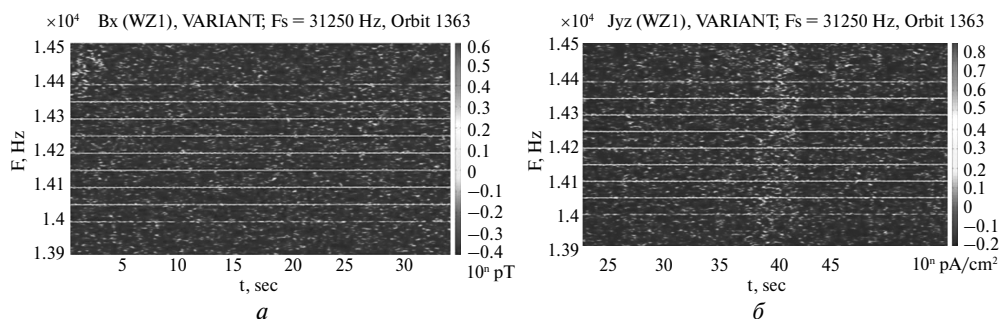


Рис. 1. Гармоники частоты 50 Гц, транспонированные в область 14,2 кГц: *а* — по магнитному полю, *б* — по плотности пространственного тока

были обнаружены на спутниках ARIEL-3 и -4 [2], в частности, шумовые сигналы очень низкой частоты (ОНЧ), вызванные гармониками излучения линий электропередач и навигационных передатчиков [3].

Наблюдения ЭМ излучений на низкоорбитальных спутниках ИНТЕРКОС-МОС-19, КОСМОС-1809, АКТИВНЫЙ и АРЕХ подтвердили существенное увеличение интенсивности высокочастотных ЭМ шумов над населенными районами Европы и Азии (например, [4, 5]): усиление около 20 дБ на фоне нормального уровня наблюдалось над всей Евразией. Однако и гармоники промышленной частоты 50 (60) Гц также постоянно наблюдаются с борта спутников, при этом в самых различных частотных диапазонах. Так, в области повышенных частот наблюдаются, как правило, целые наборы спектральных линий, разделенных 50 или 100 Гц. Их амплитуда увеличивается в области 1...2 кГц, однако, как показывают экспериментальные данные, они могут наблюдаться и на частотах до 15 кГц.

На рис. 1 показаны достаточно мощные гармоники частоты 50 Гц, зарегистрированные на борту спутника «Сич-1М» в эксперименте «Вариант» [6] на юге Аравийского полуострова (на высоте ~340 км) в каналах измерения магнитной индукции (рис. 1, *а*) и плотности пространственного тока (рис. 1, *б*). При этом ни в этом районе, ни в магнито-сопряженной точке мощных производителей или потребителей ЭМ энергии не обнаружено, что позволяет говорить о глобальном характере ЭМ загрязнений ионосферы, связанных, скорее всего, с суб-ионосферным распространением ЭМ волн указанных диапазонов.

Действительно, учитывая, что линии электропередач могут иметь длину до нескольких тысяч километров, они могут представлять собой антенну соответствующей длины для излучения ЭМ волны 50 или 60 Гц. Излучение возникает следующим образом. Электрический ток обычно подается потребителям по проводам трехфазной электрической линии. Эти провода образуют гигантские петли тока с площадью более нескольких десятков квадратных километров, а амплитуда тока может составлять до 4 кА. Такая электрическая линия образует мощную токовую петлю с очень большим вертикальным маг-



нитным моментом (порядка $10^{11} \text{ А} \cdot \text{м}^2$), которая и является источником ЭМ поля 50 или 60 Гц. Токи в линиях электропередач, силовых трансформаторах и промышленном оборудовании потребителей часто содержат высшие гармоники, и эти последние излучаются с большей эффективностью. Следует подчеркнуть, что нормальное значение коэффициента гармоник в линии электропередачи находится в пределах 6 %, а допустимый предел — 20 %. Имеются экспериментальные результаты, которые показывают, что в линиях электропередач могут наблюдаться гармоники 23-го порядка и выше. В результате, потребление электроэнергии действует в двух направлениях: оно изменяет ионосферу и магнитосферу над линией электропередачи и одновременно излучает сигнал основной частоты и ее гармоник в полости Земля — ионосфера.

Таким образом, обнаружено весьма сложное явление воздействия на ионосферу гармонического излучения линий электропередач, которое может иметь определенные экологические последствия. Рис. 2 иллюстрирует гипотетическую картину взаимодействия различных природных и техногенных процессов в околоземном пространстве [7], в том числе с участием гибридных резонансов линий электропередач, и показывает, что влияние излучения линий электропередач может вызвать высыпание энергичных электронов из радиационных поясов Земли. Физика обнаруженного явления заключается в нелинейном взаимодействии сильных электрических и магнитных полей с ионосферной и магнитосферной плазмой и с заряженными частицами в радиационных поясах. Таким образом, увеличение мирового потребления электроэнергии может вызвать дополнительные потоки энергичных электронов с не вполне известными последствиями для окружающей среды.

Такие эффекты действительно часто наблюдаются с борта спутников при исследованиях ЭМ полей и концентрации заряженных и нейтральных частиц. Учитывая, что на борту спутника «Ионосат-Микро» будет установлен хорошо оснащенный измерительный комплекс для изучения ЭМ излучений в широком частотном диапазоне, исследование этих процессов включено в научные задачи эксперимента. Ожидается, что в результате проведения эксперимента может быть получена глобальная карта, которая будет отражать распределение регионального среднего уровня возмущений и его суточные/сезонные колебания. Возможно, что при дальнейшем развитии исследований могут быть экспериментально установлены и количественные соотношения, что позволит оценить уровни ЭМ загрязнения, создаваемые отдельными странами.

Так, известно, что компонента ЭМ поля, которая взаимодействует с плазмой ионосферы прямо над линией питания, нагревает электроны в нижней ионосфере. Соответствующая оценка, сделанная в [8], полагает, что именно нагрев электронов является демаскирующим фактором передатчика ВМС США в Висконсине: расчеты показывают, что увеличение средней температуры электронов ($T_e = 300$ K) может достигать 10 %, в зависимости от времени суток и положения линии. Такие отклонения могут показаться небольшими, однако следует подчеркнуть, что этот фактор действует постоянно, днем и ночью. В результате совокупный эффект может стать существенным, особенно если рассматривать не одну линию, а, например, региональную систему энергоснабжения, охватывающую большую площадь.

Изложенного выше достаточно для обоснования важности изучения взаимодействия постоянно растущего ЭМ излучения с ионосферой Земли. Рассмотрим состав аппаратуры, который будет использован для проведения соответствующего эксперимента в рамках спутниковой миссии «Ионосат-Микро».

Аппаратурный комплекс для изучения параметров ионосферы, связанных с взаимодействием мощных наземных источников ЭМ энергии

Изучение взаимодействия мощного излучения линий электропередач с ионосферой требует исследования следующих явлений:

- пространственно-временной структуры и глобального распределения неоднородностей в космической плазме;
- глобальной структуры и динамики электрического тока, электрических и магнитных полей в широком диапазоне частот;
- волновой структуры ЭМ излучений и турбулентности в различных пространственных и временных масштабах.

Целесообразна синхронизация соответствующих космических экспериментов с наземными наблюдениями, а также сочетания как активных, так и пассивных экспериментов.

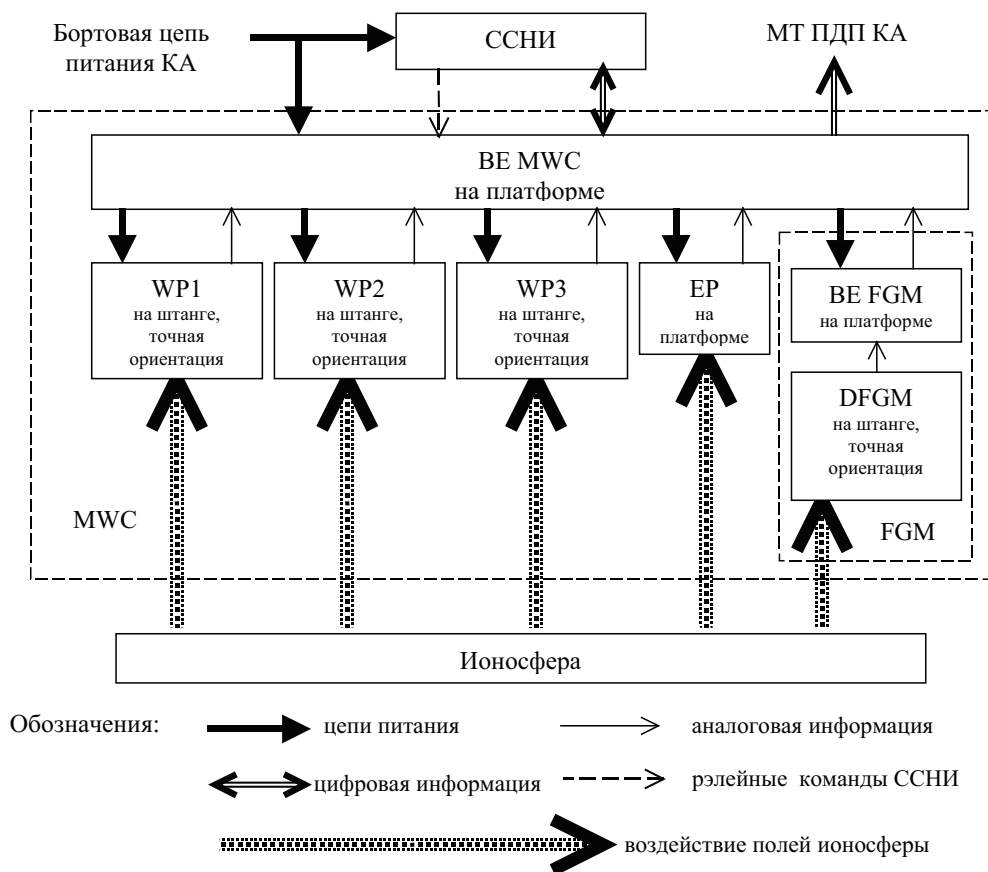


Рис. 3. Блок-схема MWC

Для реализации этой программы исследований научная аппаратура планируемой миссии должна, в первую очередь, измерять такие параметры в ионосфере, как векторы ЭМ полей и плотности тока во всем диапазоне частот, от квазипостоянного до 20 кГц, дополняемые данными о плотности и температуре плазмы. Весь комплекс научных задач проекта «Ионосат-Микро» и планируемые режимы измерений изложены в работах [9]. В дальнейшем основное внимание будет уделено описанию магнитно-волнового комплекса (MWC), предназначенного для измерения ЭМ параметров ионосферы.

Комплекс MWC состоит из следующего набора ЭМ датчиков и блока электроники:

- три волновых зонда — WP1, WP2 и WP3;
- электрический зонд ЕР;
- магнитометр FGM, состоящий из блока электроники BE FGM и датчика DFGM;
- блок электроники BE MWC.



Для обеспечения качественных измерений все волновые зонды (WP1, WP2 и WP3) и датчик феррозондового магнитометра (DFGM) размещаются на штангах КА. Электрический зонд (EP), штанга для которого не предусмотрена конструкцией КА, расположен на платформе КА на максимальном расстоянии от плоскости раскрытия выносных штанг (плоскости расположения WP1, WP2 и WP3). Блоки электроники BE FGM и BE MWC расположены на платформе КА.

Таблица 1

Массогабаритные характеристики составных частей MWC

86

Питание MWC осуществляется от бортовой сети напряжением 27 В, которое постоянно поступает в ВЕ MWC. Коммутация питания происходит внутри ВЕ MWC по командам, поступающим из системы сбора научной информации спутника (ССНИ).

Условная схема размещения составных частей комплекса представлена на Рис. 5. MWC позволяет измерять следующие ЭМ параметры ионосферы:

- вектор (три компоненты) квазипостоянного магнитного поля (FGM X, FGM Y и FGM Z);
- вектор (три компоненты) переменного магнитного поля (WP1 В, WP2 В и WP3 В);
- вектор (три компоненты) переменной составляющей плотности пространственного тока в плазме (WP1 I, WP2 I и WP3 I);
- постоянную составляющую величины потенциала корпуса КА (EP DC);
- переменную составляющую разности потенциалов между точками размещения:

EP и WP1 (сигнал E1),
 EP и WP2 (сигнал E2),
 EP и WP3 (сигнал E3),
 WP2 и WP3 (сигнал E4).

Последний набор данных с известной погрешностью даст нам также и вектор переменного электрического поля в косоугольной системе координат. Необходимые для его вычисления расстояния и углы могут быть найдены из рис. 5. Параметры измеряемых сигналов с указанием режимов измерения приведены в табл. 2.

В блоке электроники комплекса производится оцифровка аналоговых сигналов датчиков, управление их режимами работы, передача оцифрованных данных и служебной, телеметрической информации в ССНИ.

Состав телеметрической информации, которая передается от блока электроники MWC в ССНИ и в служебную систему КА в различных режимах, приведен в табл. 3, 4.

Измерение температуры проводится для повышения достоверности научных измерений, так как реальные значения температур на штангах могут выходить за пределы рабочих температур датчиков, что приводит к дополнительной погрешности измерений параметров ионосферы.

Для обеспечения синхронизации измерений преобразование аналоговых сигналов WP(1...3) В, WP(1...3) I, E1...E4 в цифровой код производится параллельно работающими независимыми каналами АЦП по команде «измерение». Так как частоты опроса сигналов FGM X...Z, T, EP DC, WP(1...3) T значительно ниже частот опроса других сигналов, преобразование их в цифровой код производится последовательно двумя АЦП в следующем порядке:

- FGM X, FGM Y, FGM Z, EP DC;
- WP1 T, WP2 T, WP3 T, FGM T.

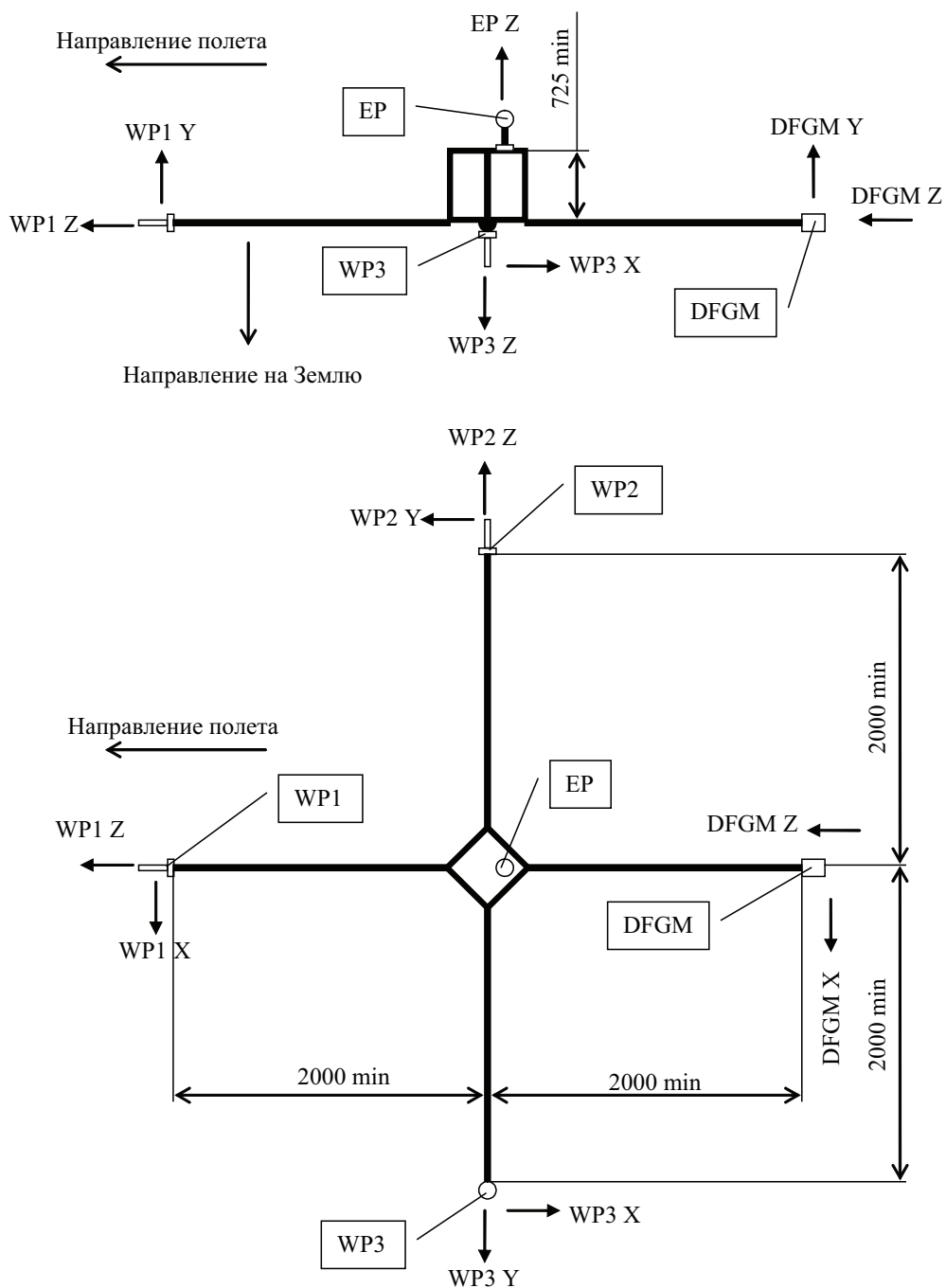


Рис. 5. Схема взаимного расположения датчиков комплекса MWC

режим М — 0.58;

Перечень и параметры сигналов, измеряемых блоком электроники MWC

Измеряемый сигнал	Частота измеряемого сигнала, Гц		Диапазон измерения	Максимальный уровень собственных шумов на частоте: — 1 кГц для сигналов WP B, WP I, E; — 1 Гц для сигналов EP DC, FGM, WP T	Разрядность АЦП	Частота опроса АЦП, Гц		
	минимальная	максимальная				Режим М	Режим S	Режим E
WP1 B WP2 B WP3 B E4 = WP2 U — WP3 U E1 = EP AC — WP1 U E2 = EP AC — WP2 U E3 = EP AC — WP3 U WP1 I WP2 I WP3 I EP DC FGM X FGM Y FGM Z WP1 T WP2 T WP3 T FGM T	0,1	20000	± 20 нТл ± 190 мВ ± 26 нА/ см² ± 3 В ± 65000 нТл от 243 до 363 К (от минус 30 до 90 °С)	0,1 пТл/√Гц 0,14 мкВ/√Гц 0,2 пА/(см² · √Гц) 0,14 мкВ/√Гц 15 пТл/√Гц Требования не предъявляются	16	500	30000	100000
	постоянная составляющая	2			24	5	5	5
	—	—			8			Не опрашиваются



Состав телеметрической информации, передаваемой МВС в ССНИ

Параметр	Обозначение сигнала	Вид сигнала	Режим, в котором передается информация
Наличие напряжения питания WP1	U WP1	Логический: «1» — есть напряжение; «0» — нет напряжения	После включения, Т
Наличие напряжения питания WP2	U WP2		
Наличие напряжения питания WP3	U WP3		
Наличие напряжения питания FGM	U FGM		
Наличие напряжения питания EP	U EP		
Напряжение «+ 5VD»	+ 5VD	Цифровой, 8 бит	Т
Ток потребления по цепи «+ 5VD»	I VD	Цифровой, 8 бит	Т
Температура WP1	WP1 T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед E
Температура WP2	WP2 T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед E
Температура WP3	WP3 T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед E
Температура DFGM	FGM T	Цифровой, 8 бит	Т, М, S, перед E
Напряжение «+ 3.3V»	+ 3.3V	Цифровой, 8 бит	Т
Напряжение «+ 5V» аналоговое	+ 5V	Цифровой, 8 бит	Т
Температура узла питания МВС	MWC T	Цифровой, 8 бит	Т
Состояние процессора BE МВС	VP MWC	Лог. «1» — норма; «0» — ошибка	Т
Состояние включения FGM	FGM ON	Лог. «1» — включен; «0» — выключен	После включения, Т, М, S, перед E
Режим работы FGM	MODE FGM	Лог. «1» — рабочий; «0» — тестовый	Т, М, S, перед E
Состояние генератора сигнала калибровки WP и EP	ON CALIBR	Лог. «1» — включен; «0» — выключен	Т, М, S, перед E
Режим работы каналов WP B	MODE B WP	Лог. «1» — рабочий; «0» — тестовый	Т, М, S, перед E
Режим работы каналов WP I	MODE I WP	Цифровой, 2 бита: «00» — команд не было; «01» — рабочий; «10» — тестовый; «11» — недопуст. знач.	После включения, Т, М, S, перед E
Режим работы EP	MODE EP	Цифровой, 2 бита: «00» — команд не было; «01» — рабочий; «10» — тестовый; «11» — недопуст. знач.	После включения, Т, М, S, перед E

режим МБ — 34.34;

режим Е — 114.45.

Тестовый режим (Т) предназначен для оценки работоспособности MWC при входном контроле, наземной отработке в составе КА и в полете. Продолжительность режима (без учета времени обработки информации) — 15 с. В режиме Т проводится:

- тестирование WP, EP и FGM;
- тестирование управляющего процессора MWC;
- формирование и передача в ССНИ телеметрической информации в соответствии с результатами тестирования.

Перейдем к описанию датчиков WP, EP и FGM, входящих в состав комплекса. Каждый из этих датчиков уже был опробован в условиях космического полета [10]. Остановимся лишь на их основных особенностях, учет которых необходим для правильной интерпретации результатов измерений в рамках данного проекта.

Датчики MWC

В состав датчиков комплекса MWC входят три волновых зонда WP, один электрический зонд EP и датчик магнитометра постоянного поля DFGM. Особенности установки этих датчиков на борту спутника описаны выше.

Волновой зонд WP был разработан в содружестве с Институтом космических исследований АН СССР (научный руководитель С.И. Климов) с целью исследования возможности совмещения измерения нескольких физических

Таблица 4

Состав телеметрической информации, передаваемой в ПДП КА

Параметр	Обозначение сигнала	Вид сигнала
Контрольный сигнал работоспособности процессора BE MWC	MWC.OK	Замыкание оптронного ключа на общий провод модуля телеметрии ПДП КА (COM TM): «замкнуто» — норма; «разомкнуто» — ошибка или процессор выключен
Контрольный сигнал наличия напряжения питания BE MWC	MWC.PW	Замыкание оптронного ключа на общий провод модуля телеметрии ПДП КА (COM TM): «замкнуто» — питание подано; «разомкнуто» — питание не подано
Контроль стыковки датчиков MWC	MWC.LINK	Замыкание цепи MWC.LINK на общий провод модуля телеметрии ПДП КА (COM TM): «замкнуто» — все приборы WP1, WP2, WP3, EP, DFGM и BE FGM подключены; «разомкнуто» — хотя бы один из приборов WP1, WP2, WP3, EP, DFGM и BE FGM не подключен

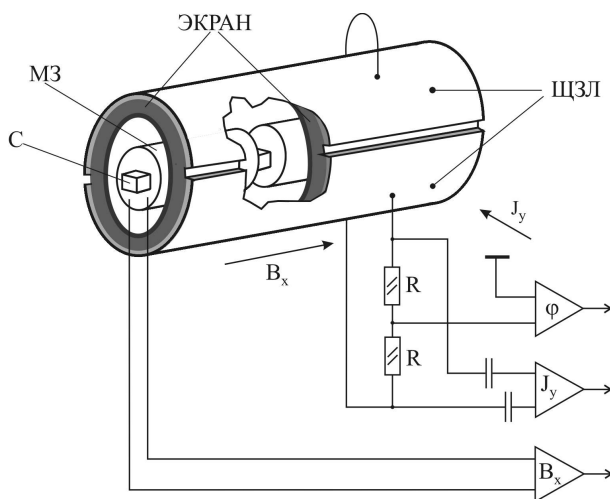


Рис. 7. Схема построения волнового зонда LEMI-602

величин — плотности пространственного тока, индукции магнитного поля и электрического потенциала — в одном приборе. Такая потребность возникла в связи с уменьшением размеров ИСЗ для научных исследований и, в особенности, необходимостью уменьшения количества штанг для установки датчиков на борту ИСЗ. Его общий вид и конструкция приведены на рис. 6 (см. на цветной вкладке) и 7 [11].

Как видно из схемы, в одном корпусе этого датчика находятся индукционный магнитометр, внешний экран которого выполнен разрезным и играет роль контактных пластин щелевого зонда Ленгмюра, успешно использованного ранее для измерения плотности пространственного тока на борту ИСЗ «Прогноз-8» [12]. В данной конструкции эти же пластины щелевого зонда используются как датчик электрического потенциала. Особенности работы волнового зонда рассмотрены в [11]. Как показала практика, в первом же эксперименте «Вариант» на борту спутника «Січ-1М» этот прибор показал достоверные результаты измерения всех трех величин в космической плазме — плотности пространственного тока, магнитной индукции и электрического потенциала [6].

К сожалению, в следующем эксперименте на борту микроспутника «Чибис-М» (запущен в январе 2012 г.), где также были установлены два волновых зонда, не удалось получить результаты измерения плотности пространственного тока, хотя величины магнитной индукции и электрического потенциала измерены этим прибором достаточно точно [13]. Это заставило провести модернизацию и повторные исследования токового канала волнового зонда — щелевого зонда Ленгмюра — с целью повышения его разрешающей способности. Такой модифицированный зонд прошел повторные испытания в плазменной камере Института технической механики НАНУ и ГКАУ при поддержке лабо-

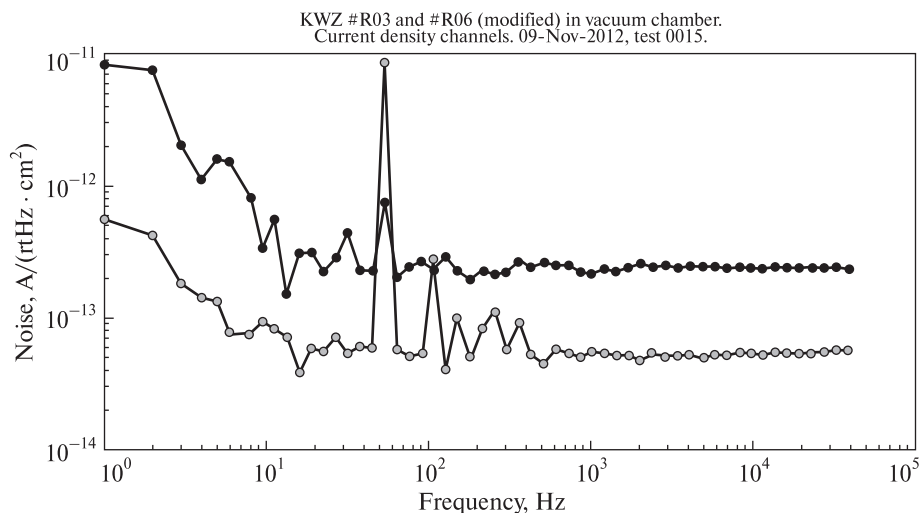


Рис. 8. Результаты испытаний щелевого зонда Ленгмюра в плазменной камере

ратории проф. В.А. Шувалова. Спектральная плотность шума для модифицированного (зеленая кривая) и немодифицированного (синяя кривая) вариантов щелевого зонда Ленгмюра в камере плазмодинамического стенда показана на рис. 8. Из графиков следует, что шум усовершенствованного варианта приблизительно в 4—5 раз ниже шума прежнего варианта щелевого зонда Ленгмюра. Сравнение достигнутой чувствительности щелевого зонда Ленгмюра с чувствительностью такого же прибора, показавшего хорошие результаты в эксперименте «Вариант» на спутнике «Сич-1М» [6], позволяет надеяться на получение надежных результатов измерений в будущем эксперименте.

Наиболее давно в практике экспериментальных космических исследований используется электрический зонд (ЕР). Его начальный вариант был построен в 1970-х гг. в ОКБ Института космических исследований АН СССР. В первом же эксперименте на борту спутника «Космос-484» впервые в мире с помощью этих зондов были получены достоверные результаты измерения всех трех компонент вектора электрического поля в ионосфере [12]. В дальнейшем, после тщательного анализа условий работы электрического зонда в ионосфере [14], удалось несколько уменьшить его размеры без ухудшения метрологических параметров, и в таком виде этот прибор постоянно используется в отечественных и зарубежных экспериментах (например, «Компас», «Потенциал», «Вариант»). Внешний вид электрического зонда LEMI-502, который будет использован в описываемом эксперименте, приведен на рис. 9 (см. на цветной вкладке).

Ввиду малого размера спутника и связанного с этим ограничения на количество штанг, а также учитывая положительный опыт использования волновых зондов для формирования измерительной базы напряженности электрического поля в эксперименте «Вариант» [10], принято решение применить похожую

схему расположения датчиков (см. рис. 5), при которой только в общей точке системы электрических датчиков установлен собственно электрический зонд, а в трех остальных точках для контакта с плазмой используются проводящие пластины волновых зондов WP. Такая конструкция, ввиду разной формы и разных условий обтекания отдельных датчиков, не может претендовать на качественные измерения постоянной компоненты вектора электрического поля, но для измерения переменных сигналов она успешно использовалась, что, в частности, подтвердилось и в эксперименте на спутнике «Чибис» [13].

Магнитометр постоянного поля LEMI-012 (рис. 10 на цветной вкладке) построен по схеме, аналогичной прибору ДМ1 эксперимента «Обстановка-1» на борту Международной космической станции, с использованием многолетнего опыта, накопленного в ЛЦ ИКИ в области создания низкошумящих феррозондовых магнитометров [15]. Основной его особенностью является одновременное снижение уровня шумов и потребляемой мощности, что крайне важно для космического эксперимента.

Сведения об уровне шумов (пороговой чувствительности), максимальном уровне регистрируемых сигналов и частотном диапазоне измерений всех описанных датчиков приведены в табл. 2.

Заключение

Программа научных исследований на борту КА «Ионосат-Микро» довольно разнообразна и, судя по приборному составу, может быть успешно выполнена. Важной особенностью этих исследований является их преемственность — после запуска первого ИСЗ планируется несколько последующих запусков с аналогичным приборным составом, что позволит решать поставленные задачи в их естественном развитии. Решение описанной здесь научной задачи, а также выполнение остальной программы исследований [9] возможны только в результате длительного мониторинга состояния ионосферы и в такой последовательности, когда полученные результаты корректируют параметры и состав приборного обеспечения последующего эксперимента.

Работа выполнена при поддержке ГКАУ, контракт 4-04/13.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф. Монография. — Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2012. — 555 с.
2. Bullough K., Kaiser R. *Strangeways, H.J.* Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — Dec., 1985. — V. 47. — P. 1211—1223.
3. Молчанов О. А. Низкочастотные волны и индуцированные излучения в околоземной плазме. — Москва: Наука, 1985. — 224 с.
4. Parrot M. World map of ELF/VLF emissions as observed by low-orbiting satellite // *Annales Geophysicae*. — 1990. — V. 8. — P. 135—145.

5. Rothkaehl H., Parrot M. Electromagnetic emissions detected in the topside ionosphere related to the human activity // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics — 2005. — V. 67, Issue 8—9. — P. 821—828.
6. Dudkin F., Korepanov V., Lizunov G. Experiment VARIANT — first results from wave probe // Adv. Space Res. — 2009. — V. 43, № 12. — P. 1904—1909.
7. Parrot M., Zaslavski Y. Physical mechanisms of manmade influences on the magnetosphere // Surveys in Geophysics. — 1996. — V. 17, № 1. — P. 67—100.
8. Row R.V., Mentzoni M. H On D-region Electron Heating by a Low-Frequency Terrestrial Line Current With Ground Return // Radio Science. — 1972. — V. 7, Issue 11. — P. 1061—1066.
9. Лизунов Г.В., Лукенюк А.А., Макаров А.Л., Фёдоров О.П. Космический проект Ионосат-Микро: цели и методы // Космический проект «Ионосат-Микро». — К. : Академперіодика, 2013. — С. 11—25.
10. Корепанов В.Є., Крючков Є.І., Лізунов Г.В., Федоренко А.К., Дудкін Ф.Л. Експеримент «Варіант» на супутнику «Січ-1М» — Перші результати // Космічна наука і технологія. — 2007. — Т. 13, № 4. — С. 10—17.
11. Korepanov V., Dudkin F. Comparative Analysis of Current Density Meters Operating in Space Plasmas // Adv. Space Res. — 1999. — 23, № 8. — P. 1541—1544.
12. Агарков В.Ф., Антонов Н.М. и др. Измерение вектора напряженности постоянного электрического поля на спутнике «Космос-484» // Космические исследования. — 1977. — Т. XV, Вып. 1. — С. 94—101.
13. Климов С.И., Вавилов Д.И., Готлиб В.М., Долгоносков М.С., Каредин В.Н., Новиков Д.И., Корепанов В.Е., Дудкин Ф.Л., Ференц Ч., Боднар Л. Исследование ионосферной электромагнитной активности на микроспутнике «Чиби́с-М» // 8-я Ежегод. конф. «Физика плазмы в Солнечной системе». — 4—8 февраля 2013. — Москва. — Сборник тезисов. — С. 61.
14. Сопрунюк П.М., Климов С.И., Корепанов В.Е. Электрические поля в космической плазме. — Киев: Наукова думка, 1994. — 190 с.
15. Korepanov V., Marusenkov A. Flux-Gate Magnetometers Design Peculiarities // Surveys in Geophysics. — September 2012. — V. 33, Issue 5. — P. 1059—1079.