

УДК 629.783; 520.6.05

**АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В ЧАСТИ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Воробьев Дмитрий Даниилович

*Магистр 2 года,**кафедра «Метрология и взаимозаменяемость»**Московский государственный технический университет**Научный руководитель: Е.В. Тумакова,**старший преподаватель кафедры «Метрология и взаимозаменяемость»*

Целью данной работы является анализ структуры и характеристики данных, необходимых для измерения параметров космической погоды, а также средств измерений, применяемых в этой области.

К основным факторам космической погоды, то есть возникновения физических явлений, вызванных солнечной и геомагнитной активностью, влияющими на состояние околоземного пространства и Землю, относят:

- возрастание потоков солнечных космических лучей (СКЛ);
- магнитные бури и ионосферные суббури;
- ионизирующее электромагнитное излучение солнечных вспышек;
- возрастание потоков электронов во внешнем радиационном поясе земли

РПЗ [1].

Эти физические явления могут привести к увеличению радиационной опасности во время космических и авиационных полетов, вызывать нарушения в радиосвязи, приводить к сбоям в целевой аппаратуре космических аппаратов, линий электропередач и энергосетей, а также вызывать недомогания у метеочувствительной части населения.

Первичным источником возмущений, которые передаются через волны и частицы в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли является изменение Солнечного возмущение [2]. Эти возмущения влияют на процессы, связанные с равновесием электрических токов и магнитных полей, что может привести к нештатным ситуациям в различных отраслях, включая навигацию, связь, электроэнергетику, перекачку нефти и здравоохранение. Отметим, что под геофизической обстановкой понимается комплекс явлений и процессов в верхней атмосфере, ионосфере, магнитосфере и околоземном космическом пространстве (ОКП) [3].

В работах [3] и [4] в рамках создания системы мониторинга геофизической обстановки были выделены геофизические объекты и процессы, данные о которых необходимы для формирования модели планетарной экосистемы для мониторинга космической погоды (таблица 1).

Таблица 1. Геофизические объекты и задачи

Объект	Задача	Параметры
Солнце, солнечный ветер	Прогноз потоков солнечных космических лучей (СКЛ), магнитосферных бурь, ионосферных возмущений	1. Изображение Солнца, солнечной короны в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах; 2. Излучение Солнца, солнечной короны в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах; 3. Межпланетное магнитное поле;

		4. Скорость, температура и концентрация плазмы в межпланетной среде.
Магнитосфера радиационные пояса	Контроль состояния и прогноз радиационной обстановки; диагностика и краткосрочный прогноз магнитосферных суббурь и бурь, ионосферных бурь, возмущений в верхних слоях атмосферы, выявление предвестников землетрясений	5. Интенсивность и энергетические спектры корпускулярных потоков; 6. Магнитосферная плазма; 7. Магнитные поля; 8. Плазменные волны
Ионосфера	Диагностика и прогноз условий распространения радиоволн, условий связи, контроль активных воздействий природного и антропогенного характера	9. Пространственно-временное распределение электронной концентрации; 10. Динамика ионосферных неоднородностей; 11. Тонкая структура ионосферы; 12. Волновая активность
Верхняя атмосфера. Озоносфера	Прогноз состояния атмосферы и ионосферы, прогноз движения ИСЗ на малых высотах, состояние озонового слоя	13. Плотность 14. Температура 15. Ионный и нейтронный состав 16. Малые газовые составляющие 17. Волновая активность 18. Распределение концентрации озона
Литосфера	Прогноз состояния атмосферы, контроль воздействий	19. Гравитационное поле 20. Гравитационные аномалии

Также в работе [3] был проведен анализ каждой из выделенных выше задач, что позволило сформировать перечень параметров, мониторинг которых с помощью средств космического базирования обеспечивает контроль состояния "космической погоды" и её изменений, которые порождают возмущения геофизических сред. В таблице 2 приведены основные параметры, измеряемые с целью контроля космической погоды, средства их измерений.

Таблица 2. Основные параметры контроля космической погоды, средства измерений.

Задача	Орбитальная позиция	Параметр	Измеряемая величина	Средства контроля
Мониторинг и прогноз геоэффективных вспышек	ВМО	Изображение солнца в белом свете	-	* Телескоп
		Изображение солнца в линии H-Alpha и Call-K	-	* Телескоп
Мониторинг и прогноз геоэффективных		Изображение солнца в рентгеновском и	-	* Телескоп

Задача	Орбитальная позиция	Параметр	Измеряемая величина	Средства контроля
вспышек; Мониторинг и прогноз магнитных бурь		ультрафиолетовом диапазоне		
		Поток рентгеновского излучения солнца	$\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$.	измерители потока рентгеновского излучения Солнца ДИР-Э Рентгеновский фотометр («СФР»)
		плотность потока энергии ультрафиолетового излучения Солнца	$\text{мВт}\cdot\text{м}^{-2}$	измеритель ультрафиолетового излучения Солнца ВУСС-Э
		Изображение солнечной короны и гелиосферы	-	*
		Вектор межпланетного магнитного поля	нТл	Магнитометр
		Температура плазмы	К	*** Низкочастотный волновой комплекс
		Скорость плазмы	Оценка не завершена	*** Низкочастотный волновой комплекс
		Плотность плазмы	Оценка не завершена	*** Низкочастотный волновой комплекс
Мониторинг и прогноз магнитных бурь	ГСО	Поток рентгеновского излучения Солнца	$\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$.	Измеритель потока рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца
		Патруль радиовсплесков солнца	-	-
		Потоки протонов и электронов	$\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Спектрометры**
		Вектор магнитного поля	нТл	Векторный магнитометр**
Мониторинг и прогноз магнитных бурь; Мониторинг и прогноз ионосферных возмущений	ВЭО	Потоки протонов и электронов	$\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	Спектрометр**
		Вектор магнитного поля	нТл	магнитометр
		Электромагнитные возмущения	Оценка не завершена	
		Парметры аврорального овала в УФ, видимом и ИК диапазонах	-	*** Спектрометры

Задача	Орбитальная позиция	Параметр	Измеряемая величина	Средства контроля
Мониторинг и прогноз ионосферных возмущений	Низкие орбиты	Высота F области	км	** наземные средства
		Скорость горизонтального дрейфа неоднородности атмосферы	м/с	*** наземные средства
		Высота и критическая частота области F2	МГц	** наземные средства
		Вертикальный размер неоднородности в F области		** наземные средства
		Частота спорадического слоя Es	МГц	** наземные средства
		Амплитуда сцинтилляций	Оценка не завершена	наземные средства
		Полное содержание электронов	-	Измеритель полного электронного содержания («ПЭС»)
		Вектор магнитного поля	нТл	Магнитометр
		Флуктуация фазы радиоволн	Оценка не завершена	-
		Потоки протонов и электронов	см ⁻² с ⁻¹	** Спектрометр
Прогноз вариаций состава и плотности верхней атмосферы	Низкие орбиты	Анализ нейтрального и ионного состава верхних слоев атмосферы	а.е.м	Радиочастотный масс-спектрометр

* не является измерением;
 ** относится к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений в соответствии с постановлением правительства Российской Федерации от 16.11.2020 г. № 1847;
 *** расчетный метод, основанный на результатах измерений сопутствующих величин
 ВМО – внемагнитосферная орбита;
 ГСО – геостационарная орбита;
 ВЭО – высокоэллиптическая орбита

Исходя из приведенных выше сведений можно выделить некоторые средства измерений, применяющиеся для контроля параметров "космической погоды" на российских космических системах, а также привести их прослеживаемость к государственным эталонам (таблица 3).

Таблица 3. Средства измерений и эталоны

Средство измерений	Диапазон измерений	Погрешность	Средства калибровки (поверки)	Примечание
Измеритель потока рентгеновского излучения Солнца ДИР	от 10^{-3} до 10^{-7} см ² с ⁻¹ ср ⁻¹ в области энергии от 3 до 25 кэВ	± 15 %	Эталонная дозиметрическая установка УЭД 5-50М ГЭТ	[5]
Измеритель ультрафиолетового излучения Солнца ВУСС	от 1 до 30 мВт·м ⁻²	± 2 %	Комплекс аппаратуры для калибровки ВУСС-Э (монохроматор, накопитель ВЭПП-4, эталонный детектор)	[6]
Феррозондовые магнитометры ФМ	от минус 65000 до 65000 нТл	не превышает ±15 %	Мера магнитной индукции трехкомпонентная ТММИ	Диапазон и погрешность измерений зависит от модификации магнитометра ФМ
Спектрометры корпускулярных излучений СКЛ	Плотность потока протонов: от $2,5 \cdot 10^{-1}$ до 10^4 см ⁻² с ⁻¹ в различных интервалах энергий (МэВ)	± 40 %	Протонный ускоритель (циклотрон) НИИЯФ МГУ У-120; камера рассеяния осциллографа	Диапазон измерений зависит от модификации спектрометра
	Плотность потока электронов: от 10 до 10^4 см ⁻² с ⁻¹ в различных интервалах энергий (МэВ)	± 40 %	НМО2022; прибор пересчетный ПСО2-5; и пр.	Диапазон измерений зависит от модификации спектрометра [7]
Спектрометры корпускулярных излучений СКИФ	Дифференциальный спектр потока протонов и электронов: от 0,05 до 20 кэВ	± 40 %	линейный ускоритель электронов ЛУЭ-10; ускоритель протонов (циклотрон) У-120;	-
	Суммарная плотность потока протонов с энергиями св. 800 кэВ: от $3 \cdot 10^3$ до 10^9 см ⁻² с ⁻¹	± 40 %	третий ВНЗ.4Х; монохроматор электронов «ИПГ-626»;	-

	Суммарная плотность потока электронов с энергиями св. 40 кэВ: от 0,1 до $10^{-3} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\pm 40 \%$	бета-спектрометр MD198M; вакуумная камера UNIVEX 350	-
Детектор галактических космических лучей ГАЛС	Плотность потока протонов с энергиями св. 600 МэВ: от 1 до $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\pm 40 \%$	Эталонная установка рентгеновского излучения УЭД 50-320;	-
	Суммарная плотность потока электронов с различными энергиями: от 0,5 до $10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\pm 40 \%$	Государственный рабочий эталон 1-го разряда единиц мощности кермы в воздухе, экспоненциальной	Диапазон измерений зависит от модификации детектора
	Суммарная плотность потока протонов с различными энергиями: от 0,5 до $10^4 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$	$\pm 40 \%$	дозы, амбиентного и направленного эквивалента; и пр.	Диапазон измерений зависит от модификации детектора
Радиочастотный масс-спектрометр РИМС	Регистрация ионного и нейтрального состава верхней атмосферы Земли: от 1 до 20 а.е.м	-		-
Низкочастотный волновой комплекс (НВК) "НВК 2"	От 0 Гц до 20 кГц	Информация отсутствует	Информация отсутствует	Средствами измерений являются электрические и магнитные датчики из состава НВК

Следует отметить, что метрологическое подтверждение пригодности для средств измерений, используемых для мониторинга космической погоды, осуществляется с некоторыми затруднениями. Так, например для КС "Ионозонд", из 11 позиций целевой аппаратуры, требующих калибровки в соответствии с российской системой калибровки Р РСК 002 на существующей распределенной эталонной базе, можно откалибровать только 2. Для остальных метрологическая пригодность частично осуществляется в рамках проверки функционирования.

Таким образом, в ходе анализа были выявлены и структурированы величины, измеряемые с целью определения космической погоды. Приедены некоторые средства измерений, применяемые в этой области, а также средства их калибровки.

Литература

1. Основные факторы космической погоды [Электронный ресурс] URL: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/cosmw/cosmw3.htm>
 2. Шейнер О.А., Выборнов Ф.И. Высокоскоростные потоки солнечного ветра как причина возникновения ионосферных возмущений // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2021. С. 425. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a
 3. В. А. Буров, С. В. Журавлев, В. Б. Лапшин [и др.] Программа наблюдения геофизических процессов и технология построения космических средств перспективной системы мониторинга геофизической обстановки // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2014. – Т. 142, № 5. – С. 53-59. – EDN TRKDCX.
 4. Асташкин А.А., Буров В.А Структура параметров геофизических процессов в околоземной среде. Основные принципы концепции перспективной космической системы мониторинга геофизической обстановки, Гелиогеофизические исследования выпуск 13, 10 – 28, 2015
 5. Нусинов А. А., Качановский Ю. М., Минлигареев В. Т., Юдкевич И. С. Измерения рентгеновского излучения солнца на космических аппаратах гелиогеофизического назначения. Гелиогеофизические исследования выпуск 16, 8 – 19, 2017
 6. Нусинов А.А., Алексеева А.В., Заверткин П.С., Ивлишкин Д.В., Качановский Ю.М., Кузин С.В., Минлигареев В.Т., Николенко А.Д., Панышин Е.А., Перцов А.А. Метрологические характеристики аппаратуры для спутникового мониторинга геоэффективного ультрафиолетового излучения солнца. Гелиогеофизические исследования. 2020. №26. С.31-35.
 7. Создание распределенной эталонной базы для радиометрической аппаратуры гелиогеофизических комплексов космических аппаратов гидрометеорологического назначения / В. Т. Минлигареев, Ю. М. Качановский, Е. А. Панышин [и др.] // Мир измерений. – 2016. – № 1. – С. 51-59. – EDN VKZJRH
-