ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ВЫПУСК 34, 40 – 48, 2022

Поступила в редакцию 16.05.2022 г.
Опубликована 29.05.2022 г.

ISSN 2304-7380

УДК: 550.380:520.6.05

ОБЗОР КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С МАГНИТОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРОЙ

А.А. Брагина[1], Д.А. Арутюнян[1], В.Т. Минлигареев[1]

[1]*Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Москва, Россия*

В статье рассмотрены зарубежные и отечественные космические системы (КС) гелиогеофизического назначения. Произведен анализ используемой магнитометрической аппаратуры и сравнение их технических и метрологических характеристик. Определены перспективные направления для развития КС и бортовой магнитометрической аппаратуры.

Ключевые слова: гелиогеофизические исследования, космические системы (КС), космические аппараты (КА), магнитометрическая съемка, магнитное поле земли (МПЗ), космическая погода, магнитометрическая аппаратура, опасные гелиогеофизические явления (ОГЯ).

DOI 10.5425/2304-7380_2022_34_40

https://elibrary.ru/tghtyf

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопрос дистанционного зондирования Земли, гелиогеофизических наблюдений (космическая погода), мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) и гелиосферы достаточно актуален. При возрастающих угрозах космической погоды, ОГЯ необходимы исследования и мониторинг солнечной активности, возмущений МПЗ, включая влияние геомагнитных бурь и суббурь на технические средства и системы, включая связь, навигацию и позиционирование.

Наблюдения последних десятилетий показывают, что из совокупности ОГЯ - геомагнитные возмущения приносят максимальный ущерб. В 2025 году ожидается очередной 25-й 11-летний цикл солнечной активности. По опыту наблюдений за космической погодой, в такие периоды возможны мощные проявления ОГЯ. Например, такие как «Событие Кэррингтона» 1859 г. или «Квебекское событие» 1989 г., принесшие значительный материальный ущерб в масштабах планеты. «Квебекское событие» произошло из-за сильной геомагнитной бури, вызванной вспышкой на Солнце (группа пятен № 101 по каталогу Пулковской обсерватории). Максимальной интенсивности геомагнитная буря достигла 13 марта 1989 г., когда планетарный индекс Ар достиг значения 246, третьего за всё время наблюдений с 1932 года. Dst-индекс геомагнитной активности 14 марта достиг значения − 589 нТл, рекордного с 1957 года. Особенно масштабные сбои произошли в энергосистеме канадской провинции Квебек (за что буря и получила своё название). Произошли также нарушения высокочастотной радиосвязи во всем мире, сбои в работе космических аппаратов (КА); полярные сияния во время

Электронная почта авторов для переписки:

Арутюнян Давид Артурович, e-mail: david-20.97@mail.ru

Адрес редакции журнала «Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

магнитной бури наблюдались до широты Мексики. Поток заряженных частиц проник в атмосферу Земли через авроральный овал. В тот момент магнитный полюс находился над северной частью Канады. Так как в настоящее время северный магнитный полюс (СМП) дрейфует в сторону полуострова Таймыр, то безусловно необходимы точные прогнозы ОГЯ над территорией Российской Федерации.

Анализируя опыт предыдущих лет, важно предотвращение, минимизация ущерба от воздействия ОГЯ в будущем с помощью наземных и космических наблюдательных платформ.

Несмотря на то, что на данный момент существует множество различных КС гелиогеофизического назначения, как зарубежных, так и отечественных, разработка и создание новых систем, с более качественными и многофункциональными приборами, остается перспективным направлением. Особый интерес представляют КА с магнитометрической бортовой аппаратурой, необходимой для наблюдения и прогнозирования космической погоды, а также для изучения структуры МПЗ.

2. КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «SWARM»

2.1 Общие характеристики

Специализированная КС SWARM является первым проектом Европейского космического агентства ESA. Целью проекта является магнитометрические исследования Земли и ОКП. Запуск КС был произведён 22 ноября 2013 г., с космодрома Плесецк на российской ракете-носителе «Рокот», являющейся модернизацией баллистической ракеты РС-18Б (классификация НАТО SS-19 mod.2 Stiletto). Проект является активным и по сегодняшний день. КС SWARM представляет собой группировку, состоящую из трёх спутников (Альфа (A), Браво (B), Чарли (C)), расположенных на круговой орбите (рис. 1). Наклонение - 87,4° (A, C); 88° (B), высота орбиты – 460 км (A,C); 530 км (B).

Целью проекта SWARM является исследования и высокоточные инструментальные измерения МПЗ и его изменения с течением времени. Перед КС SWARM поставлены следующие научные задачи:

- Наблюдение за МПЗ и его взаимодействием с солнечным ветром.
- Исследование различных вариаций МПЗ, от земного ядра, земной коры, мантии, океанов, ионосферы.
- Накопление измерительной информации для построения мировых моделей главного МПЗ IGRF, WMM и др.
- Для выполнения поставленных задач на борту КА A,B,C установлена следующая аппаратура:
- абсолютный скалярный магнитометр ASM (Absolute Scalar Magnetometer);
- трёхкомпонентный векторный магнитометр VFM (Vector Field Magnetometer);
- измеритель электрического поля EFI (Electric Field Instrument);
- акселерометр ACC (Accelerometer);
- лазерный дальномер LRR (Laser Range Reflector).
- Магнитометры обеспечивают высокое качество и хорошую точность измерений МПЗ [1]. Подробные характеристики основных магнитометров приведены ниже.

2.2 Скалярный магнитометр ASM

На рисунке 2 изображен абсолютный скалярный магнитометр ASM. Работа прибора основана на принципе электронного спинового резонанса и использует эффект Зеемана. Основу магнитометра ASM составляет квантовый датчик, работающий на методе оптической накачки. В качестве газа используются пары гелия низкого давления. Прибор использует высокочастотный разряд в газовой ячейке для возбуждения атомов гелия. Это способствует их переходу из основного состояния в метастабильное. Полученное метастабильное состояние разделяется магнитное поле на три подуровня Зеемана. Это разделение прямо пропорционально напряженности измеряемого магнитного поля [2].

Рис. 1. Космическая система SWARM [https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm]

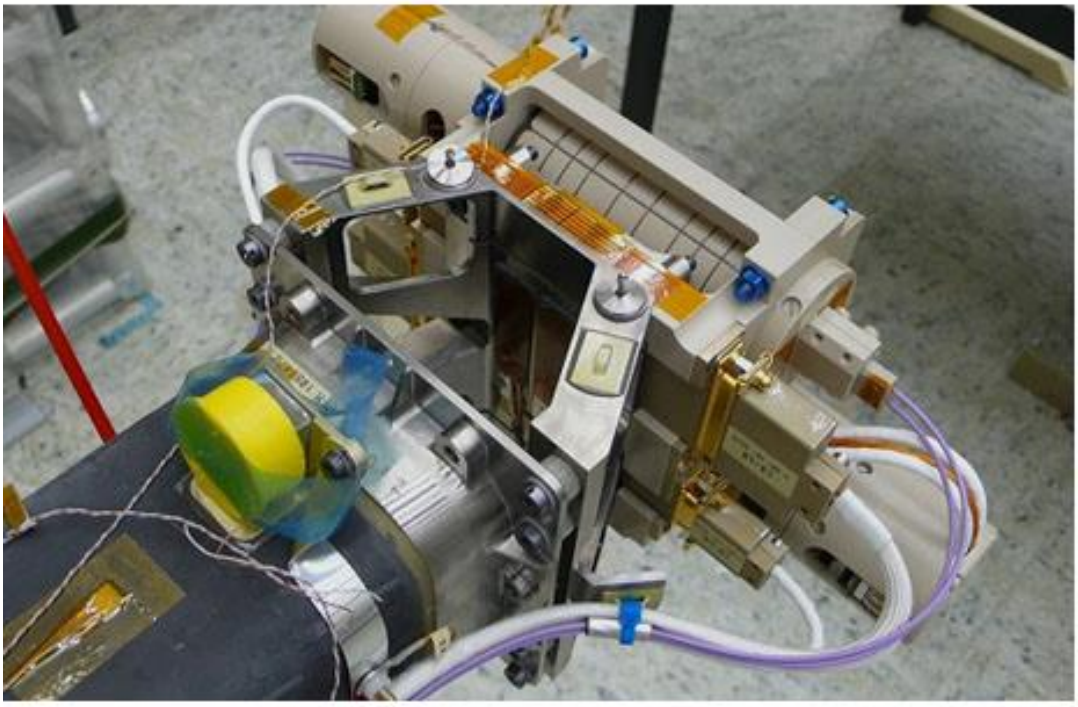

Рис. 2. Абсолютный скалярный магнитометр ASM

Использование этого принципа позволяет магнитометру определять напряженность магнитного поля с высокой чувствительностью, которая остается одинаковой во всех точках орбиты. ASM работает с линейно поляризованным светом вместо света с круговой поляризацией. Так исключается эффект световых сдвигов при отклонении длин волн накачки и перехода гелия в другое состояние. Лазерный модуль использует систему длиной волны 1083 нм, которая подключена к датчику через оптическое волокно. Используется особенный волоконный лазер, снижающий тепловой дрейф длины волны. Сам датчик расположен в фиксирующем титановом корпусе с эластичными элементами, чтобы защитить конструкцию от ударов и вибраций. Технические и метрологические характеристики ASM приведены в таблице 1 [2].

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

Таблица 1. Технические и метрологические характеристики абсолютного скалярного магнитометра ASM

№	Наименование характеристики	Значение
1	Диапазон значений, нТл	15 000 – 65 000
2	Абсолютная погрешность, нТл	0,3
3	Масса, кг	3
4	Габариты, мм	размеры сенсора – 40x60, размеры блока обработки – 200x150x100
5	Температурный диапазон, °С	от −5 до +50

2.3 Векторный магнитометр VFM

Векторный магнитометр VFM (рис. 3) является основным прибором для высокоточных векторных измерений МПЗ.

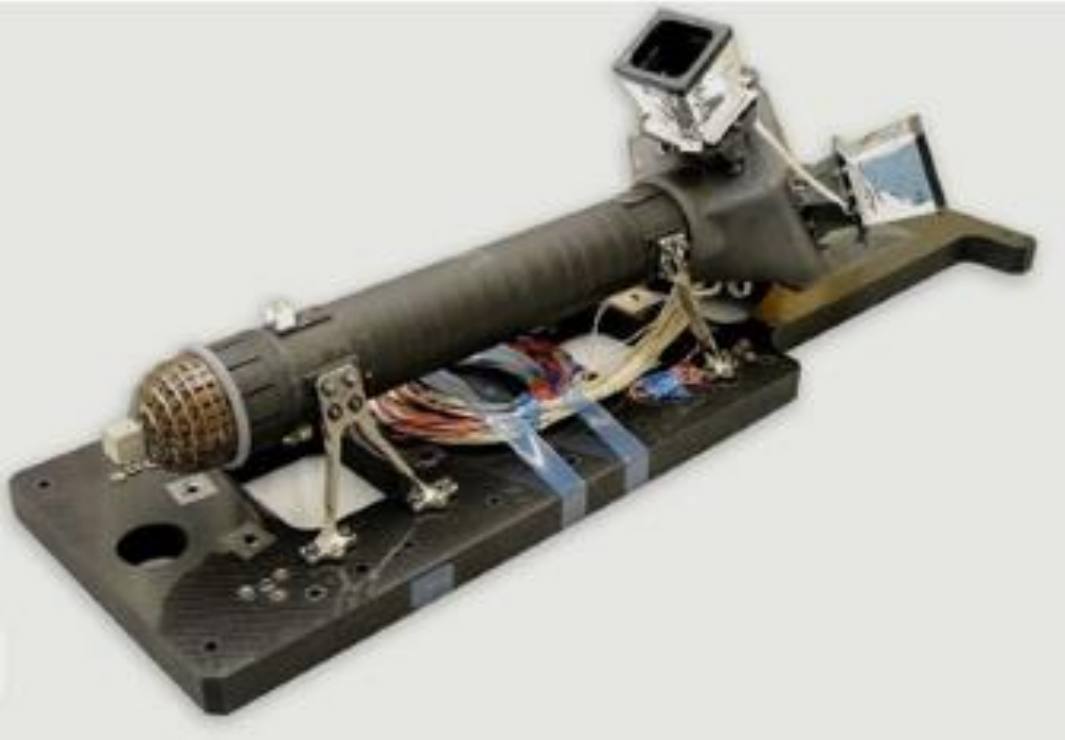

Рис. 3. Векторный магнитометр VFM [https://spaceflight101.com/swarm/swarm-instrument-overview/]

Ориентация вектора определяется тремя звездными датчиками. Сам прибор и звездные датчики расположены на сверхустойчивой конструкции, называемой оптическим стендом и жесток между собой закреплены. Система поддерживается трубкой из углепластика с нулевым коэффициентом теплового расширения, что сводит к минимуму тепловые отклонения. Сам прибор состоит из компактной сферической катушки, создающей однородное магнитное поле, выдвижной штанги, блока обработки данных и соединительного жгута. Сферическая катушка установлена на стабильной и изотропной механической структуре. Работа датчика основана на симметрии уровней положительного и отрицательного магнитного насыщения материала сердечника. Постоянное зондирование уровней насыщения сердечника током намагничивания высокой частоты позволяет датчику обнаруживать незначительные отклонения от нулевого поля. Сердечник кольцевой, из аморфного магнитного

материала с очень низким уровнем шума. Метрологические и технические характеристики магнитометра VFM представлены в таблице 2 [2].

Таблица 2. Технические и метрологические характеристики магнитометра VFM

№	Наименование характеристики	Значение
1	Диапазон значений, нТл	±65 000
2	Абсолютная погрешность, нТл	0,5
3	Масса, кг	1
4	Габариты, мм	размеры сенсора – 82, размеры блока обработки – 100x100x60
5	Температурный диапазон, °C	от −40 до +50

2.4 Результаты работы КС SWARM

Одним из основных результатов работы КС SWARM является построение модели главного МПЗ IGRF. Модель 13-го поколения (IGRF-13) была представлена в 2020 году, её пересчёт запланирован на 2025 год. Пересчёт необходим для отслеживания изменений МПЗ, он производится не реже 1 раза в 5 лет. Основными моделями главного МПЗ также являются WMM (World Magnetic Model) и EMM (Enhanced Magnetic Model). Все модели находят широкое применение в навигации, а также используются для изучения динамики МПЗ [3].

До 2019 г. для расчета главного поля использовались модели эпохи 2015 г. (IGRF-12). Во все эпохи шел дрейф магнитных полюсов. Скорость дрейфа северного магнитного полюса в 70-е годах составила 10 км/год, 2001 г. – 40 км/год, 2004 г. – 60 км/год, 2015 г. – 48 км/год. Однако, с 2016 г. необычно большая скорость, с которой смещается северный МПЗ, привела к серьезным ошибкам. В начале 2019 г, невязка определения Северного полюса составила 40 км. Для устранения такого рода ошибок с начала 2019 г. началось досрочное обновление моделей МПЗ. В феврале – WMM – Национальным геофизическим центром данных США (NGDC), в декабре – Международной ассоциацией геомагнетизма и аэрономии (IAGA) – выпущена очередная версия модели – IGRF-13. [4].

Поэтому непрерывный контроль и расчет главного МПЗ со входными параметрами из специализированных магнитометрических КС является актуальным направлением. Также представляется необходимым периодическая верификация мировых моделей МПЗ, например, при инструментальных измерениях местоположения магнитных полюсов Земли [4,5,6]. Так, например, в 2020 г. состоялось инструментальное определение положения Южного магнитного полюса (ЮМП) в море Дюрвиля вблизи Земли Адели (Антарктида) совместной экспедицией Русского географического общества и ВМФ России. Разница между моделями WMM и IGRF и инструментальным определением составила 4,5 и 3,5 км соответственно [5].

В работах [5, 6] высказана идея инструментального определения положения магнитных полюсов Земли на регулярной основе в рамках Международной ассоциации геомагнетизма и аэрономии IAGA.

В 2020 году спутниками SWARM также было обнаружено ослабевание МПЗ в районе Африки – Южной Америки, что могло повлиять на работу некоторых спутников. Также проделана огромная работа по анализу данных SWARM в совокупности с данными с других спутников (например, с Cluster-2, расположенном на высокоэллиптической орбите). Данные этих миссий использовали вместе с измерениями наземных магнитовариационных станций (МВС) для изучения связи между солнечными бурями, вспышками объемных потоков во внутренней магнитосфере и возмущениями магнитного поля на уровне Земли. В дальнейшем эти исследования помогут в моделировании распространения волн от Солнца к Земле во время солнечных вспышек и магнитных бурь [7].

Изначально миссия SWARM была рассчитана на 4 года активного существования. Но уже более 8 лет данная КС продолжает бесперебойно обеспечивать измерения МПЗ и параметров ионосферы с беспрецедентной точностью. Недавно было одобрено продление миссии до 2025 года, и есть планы по

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

продлению эксплуатации, включая 25 цикл солнечной активности. Для этого с мая по июль 2022 г. предусмотрено повышение орбит н нижней пары спутников (Альфа и Чарли) данной системы [8].

По итогам стоит также упомянуть и другие специальные космические миссии, на результаты которых можно будет ориентироваться в дальнейшем. Это Cluster-2, MMS (Magnetospheric Multiscale), GOES-R, IMAP (Interstellar Mapping and Acceleration Probe), которые планируются к рассмотрению в последующих статьях.

3. МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ

Среди отечественной космической группировки также есть большое количество КА, ориентированных на гелиогеофизические исследования и мониторинг МПЗ. Однако специализированных магнитометрических КС в Российской Федерации пока что нет. Гидрометеорологическая группировка страны представлена такими КС как «Электро-Л», «Метеор-М», «Арктика-М» (Рис. 4), находящийся в разработке проект «Резонанс» и др.

Рис. 4. Высокоэллиптический КА «Арктика-М» с характерной 6 –метровой штангой для феррозондового магнитометра ФМ-ВЭ

На борту перечисленных КА расположен гелиогеофизический аппаратурный комплекс (ГГАК), осуществляющий мониторинг различных параметров околоземного пространства. В комплекс включены магнитометры серии ФМ. ФМ-Э на «Электро-Л» (рис. 5) и ФМ-ВЭ на «Арктика-М». На Рис. 4 на КА «Арктика-М» изображена характерная 6-метровая штанга для датчиков магнитометра ФМ-ВЭ. По характеристикам магнитометры отличаются от зарубежных аналогов. Упомянутые КА эксплуатируются Росгидрометом, как тематическим заказчиком. Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ») является головным НИУ Росгидромета по гелиогеофизическим наблюдениям и ведет научно-методическое сопровождение работ создания гелиогеофизических комплексов и является потребителем измерительной информации с этих комплексов, включая магнитометрические измерения.

Бортовые магнитометры серии ФМ – это трехкомпонентные феррозондовые магнитометры, обеспечивающие непрерывное измерение всех трёх компонент вектора магнитной индукции. С помощью блока электроники преобразуют компоненты МПЗ в сигнал (рис. 5). Калибровка магнитометров ФМ-ВЭ проводится на распределенной эталонной базе ФГБУ «ИПГ», созданной специально для метрологического обеспечения комплексов ГГАК [9].

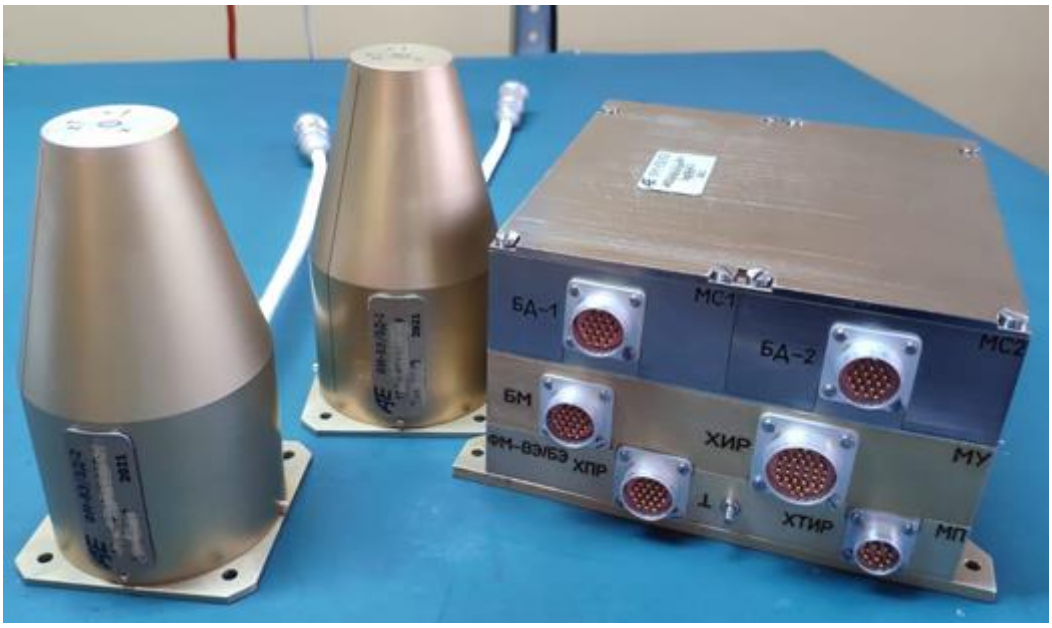

Рис. 5. Внешний вид феррозондового магнитометра (ФМ-ВЭ)

Рассмотрим технические характеристики магнитометров различных КС. Сравнительные характеристики магнитометров, расположенных на КА SWARM и на российских КА приведены в таблице 3.

Диапазоны у приборов практически совпадают, основные отличия в точности измерений. Поэтому для дальнейшей разработки магнитометров нужно ориентироваться на улучшение этого параметра.

Среди отечественных КС в целом имеются аналоги зарубежных. Для «Электро-Л» — это КС GOES, оба спутника находятся на геостационарной орбите. Для «Метеор-М» — это POES. Для миссии «Арктика-М» это частично Cluster-2, в части магнитометрических исследований. Оба КА расположены на похожих высокоэллиптических орбитах.

Таблица 3. Сравнение метрологических характеристик магнитометров КС.

Космические системы (КС)	КА «Электро- Л» № 1-5	КА «Арктика-М» № 1 -3	КС Swarm
Характеристики орбит КА	Геостационарная Hср= 36 000 км, точка стояния 76° в. д., 77,80° в.д.	Высокоэллиптическая, апогей ~ 38868 км; перигей ~ 1500 км; наклонение ~ 62,80°	круговая, наклонение 90°, высота 460 - 530 км
Феррозондовый магнитометр	ФМ-Э (№ 1, 2) ФМ-ВЭ (№ 4, 5) Планируется	ФМ-ВЭ (№1) ФМ-ВЭ (№2,3) Планируется	VFM, феррозондовый
Диапазон измерения по каждой компоненте (погрешность), нТл	± 300 (для № 1, 2) ±65 000 (для № 4, 5)	±65 000	±65 000 (±0,3)
Квантовый магнитометр	—	—	ASM
Диапазон измерения (погрешность), нТл	—	—	±(15 000 – 65 000) (±0,5)

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достоверные и высокоточные данные, полученные с КС гелиогеофизического назначения по магнитной остановке в ОКП и в приземном слое необходимы для заинтересованных министерств и ведомств, в части магнитных бурь и суббурь и их влияния на технические средства и системы. Прежде всего данная информация предназначена информационно-аналитическим центрам по космической погоде Росгидромета для обработки, анализа и передачи информационной продукции заинтересованным министерствам и ведомствам, и Международным организациям. Так, например, созданный российско-китайский Консорциум комической погоды CRC (Мировой глобальный центр), использует магнитометрическую информацию в интересах безопасности международной аэронавигации. Российским сегментом консорциума является Центр космической погоды ФГБУ «ИПГ» Росгидромета.

Информация по космической погоде в целом и по магнитной обстановке в частности применима также для других направлений, включая научные исследования. Например, для университетов и НИУ, которые могут использовать их для моделирования и изучения процессов, происходящих в ОКП, причинах их возникновения и возможных последствиях.

Таким образом, по рассмотренным материалам определены основные направления развития и применения бортовой магнитометрической аппаратуры и КС.

1. На основе проанализированных КС необходимо разработать требования к магнитометрической аппаратуре для дальнейшего улучшения точности и качества съемки МПЗ и для расширения возможностей использования данных, а также для создания специализированной российской КС по наблюдению за МПЗ.

2. Представляется перспективным также направление, связанное с минимизацией магнитометрической аппаратуры для последующего использования на малых космических аппаратах (МКА) типа «Кубсат». Такие разработки ведутся в рамках межведомственной программы «Универсат» (Роскосмос, Росгидромет, Минобрнауки).

3. Помимо разработки новых проектов необходимо поддержание и качественное развитие возобновляемой спутниковой группировки гидрометеорологического и гелиогеофизического назначения Росгидромета (КС «Электро-Л», «Арктика-М», «Метеор-М»).

4. Крайне необходимым является разработка, изготовление и запуск российской специализированной магнитометрической КС на малых орбитах типа SWARM в рамках Федеральной космической программы 2026-2035 гг.

5. необходимо проводить верификацию международных моделей МПЗ через специализированные КС, а также периодический инструментальный контроль положения магнитных полюсов Земли.

В будущем указанные направления помогут оперативно решать большое количество прикладных и научных задач, позволяя решать социально-экономические вопросы, а также вопросы безопасности государства, включая независимость получения гелиогеофизических данных. Среди них разработка национальной модели главного МПЗ, расчёты карт магнитных склонений, моделирование силовых линий МПЗ, расчёт зон высыпания энергичных частиц в ионосферу и соответственно поглощения и отражения радиоволн ионосферой, расчёт ориентации КА по магнитному полю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт Европейского космического агентства. Earth Online [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm (дата обращения 25.04.2022)

2. Сайт Европейского космического агентства. EoPortal, базы данных миссий. Геомагнитное созвездие Swarm [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swarm (дата обращения 25.04.2022)

3. *Эрван Тебо, Кристофер С. Финлей, Киаран Д. Бегган и др.* Международное геомагнитное эталонное поле: 12-е поколение // Земля, планеты и космос, научный электронный журнал. 2015 №67, 79 с. URL: https://doi.org/10.1186/s40623-015-0228-9.

4. *Minligareev, V.T., Sazonova, T.V., Arutyunyan, D.A., Tregubov, V.V., and Khotenko, Ye.N.* Geophysical Support of Advanced Autonomous Magnetometric Navigation Systems// Giroskopiya i Navigatsiya, 2020, no. 11, pp. 350–356. DOI: 10.1134/S2075108720040082.

5. *Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Булычев А.А., Кузнецов К.М., Минлигареев В.Т.* Инструментальное определение положения Южного магнитного полюса Земли в кругосветной антарктической экспедиции на ОИС ВМФ "Адмирал Владимирский" // Физика Земли, 2022. Т.2 № 2. С. 27-40. DOI: 10.31857/S0002333722020065.

6. *Shirokov I. B., Minligareev V. T., Arutyunyan D.A., Kuznetcov K.M.* Study of the Earth's magnetic field. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS 2021, Virtual, Brussels, Belgium, July 12-16 2021, P. 8632-8635. DOI:10.1109/IGARSS47720.2021.9553896. IEEE Catalog No.: CFP21IGA-USB.

7. Научный журнал phys.org. Миссии Swarm и Cluster проникают в суть геомагнитных бурь [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: https://phys.org/news/2021-12-swarm-cluster-missions-bottom-geomagnetic.html (дата обращения 25.04.2022)

8. Сайт Европейского космического агентства. Новости миссии Swarm. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: https://earth.esa.int/eogateway/news/swarm-alpha-and-charlie-orbit-raise-campaign-starting-on-3-may-2022-potential-impact-on-data-quality (дата обращения 02.05.2022).

9. *В.Т. Минлигареев, Ю.М. Качановский, В.Л. Кравченок, Е.А. Паньшин, Хотенко Е.Н.* Метрологическое обеспечение ионосферной, магнитной наблюдательной сети Росгидромета//Метеорология и гидрология. 2021 - № 4, с.43-52.

REVIEW OF HELIOGEOPHYSICAL SPACE SYSTEM WITH MAGNETOMETRIC EQUIPMENT

Bragina A.A., Arutyunyan D.A., Minligareev V.T.

The article considers review of foreign and domestic heliogeophysical space systems (SS). The analysis of the used magnetometric equipment and comparison of their technical and metrological characteristics was carried out. Defined perspective ways for development of SS and on-board magnetometric equipment.

KEYWORDS: HELIOGEOPHYSICAL RESEARCH, SPACE SYSTEM (SS), SPACECRAFT, MAGNETIC MEASUREMENT, EARTH'S MAGNETIC FIELD, SPACE WEATHER, MAGNETOMETRIC EQUIPMENT, DANGEROUS HELIOGEOPHYSICAL PHENOMENA

© Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова