

УДК 681.785.554

В. С. Горяинов, А. А. Бузников, Е. В. Костиков
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Модернизация портативного спектрометра РСС

Пассивные спектральные измерения играют центральную роль в современном дистанционном зондировании Земли из космоса. Первые спектральные наблюдения земной поверхности и атмосферы с орбиты были выполнены экипажами советских космических кораблей начиная с «Союза-5», а также орбитальных станций «Салют-3» и «Салют-4». Важным инструментом для проведения этих экспериментов стал ручной спутниковый спектрометр РСС в нескольких последовательных модификациях. Позже на основе его конструкции был создан полевой фотоэлектрический спектрометр, в котором в качестве регистрирующего элемента была применена фотодиодная линейка (вместо фотопленки в исходной конструкции РСС), а управление осуществлялось микроконтроллером. Удачная оптическая конструкция спектрометра и значительно расширившиеся в последние годы возможности микроконтроллерной техники подвели авторов к идее модернизации РСС. В статье описана конструкция спектрометра, полученного в результате модернизации, и его основные технические характеристики. Приведены примеры обзорных работ о современных тенденциях в космическом дистанционном зондировании, а также краткая справка о первых спектральных измерениях из космоса. Рассмотрены особенности конструкции спектрометра РСС и его последующих модификаций.

Дистанционное зондирование Земли, спектрометрия природных объектов, портативный спектрометр, система управления спектрометром, Arduino-совместимые микроконтроллеры

Глаз в сочетании с мозгом можно считать первой оптико-электронной системой, позволившей человеку начать наблюдение Земли из космоса [1], [2]. Эта уникальная природная оптическая система до сих пор остается непревзойденной по чувствительности, контрастности, а главное, по анализу наблюдаемых оптических явлений [3]. Она позволила выполнить ряд уникальных наблюдений и открытий [4]. Однако ее ограниченный спектральный диапазон и физическая уязвимость потребовали создания новых оптических систем для исследования природной среды из космоса. Первоначально это были фотоаппараты с широким или узким спектральным диапазоном, с разной спектральной чувствительностью и быстродействием. Спектральная чувствительность улучшалась за счет выделения более узких спектральных участков с помощью различных фильтров. Применение цифровой технологии и современных диспергирующих систем позволило создать видеоспектрометры, в которых каждое изображение соответствует узкому спектральному диапазону $\Delta\lambda$ [5].

Исторически первыми спектральными приборами в космосе стали пассивные спектрометры, которые регистрировали отраженное и рассеянное природными объектами солнечное излучение.

В настоящее время наибольший объем информации из космоса о состоянии атмосферы и поверхности Земли получают при помощи гиперспектральной и многоспектральной сканирующей аппаратуры [6]. Преимуществом фотографических и многоспектральных изображений является пространственная и факторная интеграция и связанные с ней возможности комплексного анализа закономерностей пространственно-временной изменчивости разнообразных характеристик природных образований. Однако одних только данных о пространственном распределении поля яркости в какой-либо области спектра, характеризуемом изображением, недостаточно. Нужны количественные методы анализа спектров природных образований, которые лежат в основе космической спектрофотометрии природной среды.

Космическая спектрофотометрия природной среды определена как научное направление, предусматривающее разработку методов и приборов для измерения из космоса спектров отражения, поглощения и рассеяния солнечного излучения природными образованиями и оптических характеристик природной среды (спектральных коэффициентов отражения, поглощения, излучения, степени поляризации, спектральных яркостей и контрастов). Это научное направление имеет целью изучение существующих в природе зависимостей характеристик поля электромагнитного излучения, измеряемых с космических летательных аппаратов, от параметров природной среды – таких, например, как типы и состояние природных объектов, концентрация газовых компонентов и аэрозоля на разных высотах в атмосфере, состояние поверхности Мирового океана [7]. Космическая спектрофотометрия природной среды опирается на научный фундамент классической фотометрии с ее строгой системой теоретических положений, расчетов и количественных методов измерения лучистой энергии. Спектральные измерения с космических аппаратов выполняются через толщину земной атмосферы, и поэтому важное место в них занимают проблемы переноса излучения в реальной сферической атмосфере. Космическая спектрофотометрия включает ряд методов измерений, среди которых наибольшее применение нашли метод спектральных измерений отраженного и рассеянного излучения системой «Земля – атмосфера» солнечного излучения и метод измерения прозрачности атмосферы по Солнцу на скользящих оптических трассах [8], [9].

Возможность использования данных дистанционного зондирования для получения информации о состоянии атмосферы, поверхности океана и природных образований на поверхности Земли для практического решения на этой основе многочисленных экологических проблем определяется прежде всего знанием существующих в природе зависимостей характеристик поля электромагнитного излучения от параметров природной среды – состояния растительности и свойств грунта, концентрации газовых компонентов и аэрозоля на разных высотах в атмосфере, состояния поверхности Мирового океана и др.

Первым инструментом для ранних спектральных наблюдений Земли из космоса стал ручной спутниковый спектрометр РСС. Впервые спектральные исследования атмосферы и природных образований на поверхности Земли были проведе-

ны на космических кораблях «Союз-5», «Союз-7», «Союз-9» и на орбитальной станции «Салют» с помощью спектрографа РСС-2 [10], [11]. На орбитальных станциях «Салют-3» и «Салют-5» использовался спектрограф РСС-3, вошедший в состав комплекса аппаратуры станции «Мир» [12]. В дальнейшем на борту различных космических кораблей применялись такие спектральные приборы, как многоспектральная сканирующая система МСС-2 [13], спектрометр МКС-М [14], спектрометрическая система СКФ-М [15], многоканальные спектрометры «Спектр-15» и «Спектр-256» [16]. С учетом их преимуществ и недостатков спектрометр РСС оказался наиболее пригодным (по своему пространственному разрешению и размеру поля зрения) как для съемок Земли из космоса, так и для проведения самолетных и наземных измерений.

Одновременное применение спектрометра РСС-3 в составе аппаратуры орбитальной станции «Мир» и на борту средств малой авиации (Ан-2, Ми-8, Ка-26) в ходе совмещенного подспутникового эксперимента позволило оценить влияние спектрального пропускания атмосферы на альbedo природных объектов при их дистанционной съемке из космоса [11], [17]. В ходе комплексного многоуровневого эксперимента «Внутренние водоемы – 86» с помощью спектрометров РСС были выполнены спектральные съемки Рыбинского водохранилища с борта судов и самолета [18]. В июле 1990 г. была проведена съемка различных видов поверхности в Лапландском биосферном заповеднике с борта вертолета. Полученные данные совместно с данными многоспектрального сканирующего радиометра, установленного на спутнике «Космос-1939», и результатами химического анализа контактных проб снега позволили оценить влияние выбросов металлургических комбинатов в Апатитах и Мончегорске на состояние растительности и снежного покрова [19].

На рис. 1, *а* показан внешний вид прибора РСС-2М, а на рис. 2, *б* – более поздней его модификации РСС-3 с установленным телеобъективом.

Спектрометр выполнен по автоколлимационной схеме. Дифракционная решетка, наклоненная относительно оптической оси прибора, размещена в его задней части, внутри прямоугольного кожуха (рис. 1, *б*, слева). Сверху на корпус устанавливалась кассета с монохромной фотопленкой шириной 35 мм, на которую фиксировались результаты измерений. Механизм с ручным приво-

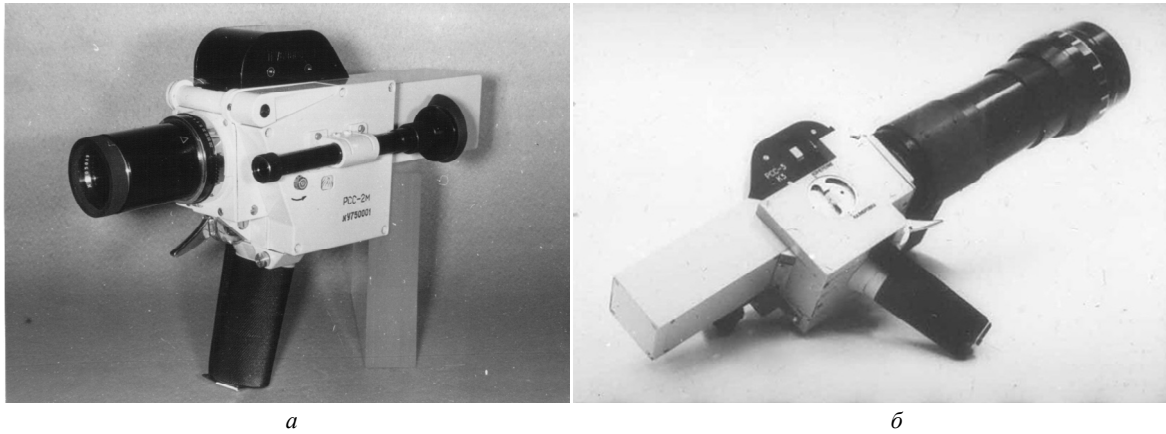
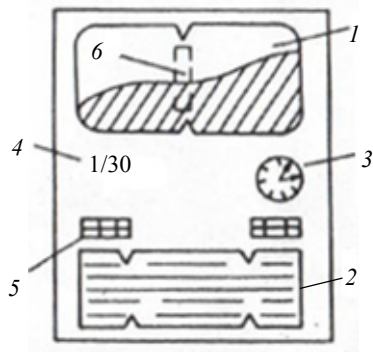
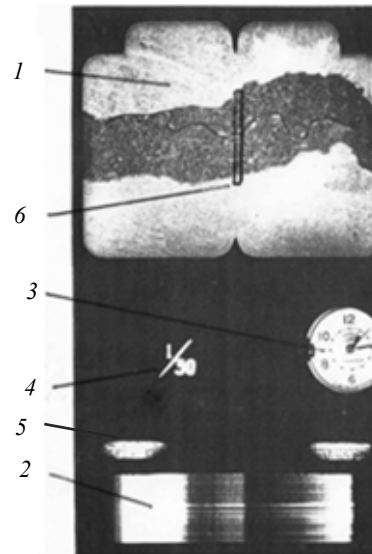


Рис. 1



а



б

Рис. 2

дом от курка, расположенного ниже объектива, обеспечивал перемотку пленки и взвод затвора после съемки очередного кадра.

В качестве примера результатов измерений с помощью спектрометра РСС на рис. 2 приведены условная схема построения кадра (рис. 2, а) и внешний вид кадра, содержащего спектр прямоугольного участка земной поверхности в долине Нила (рис. 2, б). В верхней части кадра расположено изображение объекта съемки 1, формируемое при помощи светоделительного куба (оптическая схема прибора более подробно будет рассмотрена далее) и использующееся для фотопривязки результатов измерений. Выделенная прямоугольная область 6 показывает проекцию входной щели спектрометра на исследуемую поверхность. Ниже находятся отметка о времени экспозиции кадра 4 и изображение циферблата часов 3, показывающее время съемки. Компактные механические часы входили в конструкцию

спектрометра, их изображение формировалось при помощи подсветки лампой накаливания, наклонного зеркала и собирающей линзы. Номером 5 выделены реперные отметки длин волн. Наконец, непосредственно спектральное распределение яркостей в области съемки показано в прямоугольной области 2 внизу кадра. Изображение на рис. 2, б – позитивное, т. е. большей спектральной яркости соответствуют более светлые области кадра. Обработка изображения выполнялась при помощи микрофотометра – прибора, определяющего светопропускание в выбранной точке кадра. С учетом зафиксированного времени экспозиции и известной светочувствительности пленки производился переход к численным значениям яркости в той или иной области спектра.

Удачная конструкция и хорошие оптические характеристики спектрометра РСС привели к идее его усовершенствования, которое заключалось в замене фотопленки как регистрирующего

элемента набором фотоэлектронных приемников излучения. Вследствие этого был создан полевой фотоэлектрический спектрометр (ПФС) [20]. В качестве фотоприемника в нем была использована линейка из 48 фотодиодов с размерами 0.5×3 мм и расстоянием между соседними элементами 50 мкм. С учетом характеристик оптической системы угловой размер поля зрения прибора составил $50 \times 3'$, а пространственное угловое разрешение – $1'$ при использовании объектива с фокусным расстоянием 135 мм и $2'$ при использовании телеобъектива с фокусным расстоянием 300 мм. Рабочий спектральный диапазон прибора соответствовал длинам волн от 400 до 750 нм.

Регистрирующая часть прибора была разделена на блок фотоприемного устройства и блок обработки и индикации сигнала. Коммутатор со-

единял выходы фотодиодов с инвертирующими входами операционных усилителей, составлявших каскад предварительного усиления. Сигнал с выхода каждого канала предварительного усилителя подавался через 16-канальный коммутатор на вход вторичного усилителя, коэффициент усиления которого можно было изменять с панели управления в 2, 4, 8, 16 раз для соответствия условиям освещенности объекта съемки. Усиленный сигнал поступал на вход аналого-цифрового преобразователя, с выхода которого цифровой код записывался в оперативную память по адресу, соответствующему номеру канала, заданному для вторичного коммутатора. На цифровом табло могли отображаться номер спектрального канала вместе с цифровым значением из оперативной памяти, преобразованным при помощи дешифра-

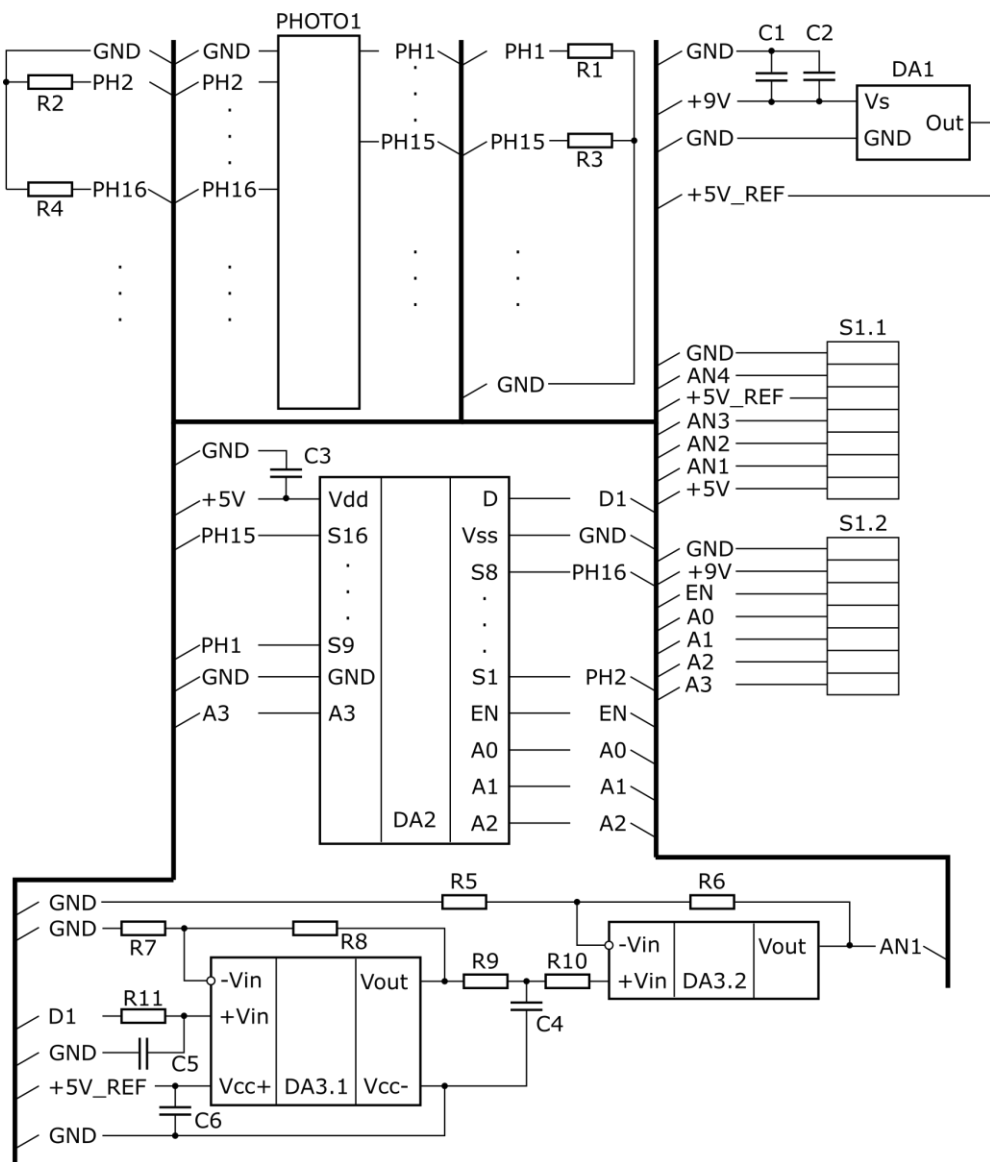


Рис. 3

тора. Ограниченное количество каналов коммутаторов позволяло выделять в рабочем диапазоне 20 спектральных полос, из которых только в любых 16 можно было проводить одновременные измерения и сохранять полученные значения. Полевой фотоэлектрический спектрометр использовал автономный источник питания.

С учетом недостатков ПФС его электронная часть была усовершенствована за счет передачи функций управления микроконтроллеру Microchip PIC16F877A. Данная модификация спектрометра получила обозначение ПФС-М [21]. В качестве фотоприемника была использована фотодиодная линейка из 64 элементов, что позволило регистрировать значения спектральной яркости в диапазоне 350...850 нм с разрешением 8 нм. Принцип построения аналоговой части схемы спектрометра показан на рис. 3.

Для простоты на рисунке показана обработка сигналов только четырех из каналов, многократные соединения (например, с общим проводом GND) и неиспользуемые выводы микросхем не показаны. Микроконтроллер формировал код, подающийся на управляющие входы (EN, A0 – A3) четырех 16-канальных мультиплексоров ADG706 (DA2). При этом выбирались четыре канала для одновременной регистрации (один из входов S1–S16 каждой микросхемы, для схемы на рисунке – каналы PH1–PH16), а с выходов мультиплексоров (D1) сигнал подавался на входы усилителей. Микросхемы AD8554 сочетают по четыре прецизионных операционных усилителя в одном корпусе, поэтому на основе двух таких микросхем были построены два усилительных каскада (DA3.1, DA3.2) для каждого из четырех каналов. Усиленный сигнал поступал на 4 аналоговых входа микроконтроллера (AN1–AN4), работающие как 10-битные аналого-цифровые преобразователи. Для повышения точности преобразования в схеме был использован прецизионный источник опорного напряжения (5 В, на схеме обозначено +5V_REF) типа REF195 (DA1). Во внутренней памяти микроконтроллера сохранялись 4 целых значения в диапазоне 0–1023. Затем формировался код, соответствующий следующей четверке каналов. Для регистрации 64 значений, составляющих полный спектр, этот цикл повторялся 16 раз.

Управление спектрометром осуществлялось при помощи четырех тактовых кнопок и знакогенераторного жидкокристаллического дисплея с 2 строками по 8 символов. Результаты измерений

можно было выводить на дисплей и передавать на компьютер через последовательный порт. Питалась схема от батареи «Крона» 9 В.

Спектрометр ПФС-М применялся, в частности, для съемок спектров вод озера Сайма с целью определения корреляционных зависимостей между концентрацией компонентов природных вод и комбинациями спектральных яркостей отраженного солнечного излучения [22]. В ходе исследования были получены уравнения регрессии для восстановления концентрации кислорода, азота, натрия и фосфора в природных водах по результатам дистанционного зондирования.

Кроме того, с помощью этого прибора проводились полевые и лабораторные измерения спектров различных видов растительности на территории Приморского, Петроградского и Кировского районов Санкт-Петербурга для определения корреляционных связей спектральных индексов со степенью загрязнения тяжелыми металлами [23]. Сравнение спектров одуванчика лекарственного и мать-и-мачехи при различных уровнях загрязнения показало более высокую информативность спектров мать-и-мачехи для дистанционной оценки экологической обстановки.

Основным недостатком ПФС-М был, однако, малый размер внутренней памяти. Ограниченная емкость энергонезависимой флеш-памяти микроконтроллера PIC16F877A позволяла сохранять не более 32 спектров по 64 целочисленных 10-битных значения в каждом. Появление доступных, компактных и мощных микроконтроллеров привело авторов к идее новой конструкции спектрометра, включающей в себя GPS-приемник для регистрации времени и координат проведения съемки, а также позволяющей сохранять условия и результаты измерений на съемной SD-карте [24]. Оптико-механическая схема модернизированного спектрометра показана на рис. 4.

Оптическая часть прибора подверглась минимальным изменениям. Излучение от объекта съемки собирается входной оптической системой 1, в качестве которой используется объектив с фокусным расстоянием 135 мм или телеобъектив с фокусным расстоянием 300 мм, крепящиеся к внешнему корпусу прибора байонетным соединением. Для регулировки входного светового потока в соответствии с динамическим диапазоном фотоприемника в систему добавлена револьверная диафрагма 3, которая представляет собой диск с набором отверстий различного диаметра. Макси-

мальное пропускание обеспечивает отверстие с диаметром, равным диаметру задней линзы объектива, а для регистрации темновых токов приемника один из секторов диафрагмы сделан сплошным. Диафрагма жестко закреплена на оси датчика угла поворота (энкодера) 4, передний конец оси свободно вращается в упоре 2.

Поскольку начиная с модели спектрометра ПФС часть оптической схемы, предназначенная для фотопривязки объекта съемки, более не использовалась, было решено преобразовать ее в видоискатель. Для этого светоделительный куб 5 повернули вокруг продольной оси прибора на 180°. Во внутреннем канале прицельной трубки установлена собирающая линза 6, которую можно перемещать в некоторых пределах для регулировки системы под индивидуальную остроту зрения, и зеркало 7, направляющее излучение в выходное отверстие.

На входе спектрометра излучение проходит через вертикальную входную щель 8 шириной 0.4 мм. Этот размер выбран так, чтобы не понизить спектральное разрешение, обеспечиваемое фотоприемником, и одновременно не уменьшить светосилу прибора.

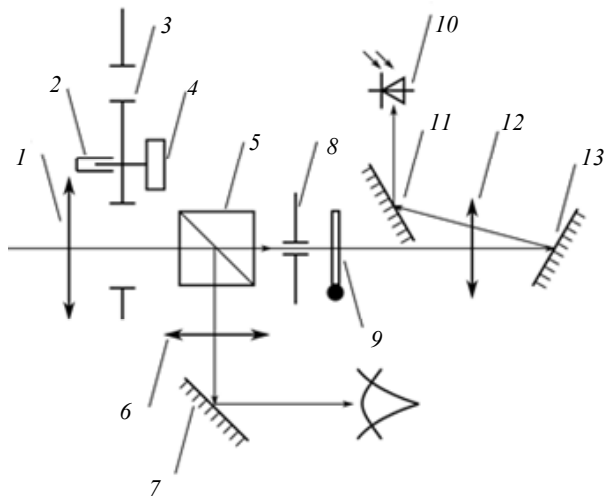


Рис. 4

Для калибровки спектрометра по излучению Солнца или другого источника в оптическом тракте помещен экран из молочного стекла 9, вращающийся вручную вместе с осью, перпендикулярной плоскости чертежа. При выполнении калибровки он устанавливается перпендикулярно оси прибора, при этом регистрируется распределение спектральных яркостей на его обратной стороне. Во время съемки экран укладывается горизонтально, на «пол» внутреннего корпуса оптической части.

Излучение раскладывается в спектр дифракционной решеткой 13 с 600 штрихами на миллиметр. Угол блеска решетки 12° обеспечивает сбор до 80 % излучения в рабочей области спектра. Решетка развернута против часовой стрелки относительно своей вертикальной оси – иными словами, ее ближний (относительно плоскости рис. 4) край находится дальше от объектива спектрометра, чем дальний. В соответствии с автоколлимационной схемой излучение дважды, до разложения в спектр и после, проходит через коллимационную собирающую линзу 12 с фокусным расстоянием 95 мм. В сочетании с параметрами решетки это дает линейную дисперсию 62 мм/мкм в первом порядке спектра в фокальной плоскости коллиматора. Наконец, наклонное зеркало 11 направляет излучение перпендикулярно главной оси прибора, на фотодиодную линейку 10.

Модульный принцип построения электронной части спектрометра ПФС-М позволил продолжить использование аналоговой платы с фотоприемником, мультиплексорами и операционными усилителями (рис. 3). Задачи управления спектрометром, первоначальной обработки результатов измерений, а также их сохранения были переданы микроконтроллерной плате MEGA 2560 PRO, построенной на базе AVR-микроконтроллера ATmega2560 с тактовой частотой 16 МГц. Эта Arduino-совместимая плата содержит 256 Кбайт энергонезависимой флеш-памяти и 8 Кбайт динамической памяти, доступной для переменных во время выполнения программы. Отдельным ее преимуществом в соответствии с типом плат Arduino Mega – это наличие 4 последовательных портов, позволяющих одновременно связываться как с компьютером (например, в ходе отладки), так и с другими устройствами без необходимости в более медленной программной эмуляции порта.

На рис. 5 приведена схема соединений между микроконтроллерной платой МС, аналоговой платой А и другими компонентами спектрометра. Соответствие напряжений высокого и низкого логических уровней позволило подключить управляющие входы мультиплексоров EN, A0–A3 напрямую к цифровым выходам МС D2–D6. Аналоговый сигнал с выходов усилителей AN1–AN4 подается на аналоговые входы A0–A3 платы МС, работающие как 10-битные АЦП: значение 0 соответствует нулевому напряжению на входе, а 1023 – 5 В. Аналоговая плата потребляет и напряжение 9 В напрямую от батареи спектрометра, и стабилизированное напряжение 5 В от преобразователя на микроконтроллерной плате.

Для отображения информации прибор использует знакогенерирующий жидкокристаллический экран с 20 столбцами и 4 строками, обозначенный на схеме LCD. Для управления экраном (входы RS и E) и непосредственно передачи кодов символов (D4–D7) используются цифровые выходы MC D7–D12. Вывод экрана RW замкнут на общий провод, что задает режим работы только на вывод данных. Вывод VO подключен к подвижному контакту переменного резистора R1, позволяющего менять контрастность символов на экране. Питается экран стабилизированным напряжением 5 В. Аналоговый вывод MC A4 может методом широтно-импульсной модуляции устанавливать на входе LCD A различные напряжения, задавая таким образом яркость подсветки экрана. Второй вывод цепи подсветки соединен с общим проводом.

GPS-приемник NEO-6M, обозначенный на схеме GPS, обменивается данными с MC через последовательный порт на цифровых выводах D18, D19 со скоростью 9600 бод. Для его питания используется стабилизированное напряжение 3.3 В с выхода преобразователя MC.

Для сохранения данных измерений используется модуль чтения SD-карт (SD). Режим его ра-

боты задается управляющим входом CS, подключенным к цифровому выводу MC D53, а для синхронизации на вход CLK подаются тактовые импульсы с выхода, обозначенного SCK. Обмен данными происходит через выводы MISO и MOSI, соединенные взаимнообратно. Питается модуль также стабилизированными 3.3 В.

Датчик угла поворота RE при вращении своей оси выдает на выводы CLK и DT, подключенные к цифровым входам D20, D21, пару прямоугольных импульсов, смещенных друг относительно друга по фазе. По тому, какой из импульсов опережает другой, определяется направление вращения диафрагмы. Следует заметить, что датчик не определяет абсолютный угол поворота диафрагмы, и для задания начального положения ее в процессе калибровки необходимо установить сплошным сектором против объектива. Питание углового датчика (5 В) обеспечивается преобразователем MC.

Для управления прибором используются 4 кнопки S1–S4, подключенные к цифровым входам микроконтроллерной платы D13–D16 в соответствии со схемой.

Питание всего спектрометра обеспечивается батареями перезаряжаемых аккумуляторов с выходным

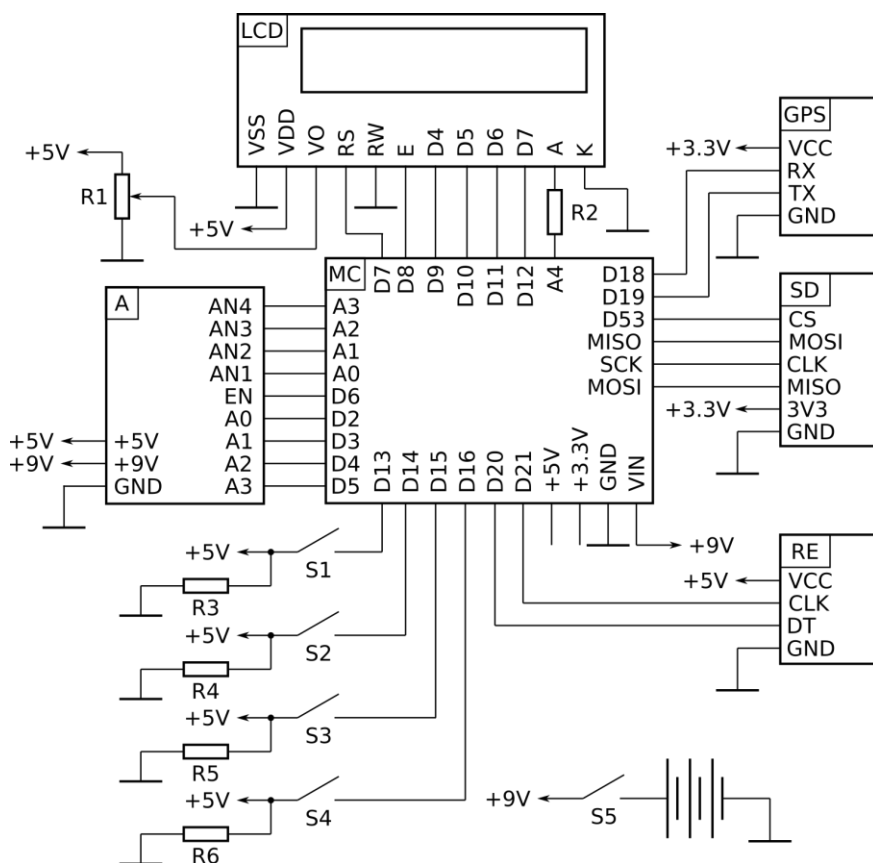


Рис. 5

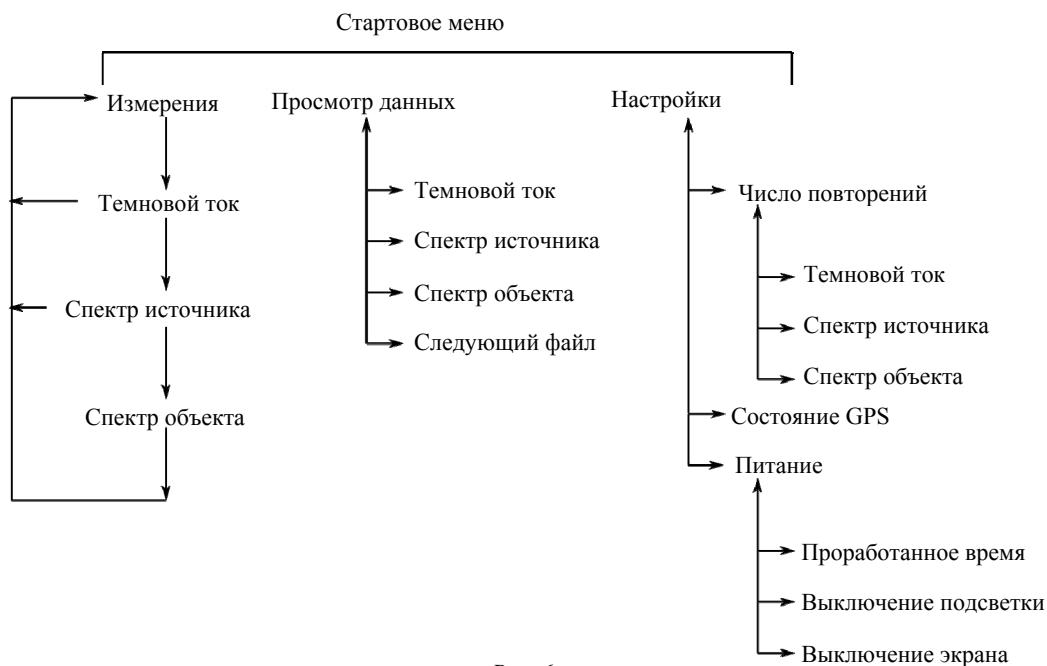


Рис. 6

напряжением 9 В. Параметры преобразователей напряжения, использованных на микроконтроллерной и аналоговой плате, впрочем, позволяют повышать напряжение питания до 11...12 В, в зависимости от типа используемых аккумуляторов. Прибор включается и выключается переключателем S5.

Управление спектрометром построено на выборе той или иной опции в меню нажатием соответствующей кнопки. На рис. 6 показаны связи между пунктами управляющего меню.

Измерение выполняется следующим образом. Сплошным сектором диафрагмы перекрывают входной световой поток, при этом фиксируется распределение темновых токов (шумов) по элементам фотодиодной линейки. Затем поднимают калибровочный белый экран и направляют спектрометр на Солнце (или другой источник излучения). Вращая диафрагму, выбирают положение, в котором минимальные значения яркости оказываются не меньше соответствующего темнового тока, а максимальные не выходят за верхнюю границу динамического диапазона приемника. Наконец, опустив экран и не меняя положения диафрагмы, спектрометр направляют на объект съемки и регистрируют соответствующий спектр. Результаты измерений, а также положение диафрагмы, координаты и время съемки сохраняются на SD-карте в текстовом файле, имя которого задается в соответствии с датой и временем съемок. Измерение можно прервать на любом этапе, данные в таком случае не будут сохранены.

Режим просмотра данных позволяет переходить между файлами, хранящимися на SD-карте, и выводить их содержимое на экран в численном виде. При этом можно переходить между просмотром распределений темновых шумов, калибровочных спектров белого экрана и собственно спектров объекта измерения.

Меню настроек дает возможность выбирать размер серии измерений (количество спектров, регистрируемых при одном нажатии на кнопку) отдельно для темновых токов, калибровочных спектров и спектров объекта. Экран состояния GPS-приемника выводит информацию о текущем времени, координатах и количестве используемых спутников, если приемник находится в рабочем режиме, либо показывает прогресс получения данных со спутников. В меню питания задаются интервалы времени, через которые для экономии заряда батареи отключается подсветка экрана и вывод информации на него. Кроме того, программный таймер отсчитывает время, проработанное с последней зарядки батареи, сохраняя его между включениями прибора. Это необходимо для контроля разрядки батареи, поскольку литий-полимерные и некоторые другие типы перезаряжаемых батарей сохраняют выдаваемое напряжение примерно на постоянном уровне почти до полной разрядки, что затрудняет их контроль по значению напряжения питания.

В соответствии с габаритами спектрометра, уменьшившимися за счет исключения из его конструкции механической части, был спроектирован

новый корпус, выполненный из ABS-пластика методом трехмерной печати. Размеры корпуса вдоль главной оптической оси прибора были выбраны таким образом, чтобы не нарушить фокусировки излучения в плоскости приемника.

Для проверки юстировки модернизированного варианта спектрометра и уточнения его спектрального разрешения и рабочего диапазона была проведена его калибровка. Источником излучения послужила дуговая ртутная лампа типа ДРШ. На рис. 7 приведены графики распределения яркости в спектре ртутной лампы L_λ и темновых токов L_d (в произвольных единицах). Здесь и далее для построения графиков использованы медианные значения по 10 измерениям. Значения спектральной яркости далее приводятся с учетом вычитания темновых шумов.

Сопоставление линейчатого спектра излучения паров ртути [25] с ожидаемым рабочим спек-

тральным диапазоном прибора позволяет считать пики, показанные на графике, соответствующими либо первому порядку дифракции линий, лежащих в видимой области, либо второму порядку линий ближнего ультрафиолета. Для разделения порядков использовались фильтры (цветные стекла), распределения коэффициента пропускания τ для которых приведены на рис. 8 [26].

Как видно из графиков, ультрафиолетовая область пропускания ультрафиолетового стекла УФС8 ограничена длиной волны 390 нм, а фиолетового стекла ФС7 – примерно 450 нм. Следовательно, с помощью одного из этих фильтров можно наблюдать линии ртутного спектра, приходящиеся на ультрафиолет, а в видимой области – их второй порядок дифракции, более слабый. Графики распределения спектральной яркости с учетом темновых токов $L_\lambda - L_d$ приведены на рис. 9, а, иллюстрируют этот результат.

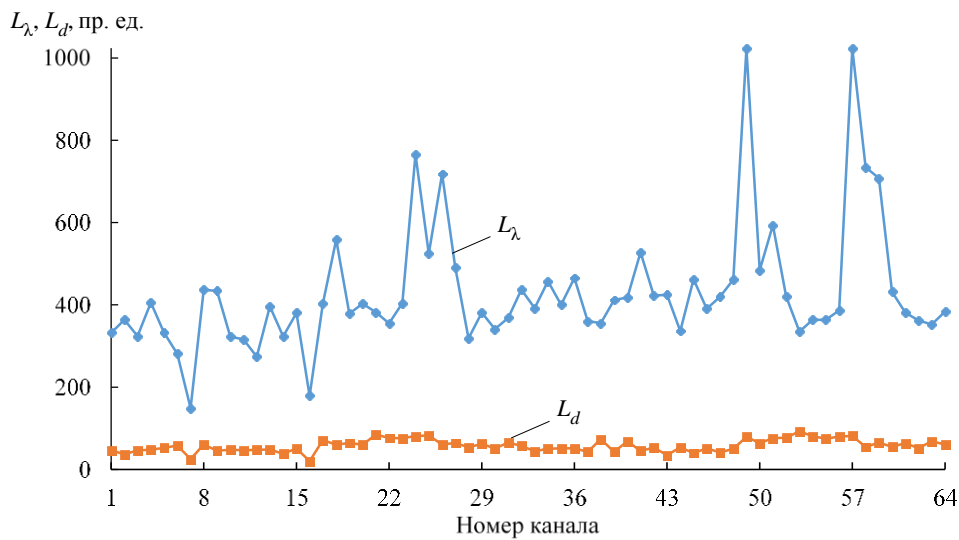


Рис. 7

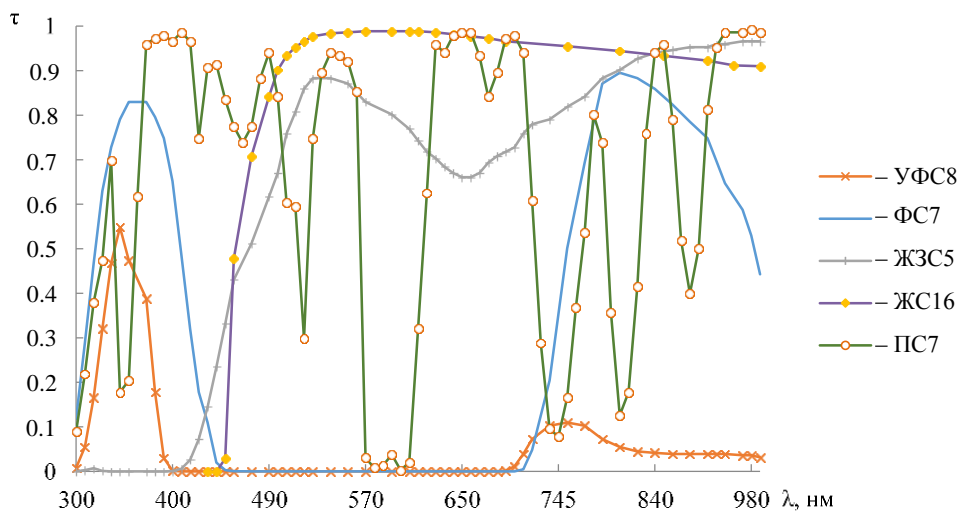
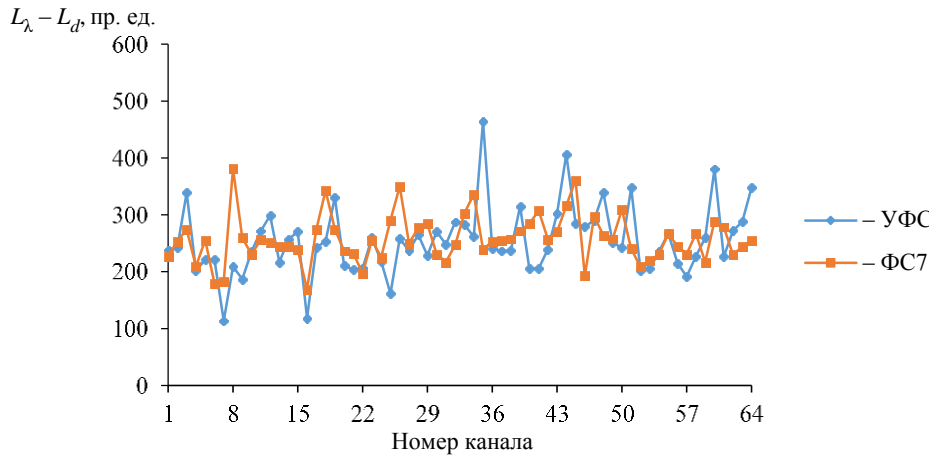


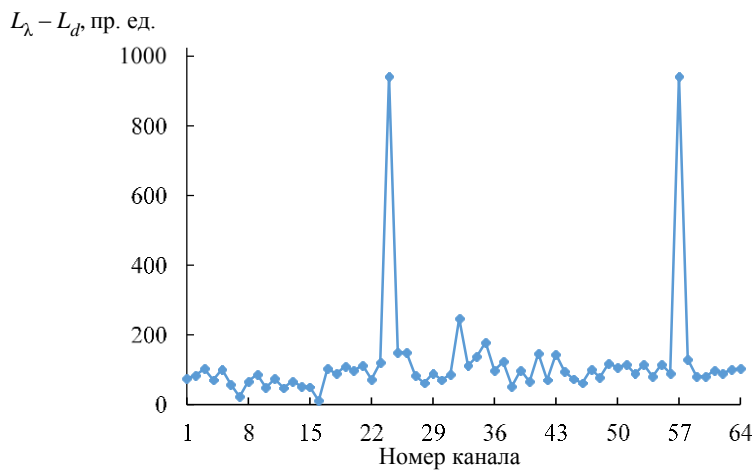
Рис. 8

В спектре с фильтром ФС7 заметен максимум в канале 8, отсутствующий при использовании УФС8. Можно предположить соответствие ему линии 405 нм, приходящейся на промежуток между длинноволновыми границами пропускания двух фильтров. Тогда слабый максимум в канале 3 должен соответствовать линии 365 нм.

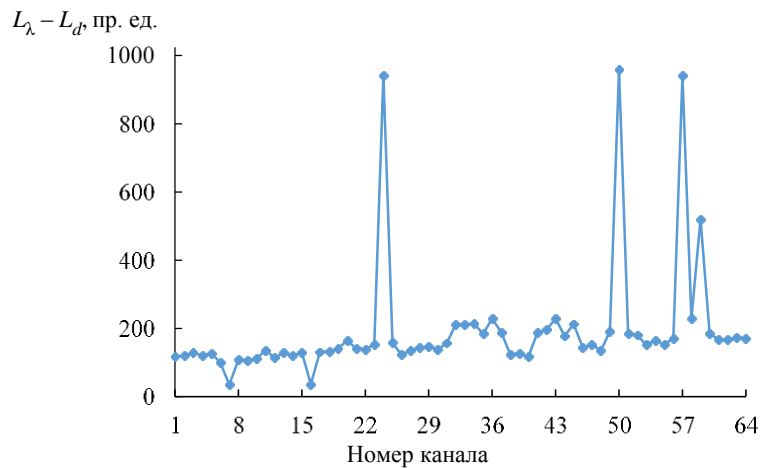
Для выделения яркой линии в зеленой области спектра (546 нм) использовалось сочетание пурпурного стекла ПС7 и желто-зеленого стекла ЖЗС5. Как видно из рис. 9, б, эта длина волны приходится на канал 26, в то время как в канале 57 наблюдается пик, соответствующий длине волны 794 нм. Отсутствующая в этом спектре



а



б



в

Рис. 9

линия в канале 24, очевидно, относится ко второму порядку дифракции.

Наконец, желтое стекло ЖС16 (рис. 9, в) блокирует все излучение с длиной волны менее 460 нм. Как и в предыдущем случае, в зарегистрированном спектре присутствуют линии 546 и 794 нм, к ним добавляются линии второго порядка в каналах 49 и 59.

В качестве вывода в таблице приведены длины волн идентифицированных линий спектра ртутной лампы, сопоставленные с номерами каналов и порядком дифракции.

Номер канала	λ , нм	Порядок
3	365	1
8	405	1
12	435	1
24	265	2
26	546	1
35	615	1
49	365	2
57	794	1
59	405	2

Уравнение калибровочной прямой, соответствующей этим точкам, имеет вид $\lambda = 340 + 7.95n$, где n – номер канала. Таким образом, рабочая об-

ласть спектрометра охватывает диапазон от 350 до 850 нм с разрешением не хуже 8 нм.

Модернизированный вариант спектрометра планируется применять для получения спектров растительности и водной поверхности в полевых условиях. Дальнейшее усовершенствование конструкции может включать в себя установку на входе оптической системы анализатора, т. е. вращающейся поляризационной пластинки с приводом от шагового двигателя. Возможность получать спектральные распределения яркости излучения при различных положениях плоскости поляризации повысит информативность дистанционного зондирования природных объектов [27].

Авторы статьи выражают благодарность: сотрудникам Молодежного НИИ А. Каримову и В. Рыбину за помощь в разработке программного обеспечения спектрометра; ассистенту кафедры МНЭ Н. В. Пермякову и ассистенту кафедры фотоники И. И. Михайлову – за изготовление корпуса прибора; доценту кафедры фотоники Г. А. Коноплеву и студенткам кафедры фотоники К. Антоненко и С. Политыко – за содействие в калибровке спектрометра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузников А. А. Визуальные наблюдения дневного, сумеречного и ночного горизонтов Земли с пилотируемых космических кораблей // Космические исследования. 1972. Т. 10, вып. 1. С. 100–112.
2. Оптические явления в атмосфере по наблюдениям с пилотируемых космических кораблей / под ред. чл.-корр. АН СССР К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
3. Исследование природной среды с пилотируемых орбитальных станций / Г. Т. Береговой, А. А. Бузников, О. Б. Васильев, Б. В. Виноградов, К. Я. Кондратьев. Л.: Гидрометеиздат, 1972.
4. Диплом на открытие № 106 / Г. Т. Береговой, А. Г. Николаев, В. И. Севастьянов, Е. В. Хрунов, К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, М. М. Мирошников, А. И. Лазарев, О. И. Смоктий. Зарег. 4 нояб. 1971 г.
5. Алексеев А. А., Шилин Б. В., Шилин И. Б. Опыт полевых видеоспектральных исследований // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 89–94.
6. Survey of current hyperspectral Earth observation applications from space and synergies with Sentinel-2 / J. Transon, R. d'Andrimont, A. Maignard, et al. // 2017 9th Intern. Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). Brugge: IEEE, 2017. P. 1–8.
7. Бузников А. А. Космическая спектрофотометрия природной среды с пилотируемых орбитальных станций // Оптический журн. 2015. Т. 82, № 7. С. 114–122.
8. Бузников А. А. Космическая спектрофотометрия геосистем с пилотируемых космических кораблей и орбитальных станций // Совр. проблематика дистанционных исследований геосистем. М.: ИГ АН СССР, 1983. С. 131–143.
9. Бузников А. А. Эксперимент по затменному зондированию атмосферы в полосе 2.7 мкм H_2O с орбитальной станции «Салют-4» // Изв. ЛЭТИ. 1981. Вып. 290. С. 3–8.
10. Некоторые результаты спектрофотометрирования природных образований с пилотируемого космического корабля «Союз-9» / К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, О. Б. Васильев и др. // Космические исследования. 1972. Т. 10, вып. 2. С. 245–254.
11. Некоторые результаты спектрофотометрирования Земли с космического корабля «Союз-7» / К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, В. Н. Волков и др. // Докл. АН СССР. 1970. Т. 195, № 5. С. 1084–1087.
12. Бузников А. А., Орлов В. М. Ручной спутниковый спектрограф РСС-3 для спектрометрирования Земли из космоса // Тез. докл. XI Всесоюз. совещания по актинометрии: в 7 ч. Ч. II. Приборы и методы наблюдений. Таллин: АН ЭССР, 1980.
13. Малогабаритный скоростной спектрометр МСС-2 / В. И. Беляев, Л. И. Кисилевский, В. Е. Плюта и др. // Журн. прикл. спектроскопии. 1978. Т. 29, вып. 6. С. 1070–1073.
14. Зюмних К. Х. Многоканальный спектрометр МКС-М: лабораторные исследования, калибровка и

проверка ее сохранности в полете // Исследования Земли из космоса. 1989. № 2. С. 71–77.

15. Кондратьев К. Я. Международная геосферно-биосферная программа (МГБП): состояние и перспективы // Изв. Всесоюзного геогр. общества. 1990. Вып. 6. С. 234–243.

16. Мишев Д. Н. Спектральные отражательные характеристики природных образований и их применение для целей дистанционного исследования Земли // Исследования Земли из космоса. 1990. № 1. С. 16–21.

17. Влияние атмосферы на альбедо при аэрокосмической съемке Земли в видимой области / К. Я. Кондратьев, А. А. Бузников, О. Б. Васильев и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, № 5. С. 471–487.

18. Литвинов А. С. Комплексный многоуровневый эксперимент «Внутренние водоемы – 86» // Биология внутренних вод. Информ. бюл. № 77. Л.: Наука, 1988. С. 3–4.

19. Use of remote and ground methods to assess the impacts of smelter emissions in the Kola peninsula / A. A. Buznikov, I. I. Payanskaya-Gvozdeva, T. K. Jurkovskaya, et al. // The Science of the Total Environment. 1995. Vol. 160–161. P. 285–293.

20. Бузников А. А., Леус В. И., Леус Н. Б. Полевой фотоэлектрический спектрометр // Изв. ГЭТУ. 1995. Вып. 481. С. 3–7.

21. Бузников А. А., Андреева А. В., Буданов А. В. Особенности спектральной аппаратуры для прове-

дения полевых исследований растительности // Естественные и техн. науки. 2009. Т. 40, № 2. С. 298–301.

22. Связь оптических характеристик с экологическим состоянием природных вод / А. А. Тимофеев, А. А. Бузников, А. В. Андреева, А. В. Буданов, А. Л. Есипов, В. В. Панфилов // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3, № 2. С. 155–160.

23. Оценка экологического состояния окружающей среды по спектрам отражения индикаторных видов растительности / А. В. Андреева, А. А. Бузников, А. А. Тимофеев и др. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3, № 2. С. 265–270.

24. Горяинов В. С., Бузников А. А., Костиков Е. В. Спектрометры для мониторинга городской растительности // СПбНТОРЭС: тр. ежегодной НТК. 2019. Т. 74. С. 264–266.

25. Strong Lines of Mercury (Hg) // NIST. URL: <https://www.physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2.htm> (дата обращения 19.12.2019).

26. Каталог цветного стекла / отв. ред. В. В. Варгин. М.: Машиностроение, 1967. 62 с.

27. Бузников, А. А., Горяинов В. С., Никаноров А. Д. Поляризация излучения, отраженного природными объектами – источник информации о влажности почвы и фазе вегетации растительности // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. 2018. Вып. 5. С. 405–407.

V. S. Goryainov, A. A. Buznikov, E. V. Kostikov
Saint Petersburg Electrotechnical University

REDESIGNING THE PORTABLE RSS SPECTROMETER

Passive spectral measurements play a major role in modern remote sensing of the Earth from space. The first spectral observations of the Earth's surface and atmosphere have been performed by the crews of Soviet spaceships, starting from the «Soyuz-5», and also of «Salyut-3» and «Salyut-4» orbital stations. The handheld satellite spectrometer RSS in its several consecutive modifications has been a valuable instrument for the fulfillment of these experiments. Later, using its design as a basis, a field photoelectric spectrometer was created, in which the photographic film (used in the original RSS design for a light-sensing element) was superseded by a photodiode array, and a microcontroller now controlled the device. The spectrometer's good optical design and the capabilities of microcontrollers, rapidly evolving over recent years, led the authors to the concept of RSS's modernization. The paper describes the design of a spectrometer obtained from such modernization, along with its main specifications. Some review papers on modern tendencies in space remote sensing, and a brief historical reference on the first spectral measurements from space are provided. Design features of the RSS spectrometer and its later modifications are described.

Remote sensing of the Earth, spectrometry of natural objects, portable spectrometer, spectrometer control system, Arduino-compatible microcontrollers