

БОРТОВАЯ АППАРАТУРА МАЛОГО СПУТНИКА ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2021 г. А. И. Родионов¹, И. Д. Родионов¹, И. П. Родионова¹, С. Я. Уманский¹,
Д. В. Шестаков¹, В. В. Егоров², А. П. Калинин^{3*}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

³Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: kalinin@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 02.03.2021;

после доработки 07.04.2021;

принята в печать 20.04.2021

Одной из важнейших задач химической физики атмосферы является оперативный мониторинг текущего состояния атмосферы и ионосферы, результаты которого важны для исследования солнечно-земных связей и решения многих прикладных задач. В настоящей работе представлена концепция формирования комплекса научной аппаратуры, предлагаемого для размещения на малом спутнике. Бортвой комплекс предназначен для мониторинга широкого круга объектов: солнечного диска, лимба Земли, транзиентных явлений, состояния озонового слоя, поверхности Земли и др. Подробно описаны тактико-технические характеристики приборного состава комплекса, включающего: УФ-телескоп Солнца, ультраспектрометр лимба Земли, УФ-датчик озонового слоя Земли, гиперспектрометр атмосферы и поверхности Земли, а также УФ-С-сенсор транзиентных световых явлений.

Ключевые слова: малый спутник, УФ-С-сенсор, гиперспектрометр, лимб Земли, спектры излучения, транзиентные явления, предвестники катастроф.

DOI: 10.31857/S0207401X21100113

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения экологического состояния биосферы, вызывающие в последние десятилетия все более частые катастрофические явления, требуют постоянного мониторинга Земли и околоземного пространства. Эффективным инструментом такого наблюдения являются спутниковые измерения, позволяющие оперативно контролировать состояние геосферы, термосферы и космической погоды. Одной из ключевых задач является оперативный мониторинг состояния атмосферы и ионосферы, результаты которого важны для исследования солнечно-земных связей [1–4]. Ее решение преследует достижение как научных, так и практических целей. К научным следует отнести определение заряда, состава и температуры термосферы [5, 6]. Это включает проверку новых научных гипотез структуры Земли, оценку влияния высокоэнергетических процессов, протекающих на Солнце, на процессы в лимбе Земли и спектральные сигналы подспутниковой поверхности. К ним также относится определение пространственного и временного распределения поля спектральной энергетической яр-

кости лимба Земли. В настоящее время активно используются спутники для мониторинга озонового слоя планеты, фиксации различных гео-, био- и химических предвестников землетрясений [7] и нарушений связи [8], влияния космической погоды на здоровье населения [9], а также исследования транзиентных явлений.

Практическая реализация спутникового мониторинга состояния лимба Земли предполагает создание комплекса научной аппаратуры (КНА) с использованием сенсоров различных спектральных диапазонов (от ультрафиолетового до инфракрасного) [10]. Цель настоящей работы – изложение концепции формирования комплекса научной аппаратуры спутника, описание приборов различного спектрального диапазона, входящих в комплекс, и их технических характеристик.

2. ОБЪЕКТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ

Лимб Земли

Светящийся лимб образован двумя слоями светящегося газа на высотах около 100 и 250 км над Землей. Источником свечения являются пе-

реходы между состояниями атомов, молекул и радикалов, возбужденных в дневное время солнечным излучением. Характерные значения интегральной светимости слоя составляют доли $\text{мкВт}/\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}$. Свечение наблюдается в ультрафиолетовом (УФ), видимом (ВИД) и инфракрасном (ИК) диапазонах. При этом в ИК-диапазоне, начиная с 2 мкм в сторону длинноволнового излучения, существенный вклад в свечение начинает вносить тепловое излучение Земли, маскирующее собственно процессы в лимбе. Поэтому для решения указанных задач интерес представляет анализ процессов в диапазоне длин волн 500–1300 нм.

При возникновении на Земле слабой акустической волны, вызванной малыми смещениями земной коры (одними из предвестников землетрясений), смерчем или сильным взрывом, происходит распространение звуковой волны в направлении космического пространства. Поскольку при достижении 100 км высоты плотность воздуха падает приблизительно в 10^6 раз, то, соответственно, растет и амплитуда волны, которая из звуковой переходит в ударную волну. Ударная волна, проходя по светящемуся слою, вызывает нарушение существующего здесь квазилокального равновесия, которое включает механизмы релаксации к новому равновесию за фронтом ударной волны. Такая релаксация в верхней атмосфере сопровождается процессами излучения светящихся компонент лимба. В результате формируются свечения: в ночное время (ночной лимб), в переходный период и в дневное время суток. Характерные значения интегральных интенсивностей свечения газовых компонент отличаются незначительно, однако в дневное время некоторые из линий излучения лимба становятся более заметными. Свечение в основном обусловлено излучением радикала ОН в видимой области спектра и в ближнем ИК-диапазоне. Кроме того, в спектрах имеются линии атомов кислорода, натрия, лития, водорода, ионов азота и др. Анализ спектров свечений лимба с учетом их пространственно-временной структуры является основой прогноза землетрясений по их предвестникам и наблюдениям катастрофических явлений типа землетрясений, взрывов, смерчей и т.д.

Несмотря на относительно малый вклад в интегральное свечение, все эти линии определяются тонкими процессами взаимодействия атмосферы с приземным слоем и космическими воздействиями. Заметим, что за авроральные свечения ответственны линии атомарного кислорода на длине волны 557.7 нм, интенсивность свечения которого по порядку величины может приближаться к интегральной интенсивности свечения гидроксила. Это обеспечивает потенциальную информативность линий не только гидроксила, но и линий

атомарного и молекулярного кислорода, азота и других компонент.

Свечения в видимой области спектра и ближнем ИК-диапазоне интересны тем, что они не коррелируют с собственным тепловым излучением Земли. Их сигналы по сравнению с ним невелики, однако они разделены по спектру с фоном Земли и, тем самым, доступны для гиперспектрального зондирования. Ширины атомарных линий достаточно малы (порядка 1 Å), что представляется удобным с точки зрения фильтрации изучаемой компоненты от остального излучения. Спектр гидроксила состоит из вращательно-колебательных полос и носит диффузный характер.

Солнечный диск

Вспышки на Солнце приводят к усилению УФ-радиации, что повышает температуру и плотность термосферы. Для оценки влияния высокоэнергетических солнечных выбросов на процессы в лимбе Земли, спектральные сигнатуры подспутниковой поверхности и состояние здоровья населения в состав КНА должен входить УФ-телескоп Солнца. При этом аппаратура телескопа должна в режиме реального времени обеспечивать селекцию ложных прогнозов, вызванных высокоэнергетическими процессами на Солнце.

Озоновый слой

Состояние озонового слоя определяет квазистационарное состояние лимба Земли, поскольку именно реакции озона с водородом определяют излучение лимба. Поэтому для прогноза по состоянию лимба явлений, связанных с динамикой “озоновых дыр”, необходимо одновременно контролировать и состояние озонового слоя, причем контроль можно осуществлять при изучении отраженного от Земли солнечного света в УФ-С-диапазоне.

Атмосфера Земли и земная поверхность

Состояние озонового слоя, солнечная активность и процессы, происходящие в земной коре, оказывают существенное влияние на атмосферу и биосферу. Изменения состояния атмосферы, биосферы и геосферы эффективно регистрируются средствами гиперспектрального дистанционного зондирования Земли [11, 12], которые широко используются в исследовании процессов горения и взрыва [13–15]. В основе такого дистанционного зондирования лежит предположение о соответствии между регистрируемым гиперспектральным сигналом и биохимическим составом зондируемого объекта.

Таблица 1. Тактико-технические характеристики комплекса научной аппаратуры

Сенсор	Спектральный диапазон, нм	Число спектральных каналов	Спектральное разрешение, нм	Угловое поле зрения, град
Ультраспектрометр лимба Земли	550–650	1000	0.1	6
	700–1100	400		
УФ-телескоп Солнца	10–120	100	0.1–0.2	2
УФ-гиперспектрометр озонового слоя Земли	200–400	100	0.3	60
Гиперспектрометр атмосферы и поверхности Земли	400–1600	500	0.3	6
УФ-С сенсор транзитных явлений	250	1	10	120

Измеряемыми характеристиками здесь являются зависимость коэффициента рассеяния излучения Солнца атмосферой и поверхностью Земли от физико-химических параметров зондируемых объектов и их пространственной координаты, а также значения длины волны регистрируемого отраженного излучения и его поляризации. Высокая чувствительность коэффициентов рассеяния разнородных объектов к частоте и поляризации подсвечивающего излучения выделяет гиперспектральный метод среди других методов изучения поверхности Земли. Данные гиперспектральных измерений используются для решения таких сложных задач, как детектирование малых объектов, идентификация состава объектов атмосферы и земной поверхности и происходящих в них процессов, выделение различий между очень близкими классами предметов, оценки биохимических и геофизических параметров и т.п. Только гиперспектральные измерения могут выявить малые спектральные различия между отдельными элементами атмосферы и земной поверхности и служить индикатором интересующих объектов и процессов.

Транзитные световые явления

Исследование вспышек излучения в верхней атмосфере Земли, возникающих при электрических разрядах, а также связи этих вспышек с потоками заряженных частиц в околоземном космическом пространстве важны как с научной, так и практической точки зрения. Эти явления получили название “транзитные световые явления” (ТСЯ). Подробные сведения об этих явлениях можно найти в работе [16]. В статье отмечается важность транзитных исследований, так как число разрядов и выделяемая в этих разрядах энергия настолько велики, что можно ожидать определенные связи между явлением разрядов и другими геофизическими явлениями.

3. СОСТАВ БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ И ЕЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В состав комплекса научной аппаратуры включены следующие сенсоры: ультраспектрометр лимба Земли, УФ-телескоп Солнца, УФ-датчик озонового слоя Земли, гиперспектрометр атмосферы и поверхности Земли, а также УФ-С-сенсор ТСЯ. Их тактико-технические характеристики приведены в табл. 1.

Ультраспектрометр для мониторинга состояния лимба

Аппаратура для мониторинга лимба Земли должна обеспечить информацию о пространственно-временном распределении поля спектральной энергетической яркости лимба Земли с ультраспектральным разрешением 0.1 нм в диапазоне длин волн 500–1300 нм. Спектральные линии атомарных газов в условиях разреженной атмосферы достаточно узки и в них сосредоточена вся энергия излучения этих газовых компонент. Практически единственным способом спектральной фильтрации таких линий в данных условиях является использование перестраиваемых фильтров Фабри–Перо [17]. Разрешение по спектру в этом случае может достигать значения 0.1 нм и выше. В то же время данный фильтр позволяет сохранить двумерное изображение и максимально использовать поток фотонов от лимба. Согласно сложившейся классификации аппаратура с таким спектральным разрешением называется ультраспектральной.

Спектральные линии гидроксидов образуют вращательно-колебательные полосы [18], по которым распределена энергия излучения. При локальном термодинамическом равновесии она распределяется по линиям полосы в определенном статистическими законами порядке. Нарушение локального термодинамического равновесия приводит к изменению распределения энергии между линиями радикала ОН. Поэтому наблюдаемая



Рис. 1. Внешний вид ВКЧД.

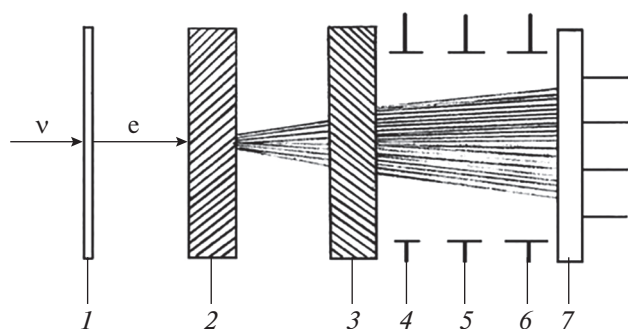


Рис. 2. Блок-схема ВКЧД: 1 – фотокатод; 2, 3 – МКП; 4–6 – корректирующие электроды; 7 – коллектор.

корреляция между компонентами свечения линий гидроксила в зависимости от пространственного положения точки наблюдения и пространственной сигнатуры коэффициента корреляции является явным признаком экстремальных процессов. Уровень спектральной селекции подбирается из условия разрешения спектральных линий.

В случае предельно малых интенсивностей свечения требуется их регистрация в режиме счета отдельных фотонов. Обычно применяемые ПЗС-матрицы¹⁾ не позволяют обеспечить такой режим. В данном случае предлагается другой подход, основанный на использовании принципиально новых фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) с двумерным пространственным разрешением и примерно в 10^6 раз меньшим уровнем шумов в расчете

¹⁾ Прибор с зарядовой связью (ПЗС).

на элемент пространственного разрешения. Это – так называемый время-координатно-чувствительный детектор (ВКЧД) [19, 20], внешний вид которого представлен на рис. 1. Подробную информацию о сенсорах на микроканальных пластинах можно найти в работах [21, 22].

Приведем краткое описание работы ВКЧД, блок-схема которого представлена на рис. 2. Выбитый из фотокатода 1 фотоэлектрон попадает на сборку из микроканальных пластин (МКП) 2, 3, где на основе электронной лавины происходит размножение электронов. На выходе из второй МКП лавина электронов проходит систему корректирующих линз 4–6 и попадает на коллектор 7. Коллектор имеет сложную конструкцию [20]. Она может быть представлена в виде системы квадрантов, где клинья полосатой или более сложной формы позволяют определять центр электронной лавины. Этот центр соответствует координате попавшего на фотокатод фотона. Таким образом, формируется изображение, аналогичное изображению на матрице, обычно используемой в таких случаях.

Повышение информативности сенсоров КНА за счет использования ВКЧД позволяет значительно увеличить чувствительность детектирования. Действительно, использование узкополосных фильтров высокого спектрального разрешения (перестраиваемых фильтров Фабри–Перо) требует применения детекторов слабых сигналов, работающих в режиме счета фотонов. Эта проблема с успехом решается с использованием ВКЧД. Данный сенсор, характеристики которого представлены в табл. 1, предназначен для прогнозирования изменения состояния объектов биосферы по локальным нарушениям химической кинетики малых компонент в лимбе Земли, диагностируемым по соотношениям свечений различных компонент молекул и атомов лимба в его пространственной точке. Кроме того, по этим данным могут проводиться оценки влияния высокоэнергетических процессов на Солнце на процессы в лимбе Земли и спектральные сигнатуры подспутниковой поверхности. УФ-телескоп в режиме реального времени должен проводить селекцию ложных прогнозов, вызванных высокоэнергетическими процессами на Солнце.

В свою очередь датчик должен обеспечивать изображение солнечного диска с разрешением не хуже 100 точек по диску в спектральном диапазоне длин волн 10–120 нм. Математическая обработка изображений должна определять вспышки по гиперспектральным изображениям солнечного диска и выявлять корреляцию вспышек с особенностями гиперспектральных измерений. В качестве диспергирующего устройства датчика применяется фильтр Фабри–Перо, а детектором служит ВКЧД.

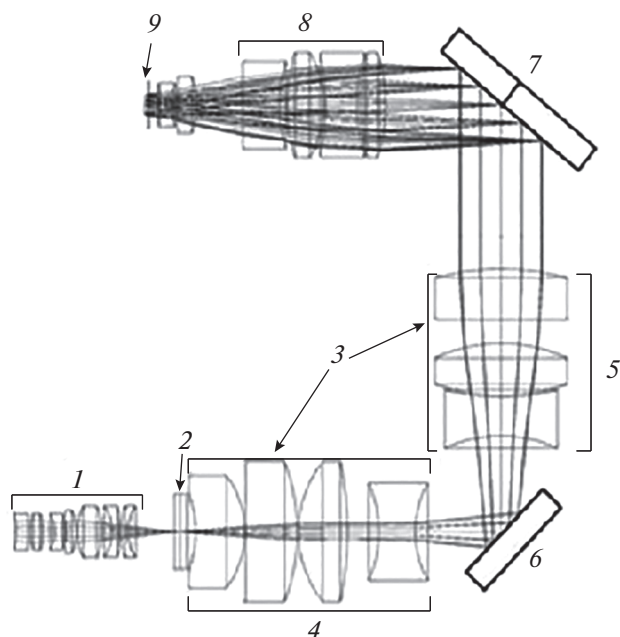


Рис. 3. Оптическая схема гиперспектрометра для ближнего ИК-диапазона 900–1700 нм.

УФ-гиперспектрометр для мониторинга озонового слоя Земли

Начиная с 70-х годов прошлого века, исследования озонового слоя, аэрозолей и газовых составляющих в атмосфере проводились с помощью различных сенсоров: Backscatter UltraViolet Instrument (SBUV/2) – на спутниках серии NOAA, Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) – на спутниках Nimbus-7 в 1978–1993 гг., Meteor-3 в 1992–1994 гг. и Earth Probe в 1996–2005 гг.; Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) – на борту ERS-2 в 1995 г.; Ozone Monitoring Instrument (OMI) – на космической платформе Aura в 2004 г. Все указанные сенсоры проводили измерения как в ультрафиолетовом, так и в видимом диапазоне. Наибольший объем данных был получен сенсором TOMS [23].

В работе [24] описан спутниковый видеоспектрометр, предназначенный для мониторинга состояния озонового слоя по измерениям в УФ-диапазоне (300–400 нм), захватывающим полосу поглощения Хаггинса (300–360 нм), а также для зондирования других газов в атмосфере Земли в видимом диапазоне (400–800 нм). Детектором служит ПЗС-матрица, по одной координате которой осуществляется развертка по пространству, а по другой – по спектру.

Разработанные нами ранее сенсоры “Скорпион” и “Корона” [11] могут быть использованы для измерения отражающей и поглощающей способности озонового слоя на любой длине волны в УФ-С-диапазоне за счет подбора кристалла и



Рис. 4. Внешний вид гиперспектрометра для ближнего ИК-диапазона 900–1700 нм.

УФ-фильтров в объективе. В предлагаемом новом УФ-гиперспектрометре озонового слоя Земли спектральный диапазон составляет 200–400 нм: в его состав включен спектроделитель, а детекторная секция выполнена на базе ВКЧД. Это позволяет выделять отдельные спектральные линии, существенно увеличивает чувствительность УФ-датчика озонового слоя Земли и уменьшает его временное разрешение. Широкое угловое поле зрения прибора (120°) не требует сканирования по углам, что качественно отличает его конструкцию и работу от сенсора проекта TOMS [23].

Гиперспектрометр для мониторинга атмосферы Земли и земной поверхности

По своей конструкции гиперспектрометр аналогичен сенсорам, описанным в работах [14, 15]. Оптическая система гиперспектрометра, рассчитанного на диапазон длин волн 900–1700 нм, приведена на рис. 3. Она содержит: входной объектив 1, диафрагменный узел 2, коллиматор 3, состоящий из двух секций 4 и 5, которые для уменьшения габаритных размеров гиперспектрометра установлены под углом 90° друг к другу. Между секциями коллиматора размещено зеркало 6. За секцией 5 установлен диспергирующий блок, выполненный в виде дифракционной решетки 7. Далее по ходу лучей установлен выходной объектив 8 и фотоприемное устройство 9. На рис. 4 дана фотография гиперспектрометра [25], разработанного в НТЦ “Реагент” для ближнего ИК-диапазона 900–1700 нм.

УФ-С сенсор для исследования транзитных явлений

Подробный обзор приборов для исследования транзитных явлений приведен в работе [26]. В случае наблюдения транзитных явлений целесообразно использовать сенсоры “Скорпион” и “Корона”, разработанные в НТЦ “Реагент” [19].

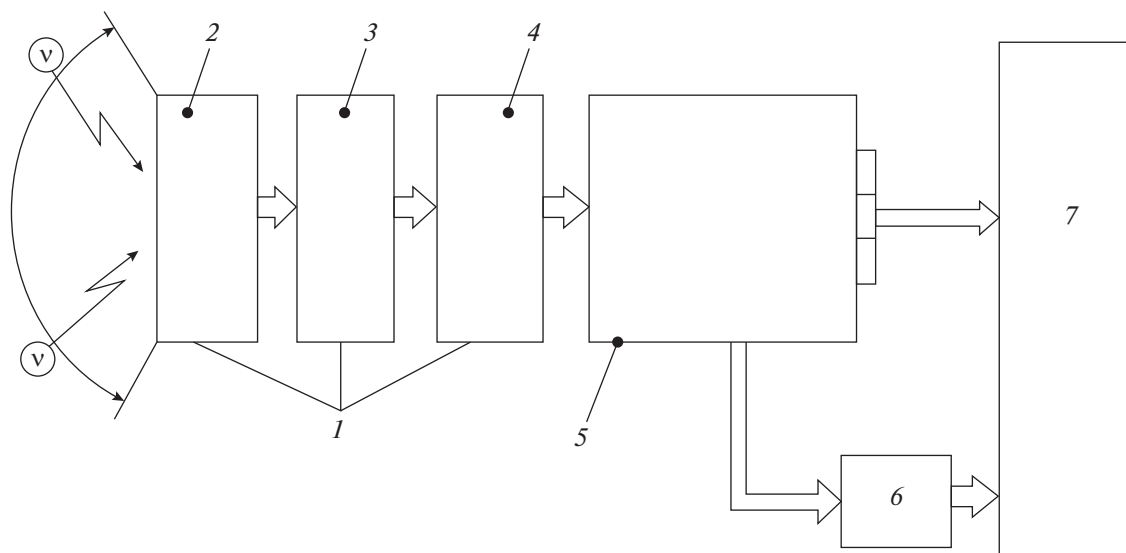


Рис. 5. Функциональная схема монофотонного УФ-С сенсора “Скорпион”: 1 – входной объектив, 2 – система линз, 3 – специальные кристаллы с хорошим пропусканием УФ-С-диапазона и подавлением других длин волн, 4 – УФ-фильтр, 5 – монофотонный время-координатно-чувствительный детектор (ВКЧД), 6 – система регистрации времени прихода фотона, 7 – система электроники.

Функциональная схема монофотонного УФ-С-сенсора представлена на рис. 5. Модуль отображения в конструкцию сенсора не включен. В состав устройства входят: входной объектив, детектор, предварительные электронные тракты,

модуль ввода цифровых данных и вывода сигналов управления, модуль вычислителя. Входной объектив состоит из системы линз, специальных кристаллических фильтров с хорошим пропусканием выбранного УФ-С-диапазона (240–260 нм) и подавлением других длин волн. Детектор включает в себя ВКЧД, многоканальный источник высоковольтного питания, зарядочувствительные усилители и стартовый канал. Также имеется система регистрации времени прихода фотона. Внешний вид сенсора “Скорпион” приведен на рис. 6.

Достоинство предлагаемого УФ-С-сенсора заключается в том, что он имеет высокое пространственное разрешение (менее 4 км с высоты орбиты в 500 км) и позволяет получать изображения транзитных явлений. При этом временное разрешение составляет менее 1 мкс.

4. ИНФОРМАЦИОННАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КНА

Бортовая вычислительная система (БВС) реализуется как распределенная система из многих компьютеров (процессоров) и выполняет все прикладные задачи, типичные для управления комплексом научной аппаратуры, а также все функции управления космическим аппаратом (КА). Объединение различных вычислительных функций в единую систему с высокой степенью резервирования позволяет осуществить тесное взаимодействие между свободными и закрепленными вычислительными ресурсами для выполнения различных заданий при возникновении сбоев. Свойства “элегантной” деградации БВС обеспе-



Рис. 6. Внешний вид УФ-С сенсора “Скорпион”.

чивают живучесть и непрерывность управления КА с длительным (более 10 лет) сроком существования.

Архитектура бортового компьютера соответствует однородной симметричной многокомпьютерной системе и состоит из нескольких (от 3 до 16) идентичных узловых компьютеров, соединенных резервированными линиями связи. Компьютерные модули аппаратно идентичны и различаются выполняемыми ими функциями. Для реализации резервирования одну и ту же функцию обеспечивают, по крайней мере, два компьютера. Каждый модуль работает в режиме последовательной передачи данных на частотах в интервале 500 Мбит/с–3.125 Гбит/с.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый перспективный проект комплекса научной аппаратуры, предназначенного для размещения на малом космическом аппарате, означает принципиально новый этап разработки спутниковых измерительных систем мониторинга лимба Земли, исследования солнечно-земных связей и слежения за космической погодой. Комплекс представляет собой спутниковую измерительную систему, позволяющую решать как фундаментальные задачи физики околоземного пространства, так и прикладные. При обосновании состава и параметров сенсоров КНА учтены новейшие достижения отечественных и зарубежных разработчиков.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (регистрационный номер АААА-А19-119010990034-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Лушников А.А. // Хим. физика. 2014. Т. 33. № 7. С. 101.
2. Голубков Г.В., Манжелей М.И., Берлин А.А. и др. // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 1. С. 5.
3. Kuverova V.V., Adamson S.O., Berlin A.A. et al. // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 1876.
4. Дьяков Ю.А., Курдяева Ю.А., Борчевкина О.П. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 56.
5. Stephan A.W., Meier R.R., Paxton L.J. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2008. V. 113. № A1. A09S41.
6. Meier R.R., Growley G., Strickland D.J. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2005. V. 110. № A9. A01301.
7. Голубков Г.В., Бычков В.Л., Готовцев В.О. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 51.
8. Su S.Y., Tsai L.C., Liu C.H. et al. // Adv. Space Res. 2019. V. 64. № 10. P. 2137.
9. Бреус Т.К., Раннопорт С.И. Магнитные бури: медико-биологические и геофизические аспекты. М.: Сов. спорт, 2003.
10. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Пер. с англ. Т. 1. М.: Мир, 1981.
11. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P. et al. // J. Opt. Techn. 2016. V. 83. № 4. P. 237.
12. Vinogradov A.N., Egorov V.V., Kalinin A.P. et al. // J. Opt. Techn. 2017. V. 84. № 10. P. 683.
13. Рубцов Н.М., Калинин А.П., Цветков Г.И. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 11. С. 42.
14. Рубцов Н.М., Виноградов А.Н., Калинин А.П. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 4. С. 53.
15. Калинин А.П., Рубцов Н.М., Виноградов А.Н. и др. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 5. С. 23.
16. Yair Y., Price C., Ziv B. et al. // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. № 2. L02801.
17. Zucco M., Pisani M., Caricato M. et al. // Opt. Express. 2005. V. 22. № 2. P. 1824.
18. Адамсон С.О., Харлампиди Д.Д., Голубков Г.В. и др. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 12. С. 20.
19. Белов А.А., Егоров В.В., Калинин А.П. и др. // Датчики и системы. 2012. № 12. С. 58.
20. Грунтман М.А. // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 1. С. 14.
21. Han Z.W., Song K.F., Zhang H.J. et al. // Sensors. 2020. V. 20. № 20. P. 5958.
22. Calvi M., Capelli S., Carniti P. et al. // J. Instrum. 2020. V. 15. № 10. P10031.
23. Seftor C.J., Hsu N.C., Herman J.R. et al. // J. Geophys. Res. Atmos. 1997. V. 102. № D14. P. 16749.
24. Доброленский Ю.С., Дзюбан И.А., Иванов Ю.С. и др. // Современ. пробл. ДЗЗ из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 75.
25. Родионов И.Д., Родионов А.И., Родионова И.П. и др. // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 7. С. 30.
26. Klimov P.A., Kaznacheeva M.A., Khrenov V.A. et al. // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2018. V. 15. № 8. P. 1139.