

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОГО НАУЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Ф.Л. Дудкин¹, С.И. Климов², В.Е. Корепанов¹, А.А. Марусенков¹,
А.Е. Сухинюк¹

¹ Львовский центр Института космических исследований
НАНУ-НКАУ, Украина

² Институт космических исследований РАН, Россия

В данной работе представлено состояние развития электромагнитных (ЭМ) датчиков для микроспутников, созданных в Львовском центре Института космических исследований (ЛЦ ИКИ НАНУ-НКАУ). Комплект ЭМ-датчиков включает следующие устройства.

Феррозондовые магнитометры (ФЗМ). Достигнуто уменьшение массы и потребления мощности спутниковых версий ФЗМ. Научная и технологическая проработка позволила уменьшить шум ФЗМ до уровня 1 пТ. Также был разработан новый ФЗМ для магнитной ориентации микроспутников. В нем использованы компоненты промышленного типа и приняты специальные меры для увеличения его надежности.

Индукционные магнитометры (ИМ). Был создан суперлегкий ИМ нового типа, имеющий более пяти декад рабочего частотного диапазона с верхней границей до 1 МГц и минимальным уровнем шума в несколько фемтотесла. Общая масса одной из моделей ИМ составляет менее 70 г вместе с электроникой.

Электрические зонды (ЭЗ). Разработаны и успешно опробованы два типа ЭЗ уменьшенных габаритов с нижней границей частотного диапазона 0,1 и 0 Гц.

Волновой зонд (ВЗ). ВЗ является инструментом нового поколения, который объединяет в одном датчике три независимых датчика: ИМ, ЭЗ и щелевой зонд Ленгмюра (ЩЗЛ). Такая комбинация позволяет создать принципиально новый инструмент — волновой зонд.

Ниже описаны все эти типы космических датчиков и представлены их параметры.

Введение

Современный этап космических исследований характеризуется постоянным сокращением финансовой поддержки научных исследований даже в ведущих странах, что привело к развитию мини-, микро- и наноспутников с низкой стоимостью и коротким временем подготовки. В свою очередь, это стимулировало создание нового поколения бортовых научных приборов с низкими массой и потребляемой мощностью, но с высоким уровнем метрологических параметров.

Последние достижения в электронике, особенно в технологии производства интегральных схем, позволяют, в основном, удовлетворить новым требованиям при создании блоков сбора и обработки данных. Намного сложнее обстоит дело с датчиками физических величин: попытка их миниатюризации с одновременным повышением уровня метрологических параметров нуждается в привлечении достижений также в материаловедении, производственных технологиях и, конечно, требует серьезного теоретического обоснования.

Данная работа описывает основные результаты теоретических и экспериментальных исследований в области создания бортовых ЭМ-датчиков для малых космических аппаратов. Приводятся параметры выпускаемых датчиков.

1. Феррозондовые магнитометры

Среди различных типов магнитометров, используемых для измерения постоянного и низкочастотного магнитных полей, ФЗМ оказываются наиболее пригодными для получения высоких результатов при относительно низкой стоимости. Они используются практически в каждом космическом аппарате либо для ориентации, либо для научных целей.

Последние достижения в технологии конструирования и производства ФЗМ-датчиков, и особенно в материаловедении, позволили значительно уменьшить их уровень шума. Особенности создания ФЗМ с низким уровнем шума обсуждались в деталях в наших предыдущих статьях [4, 7] и здесь приведены только основные выводы.

В результате как теоретических, так и экспериментальных исследований было показано, что шум ФЗМ и особенно ста-

бильность нулевой линии значительно зависят от режима возбуждения феррозондового датчика. Был предложен новый режим феррорезонансного возбуждения [7], который позволяет, потребляя низкую мощность по цепи возбуждения, реализовать глубокое насыщение сердечника датчика, создавая магнитное поле в его объеме в несколько миллитесла. В экспериментальном ФЗМ-датчике с сердечником типа рейс-трэк и потреблением мощности всего в 10 мВт был получен рекордный уровень шума около 1 пТ на 1 Гц (рис. 1, кривая с треугольниками). Обычный уровень шума магнитометров, производимых в ЛЦ ИКИ для различного применения, дан на рис. 1 (пространство, ограниченное кривыми с заштрихованными и незаштрихованными кружочками).

Также были выведены некоторые важные зависимости шума ФЗМ, например, обратно-пропорциональная зависимость уровня шума от объема сердечника. К сожалению, это не подтверждено другими исследователями. По нашему мнению, это происходит потому, что устранить все дополнительные помехи и воспроизвести те же самые условия измерений в объеме сердечника — очень сложная задача. Другой экспериментально найденный факт — зависимость уровня шума от длины сердечника. В результате этих исследований была получена полуэмпирическая зависимость для уровня шума ФЗМ:

$$h_F = C_F \left[1 + (f_0 / f)^\alpha \right] \cdot l^{-3}, \quad (1)$$

где $C_F \sim 5 \cdot 10^{-28} \text{Т}^2 \text{ м}^3 \cdot \text{Гц}^{-1}$; l — длина сердечника датчика; f — частота измеряемого сигнала; f_0 — угловая частота, при которой график зависимости плотности шума от частоты переходит от плоской части к части с наклоном $\sim 1/f^\alpha$; α — угол наклона графика шума ниже угловой частоты. Было получено, что нормальное значение величины α , равное единице для этой части графика шума (например, шумовые кривые для магнитометров OERSTED и ULYSSES на рис. 1), иногда равно 0,8 для магнитометров LEMI (см. рис. 1, заштрихованные и незаштрихованные кружочки). Также с целью снижения массы КА изучалась возможность использования только ФЗМ для управления ориентацией спутника. Была разработана система магнитной ориентации и стабилизации и создан новый магнитометр для системы ориентации — LEMI-010S [2]. В нем используются компоненты

промышленного типа и приняты специальные меры для увеличения его надежности: защита оборудования от радиации, горячее и холодное резервирование. Этот магнитометр имеет также достаточно низкий уровень шума, несмотря на моноблочную конструкцию (см. рис. 1, заштрихованные кружочки), что позволяет использовать одновременно его показания для научных целей.

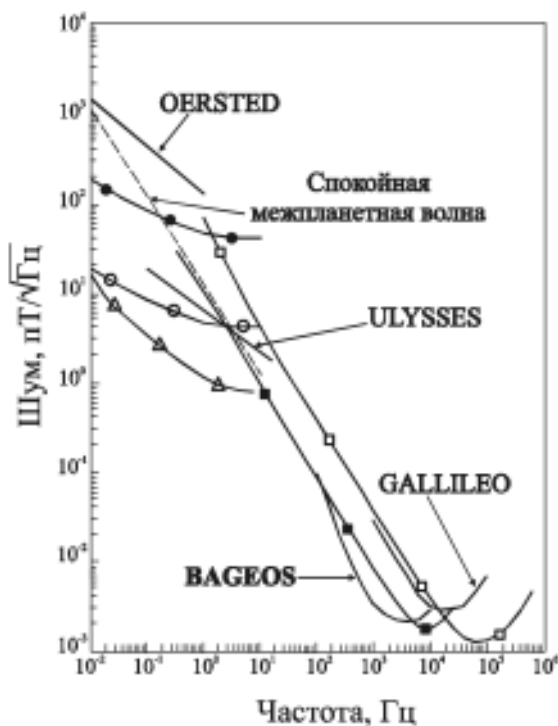


Рис. 1. Сравнение уровней шума космических магнитометров (ФЗМ и ИМ)

В настоящее время во всем мире интенсивно разрабатывается вариант полного цифрового ФЗМ. Одна из наилучших реализаций цифрового ФЗМ для космических исследований предложена специалистами из Института Макса Планка по внеземной физике (г. Линдау) [1], которым удалось значительно уменьшить его массу и потребление. Были проанализированы особенности

работы цифрового ФЗМ и показано, что, несмотря на кажущееся удобство и преимущества цифровой структуры, параметры ФЗМ с аналоговой обработкой сигнала в измерительном тракте всегда будут лучше, чем у цифрового [9].

В качестве иллюстрации высокого уровня параметров, достигнутого в космических магнитометрах, на рис. 2 дана стабильность нулевой линии аналогового магнитометра MIF-M на протяжении пяти лет функционирования космического аппарата INTERBALL-TAIL.

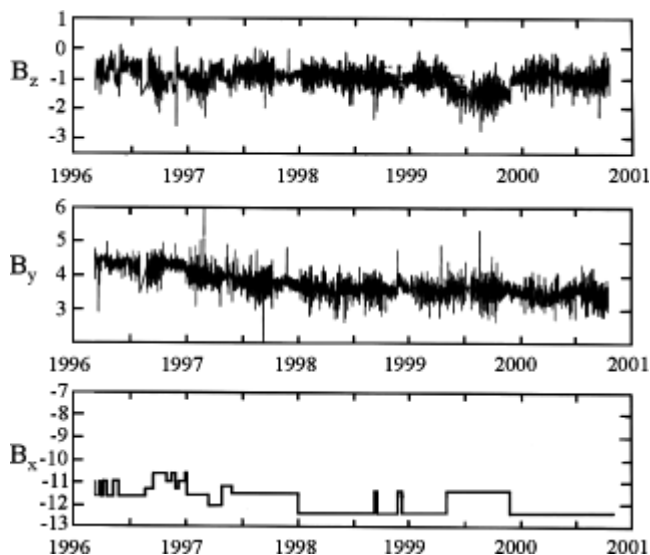


Рис. 2. Стабильность нулевой линии ФЗМ MIF-M в течение 5 лет

2. Индукционные магнитометры

Индукционные магнитометры широко используются для изучения волновых процессов в космической плазме. Попытки разработки малощумящих ИМ сталкиваются с серьезными методологическими и расчетными проблемами. Несмотря на кажущуюся простоту ИМ, расчет его уровня шума требует учета одновременно большого комплекса параметров — только для датчика должны включаться более чем 30 геометрических и электрических величин. Очевидно, что решение соответствующей системы

уравнений или перебор различных комбинаций для того, чтобы выбрать оптимальную конструкцию, не возможны.

Для решения этой проблемы была разработана новая методика расчета уровня шума ИМ. Она основана на введении так называемых «обобщенных параметров» — некоторых промежуточных величин, которые остаются постоянными в широких пределах вариации требуемых параметров [8]. Эта методика показала высокую эффективность: разброс рассчитанных и полученных после изготовления ИМ-параметров был в пределах отклонения параметров для одной партии изготовленных ИМ и никогда не превышал 10 %. Более того, полученные результаты значительно отличаются от обычно принятых рекомендаций, прежде всего, в части влияния величины относительной магнитной проницаемости материала магнитного сердечника. В частности, выведенная зависимость для шума W_B (в единицах индукции) высокочастотных ИМ с оптимальной длиной

$$W_B \equiv (f \mu M)^{-1} \quad (2)$$

показывает, что увеличение относительной магнитной проницаемости материала сердечника μ позволяет уменьшать массу сердечника M или, другими словами, что M и μ — эквивалентные параметры. Это, в частности, показывает, что использование ферритовых сердечников с низким μ в бортовых ИМ не эффективно. Также было найдено, что для ИМ с минимальной массой рекомендуется сильно вытянутая «карандашная» конструкция. При этом можно избежать возможного насыщения сердечника во внешнем постоянном магнитном поле H_e , если магнитная проницаемость формы сердечника будет подчиняться выражению

$$\mu_s < B_s / H_s, \quad (3)$$

где B_s — индукция насыщения материала сердечника, μ_s — магнитная проницаемость формы сердечника.

Конструкция обычных ИМ предусматривает изготовление датчика и предусилителя как отдельных блоков, что препятствует уменьшению массы. Чтобы полностью реализовать преимущества предложенной конструкции ИМ, была также разработана новая технология изготовления, которая позволила создавать суперлегкий моноблочный магнитометр LEM1-106: ИМ длиной

0,5 м имеет общую массу около 70 г, включая встроенный преусилитель. График его плотности шума дан на рис. 1 (незаштрихованные квадраты). Шум укороченной версии LEMI-106Н (длинной 0,22 м) здесь также показан (заштрихованные квадраты). Для сравнения на рис. 1 даны графики плотности шума лучших бортовых ИМ для экспериментов GALLILEO и BAGEOS, там же приведен для справки самый низкий уровень магнитного сигнала при космических исследованиях — спектр спокойной межпланетной волны [14].

Естественно, что в соответствии с их физическим принципом действия чувствительность ИМ пропорциональна частоте измеряемого сигнала. Поэтому они наиболее широко используются для исследования магнитных флуктуаций. Чувствительность ФЗМ фактически постоянна, что определяет их применимость для измерения постоянного и медленно изменяющегося магнитных полей. Но имеется некоторая промежуточная полоса — приблизительно от 0,01 до 10 Гц — где выбор типа магнитометра не столь легок, как это могло бы казаться. По нашему мнению, наиболее важный параметр, который рекомендуется использовать для выбора типа магнитометра, — это пороговая чувствительность или уровень собственного шума ФЗМ либо ИМ. Эта величина по-разному зависит от практических ограничений массы и размера (иногда и от потребляемой мощности).

Для оценки и сравнения эффективности обоих типов магнитометров было получено следующее обобщенное полуэмпирическое выражение для плотности шума ИМ в низкочастотной области подобно выражению (1) для ФЗМ:

$$h_S = h_0 [1 + A/(\bar{f}^2 f^2) + B/(\bar{f}^4 f^4)], \quad (4)$$

где $h_0 \sim 10^{-28} \text{Г}^2/\text{Гц}$, $A \sim 30 \text{ м}^5 \text{Гц}^2$, $B \sim 10^{-4} \text{ м}^5 \text{Гц}^4$.

Было показано также, что это выражение не имеет силы для сигнала с частотой выше собственного резонанса ИМ, но для нашей проблемы низкочастотной оптимизации оно приемлемо. Следует также учесть, что хорошие результаты использования этой формулы получаются только для должным образом оптимизированных ИМ: если оптимизация не корректна, может случиться, что реальный шум будет намного больше, чем рассчитанный по формуле (4). Таким образом, приведенная оценка уровня шума должна рассматриваться как самый низкий теоре-

тически возможный уровень шума ИМ данной длины в низкочастотном диапазоне.

Сравнение полученных кривых шума ФЗМ и ИМ, выведенных из уравнений (1) и (4) для практически применимых размеров датчиков, дано на рис. 3. С его помощью можно делать надлежащий выбор типа магнитометра согласно имеющимся ограничениям и необходимой разрешающей способности. Как уже упоминалось, выражения (1) и (4) могут иметь более существенное практическое применение, потому что они дают самый низкий теоретически возможный уровень шума для датчика с данной длиной и, сравнивая результаты расчета с экспериментально полученными шумовыми параметрами, можно получить оценку качества ФЗМ или ИМ.¹

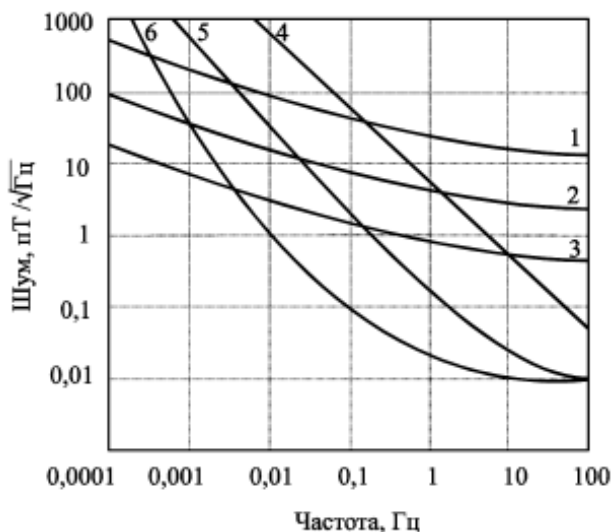


Рис. 3. Сравнение шума ФЗМ (1, 2, 3) и ИМ (4, 5, 6) в ультранизкочастотном диапазоне. Длины сердечников: 15 мм (1), 45 мм (2), 150 мм (3), 150 мм (4), 450 мм (5), 1500 мм (6)

¹ Более подробно технические параметры ФЗМ и ИМ разработки ЛЦ ИКИ см. на сайте <http://www.isr.lviv.ua>

3. Датчики электрического поля

Между способами достижения максимально возможной чувствительности измерений магнитного и электрического полей на борту спутников имеется принципиальная разница. Шум при измерениях магнитного поля ограничен, главным образом, уровнем разработки электронной схемы и качеством используемых магнитных материалов, а методологические проблемы измерения являются вторичными. При измерении электрического поля с помощью ЭЗ, погруженного в космическую плазму, главной проблемой становится методика измерений, которая и определяет, в основном, качество полученных результатов, а шум, вносимый электронными приборами, является вторичным. Взаимодействие ЭЗ с космической плазмой в различных условиях детально изучалось многими авторами (например, [6, 12, 13]). Показано, что полезный сигнал — потенциал ЭЗ — сильно зависит не только от потенциала плазмы в данной точке, но и от многих других локальных параметров: плотности и состава плазмы, магнитного поля, фотоэффекта, потенциала космического корабля и т. д. Именно эти эффекты и умение экспериментатора преодолевать их влияние и ограничивают порог чувствительности. Принимая во внимание обзорный характер настоящей работы, методологические вопросы здесь не будут проанализированы должным образом. Приведем только некоторые соображения относительно проектирования ЭЗ.

Прежде всего, нижний предел уровня шума ЭЗ определяется активным сопротивлением между двумя зондами, погруженными в космическую плазму. Это сопротивление, в первую очередь, определяется так называемым сопротивлением растекания R_p для ЭЗ, погруженного в плазму. Для малых ЭЗ сопротивление растекания зависит, в основном, от площади его контакта с плазмой, т. е. площадь поверхности малого зонда определяет нижний предел шума ЭЗ. Этот шум будет усиливаться в K_n раз входным усилителем, ко входу которого подсоединен зонд. Для должным образом сконструированного усилителя коэффициент усиления шума $K_n < 2$ дБ. Таким образом, нижний предел плотности шума $u_{ш}$ ЭЗ может быть оценен по известной формуле:

$$u_{ш} = K_n \sqrt{kTR_p}. \quad (5)$$

Изучение условий работы зонда на ионосферных высотах позволило уменьшить размеры ЭЗ и создать комплект зондов LEMI-501 и 502 с нижней рабочей частотой от 0,1 и 0 Гц, соответственно, до ≈ 200 кГц с массой < 140 г, включая электронику [16].

Далее, чтобы получить высокую разрешающую способность измерений электрического поля E как

$$E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{l}, \quad (6)$$

где Φ_1 и Φ_2 — электрические потенциалы первого и второго ЭЗ, расстояние l следует выбирать настолько большим, насколько позволяют ограничения космического аппарата. Например, один из лучших уровней разрешений был получен в эксперименте CLUSTER, где конструкция штанг позволила получить $l \approx 100$ м: в частотном диапазоне 50–8000 Гц достигнутое разрешение составило около 0,15 мкВ/м [5].

4. Волновой зонд

При экспериментальных исследованиях волновых процессов в космической плазме одной из основных задач является определение дисперсионного отношения для волнового вектора. Было показано [15], что для этого достаточно одновременно измерить ортогональные компоненты вариаций магнитного поля и плотности тока. Флуктуации магнитного поля успешно измеряются индукционными магнитометрами. К сожалению, до настоящего времени нет надежных измерений плотности тока в плазме, хотя были предприняты некоторые попытки таких измерений с помощью шелевого зонда Ленгмюра [3], которые не дали надежного результата. Вместе с коллегами из ИКИ РАН нами был разработан прибор, объединяющий ИМ и ЩЗЛ и названный волновым зондом (ВЗ). Реализация ИМ была описана ранее. Принцип действия ЩЗЛ довольно прост: две проводящие пластины размещены в космической плазме как можно ближе друг к другу на расстоянии d и связаны резистором R_p (рис. 4).

Выходной сигнал U ЩЗЛ формируется следующим образом:

$$U = IR_p = JSR_p, \quad (7)$$

где S , см², — поверхность одной пластины ЩЗЛ; J , А/см², — плотность пространственного тока; I , А, — ток через эквивалент

тное сопротивление R_p -зонда. Далее напряжение U с выхода ШЗЛ поступает на вход предусилителя и при прочих стабильных параметрах служит мерой J .

К сожалению, из-за очень сложного теоретического обоснования, до настоящего времени не имеется надежного подтверждения, что настолько простая конструкция работает должным образом. Здесь также электрическая цепь и механическая конструкция не являются факторами, ограничивающими предел измерений. Простые вычисления показывают, что уровень шума для датчика приемлемого размера может быть $\sim 10^{-13}$ А/см², что вполне достаточно для любых экспериментальных исследований плотности тока [10]. Исследования, выполненные в настоящее время в ЛЦ ИКИ, позволили теоретически подтвердить правильность этого метода только в приближении плазмы без магнитного поля. Получено следующее значение для коэффициента передачи ШЗЛ:

$$K = UJ^{-1} = K_p(1 + R_i R_p^{-1})^{-1} (1 + (\omega\tau)^2)^{-0.5} \exp(j\varphi), \quad (8)$$

где $K_p = SR_p$, $\tau = CR$, $R = R_i(1 + R_i R_p^{-1})^{-1}$, $C = C_i + C_p$, $\varphi = -\arctg(\omega\tau)$, R_p , C_p — эквивалентные сопротивление и емкости ШЗЛ, R_i , C_i — входные сопротивление и емкость усилителя.

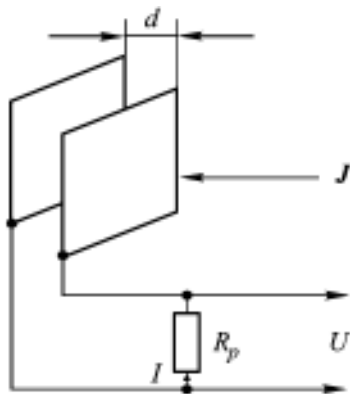


Рис. 4. Схема щелевого зонда Ленгюра

Выражение для полного сопротивления ШЗЛ, которое главным образом определяет величину K , представляет собой сложную зависимость от параметров плазмы. Численная оценка для

нормированного коэффициента передачи $|K_n| = K/K_p$ позволила построить амплитудно-частотную характеристику ЩЗЛ (рис. 5), которая доказывает, что ЩЗЛ действительно работает как преобразователь плотности тока в напряжение.

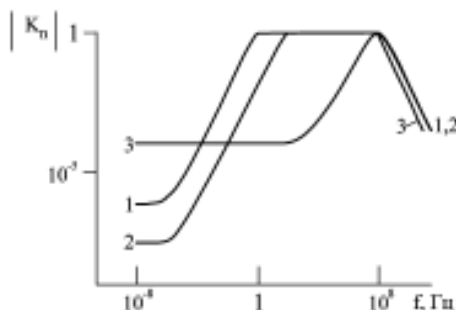


Рис. 5. Передаточная функция щелевого зонда Ленгмюра

Эти зависимости даны для трех различных величин электронной плазменной частоты $f_{pe1} \ll f_{pe2} \ll f_{pe3}$; кривые 1 и 2 — для плазмы солнечного ветра, кривая 3 — для ионосферного F-слоя (см. рис. 5).

Опытный образец ЩЗЛ был испытан на борту спутника «Прогноз-10», и полученные результаты хорошо согласовывались с модельными и теоретическими оценками [15]. Это дает надежду, что ВЗ как новый инструмент для изучения параметров космической плазмы будет реализован в скором времени. Первые экспериментальные испытания ВЗ в космосе запланированы в рамках эксперимента «Вариант» [11] на борту Украинского спутника «СІС-1М» (запущен в конце 2004 г.).

Заключение

Данный обзор современного состояния развития ЭМ-датчиков для микроспутников показывает, что сенсорика оперативно отвечает на изменение ситуации в космических исследованиях. Следующие шаги по миниатюризации космических аппаратов — создание нано- и особенно пикоспутников — наиболее вероятно предъявят принципиально новые требования к научной аппаратуре. Дальнейшая миниатюризация датчиков, как ожидается,

будет неэффективной, поскольку физические размеры — длина, площадь поверхности — являются факторами, ограничивающими порог чувствительности. Наиболее вероятно, что появится новая методика измерения: либо будет принята узкая специализация спутника (один спутник — один датчик), либо должны быть разработаны виртуальные инструменты, сформированные группой пикоспутников. Ближайшее будущее покажет, как эти возможности будут реализованы.

Данная работа выполнена в рамках контракта 1-02/03 (1274) с Национальным космическим агентством Украины.

Литература

1. *Auster H.* et al. Concept and first results of a digital fluxgate magnetometer // *Meas. Sci. Technol.*. 1995. V. 6. P. 477–81.
2. *Belyayev S.* et al. Satellite magnetic orientation and stabilization system // 3rd Intern. Symp. of the Intern. Academy of Astronautics (IAA) “Small Satellites for Earth Observation”. Berlin. April 2–6, 2001 . P. 407–410.
3. *Bering E.A.* et al. Theory and operation of the split Langmuir probe // *Planet. Space Sci.* 1973. V. 21. No. 11. P. 1983–2001.
4. *Berkman R.* Theoretic and experimental investigation of flux-gate magnetometer noise // *Proc. of IMEKO-XV World Congress.* Osaka, Japan. June 13–18, 1999. P. 149–156.
5. *Gustafsson G.* et al. The electric field and wave experiment for the CLUSTER mission // *Space Science Reviews.* 1997. V. 79. P. 137–156.
6. *Корепанов В.Е.* Оценка погрешности измерения напряженности постоянного электрического поля методом двойного зонда Ленгмюра // *Космич. исслед.* 1982. Т. 20. Вып. 5. С. 690–699.
7. *Korepanov V.* et al. Advanced flux-gate magnetometer with low drift // *XIV IMEKO World Congress «New measurements — challenges and visions».* Tampere. Finland. 1997. V. IVA. P. 121–126.
8. *Korepanov V., Berkman R.* New approach to the exact design of low noise search-coil magnetometers // *XIV IMEKO World Congress «New measurements — challenges and visions».* Tampere. Finland. 1997. V. IVA. P. 103–108.
9. *Korepanov V., Berkman R.* Digital flux-gate magnetometer structural analysis // *Meas. Sci. Technol.* 1999. V. 10. P. 734–737.
10. *Korepanov V.E.* Three independent techniques to study spatial current density // 2nd Intern. Symp. of the Intern. Academy of Astronautics (IAA) “Small Satellites for Earth Observation”. Berlin. 1999. P. 235–238.

11. *Korepanov V.* et al. Project VARIANT: current and field measurements on board SICH-1M satellite // *Adv. Space Res.* 2000. V. 25. N. 7–8. P. 1337–1342.
12. *Козлов О.В.* Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.
13. *Mozer F.S.* Analysis of techniques for measuring DC and AC electric fields in magnetosphere // *Space Science Reviews.* 1973. V. 14. N. 2. P. 272–313.
14. *Russel Ch.* Comments on the measurement of power spectra of the interplanetary magnetic field. *Solar Wind.* NASA sp-308, 1972. P. 365–374.
15. *Вайсберг О.Л., Климов С.И., Корепанов В.Е.* Измерение плотности тока на ударной волне шелевым зондом Ленгмюра // *Космич. исслед.* 1989. Т. 24. Вып. 3. С. 623–627.