

Мобильный спектрофотометрический комплекс

Ю.А. Железнов¹, В.Ю. Хомич¹, Ю.В. Платов², А.И. Семенов^{3*}

¹Институт электрофизики и электроэнергетики РАН
191186, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
142190, Московская область, г. Троицк

³Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

Поступила в редакцию 29.01.2011 г.

Разработан и изготовлен мобильный спектрофотометрический комплекс, предназначенный для одновременных исследований фотометрических и спектральных характеристик излучения различных объектов наблюдений в лабораторных и полевых условиях.

Приведены примеры его использования при регистрации серебристых облаков, возникающих на высотах около 82 км, полярных сияний, а также при регистрации собственного свечения ночной верхней атмосферы в различных областях спектра.

Представлены примеры изображений фрагментов пуска ракеты, полученных при помощи оптического комплекса при наблюдении на Звенигородской станции ИФА РАН, во время старта твердотопливной ракеты с космодрома «Плесецк».

Ключевые слова: собственное излучение атмосферы, дистанционные измерения, спектр свечения атмосферы, атмосферные явления, спектрофотометрические измерения, регистрация излучения, спектрофотометрический комплекс; atmosphere intrinsic radiation, remote measurements, atmosphere glow spectrum, atmospheric phenomena, spectrophotometric measurements, radiation registration, spectrophotometric complex.

Введение

Для решения ряда научно-технических задач, связанных с исследованиями различных геофизических процессов и явлений в атмосфере с помощью собственного излучения атмосферы и искусственных светящихся облаков, возникающих при распылении с помощью ракет разного рода химических веществ, необходимо получение сведений о пространственных и временных вариациях наблюдаемого источника излучения, а также об его яркостных и спектральных характеристиках. Фотометрические измерения перемещения облаков позволяют определять скорости ветра и значения коэффициентов диффузии атмосферы на высотах возникновения облачных структур. Спектральные и яркостные характеристики облаков или собственного излучения верхней атмосферы содержат в себе важную информацию о температуре, химическом составе исследуемого источника, а также о физико-химических процессах, вызвавших это излучение.

В последние годы чрезвычайно большое внимание уделяется исследованиям, связанным с состоянием окружающей среды. Во многом это обусловлено глобальным изменением климата, вызванным, как предполагается, увеличением в атмосфере кон-

центраций химически активных газовых компонентов парниковой группы естественного и техногенного происхождения. Причем изменение состава атмосферы происходит практически по всей ее толще. И если измерения концентраций различных малых газовых составляющих в приземном слое атмосферы осуществляются относительно просто (химическим анализом, регистрацией спектров поглощения на горизонтальных трассах и т.д.), то измерения их концентраций в верхних слоях атмосферы, которая, вследствие своей разреженности, очень чувствительно реагирует на изменение своего химического состава, возможны в основном только спектрофотометрическими дистанционными методами, регистрирующими излучение различных химических компонентов верхней атмосферы. Такие характеристики могут быть получены только с помощью специальной спектрофотометрической аппаратуры.

К сожалению, на практике, при осуществлении комплексных измерений различных геофизических явлений, сопровождающих, например, запуск и эксплуатацию объектов ракетно-космической техники (РКТ) [1], а также при исследовании вариаций структурных характеристик атмосферы на разных высотах приходится одновременно использовать большую совокупность различных оптических и спектральных приборов, что требует обеспечения оперативности проводимых измерений.

В реальных условиях такие проблемы приходится решать довольно-таки часто индивидуально,

* Юрий Анатольевич Железнов; Владислав Юрьевич Хомич; Юлий Викторович Платов; Анатолий Иванович Семенов (anasemenov@yandex.ru).

выбирая каждый раз специализированную комплектацию необходимых приборов, которая определяется задачей исследования. Это связано с отсутствием до настоящего времени достаточно компактных промышленных образцов высококачественных оптических комплексов, позволяющих получать одновременно пространственные распределения характеристик светящихся образований при помощи фотометрических и спектральных измерений.

В настоящей статье описан разработанный и созданный мобильный спектрофотометрический комплекс, предназначенный для одновременных исследований фотометрических и спектральных характеристик излучения различных объектов наблюдений в различных условиях.

Существующие методы спектрофотометрических измерений светящихся атмосферных явлений

Существенной трудностью при регистрации спектров искусственных светящихся облаков и собственного излучения верхней атмосферы является малая интенсивность отдельных спектральных линий молекулярных полос, составляющая $1-10^2$ Рл, т.е. исчисляемая 10^6-10^8 фотон./с на 1 см^2 светящейся поверхности в телесном угле 4π. Вследствие этого на 1 см^2 светочувствительного элемента приемника излучения приходится поток порядка 10^2-10^4 фотон./с [2]. Поэтому с самого начала при создании комплекса возникла потребность использования светосильных спектрографов с применением высокочувствительных приемников излучения.

Эти проблемы, возникающие часто в практике астрономических и физических измерений, уже неоднократно обсуждались [3, 4]. Так, если при первых попытках регистрации спектров излучения верхней атмосферы с помощью призмных спектрографов и фотографическим способом требовалась экспозиция, измеряемая десятками часов, то благодаря использованию дифракционных светосильных спектрографов [5] и применению современных астрономических фотопленок [6] удалось достигнуть экспозиций в несколько часов.

Использование совместно с фотопленкой электронно-оптических преобразователей (ЭОП) в качестве усилителей яркости изображений регистрируемых спектров [7] стало значительным прогрессом в регистрации слабого излучения верхней атмосферы. В результате время регистрации излучения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра составило от единиц до десятков минут. Наряду с ЭОП для этих же задач использовались и фотоэлектрические методы измерений с применением фотоэлектрических умножителей (ФЭУ) [8].

Известно, что недостатками фотографического метода регистрации являются сложность и трудоемкость обработки фотоматериалов и необходимость нелинейных преобразований полученных почернений на фотопленке в значения интенсивности излучения, обусловившего эти почернения. В этом смысле фо-

тоэлектрический метод имеет явное преимущество, так как позволяет осуществлять регистрацию в виде электрического сигнала, величина которого пропорциональна интенсивности излучения и доступна для дальнейшей автоматической обработки. Однако этот метод требует последовательного сканирования перед ФЭУ выбранного спектрального интервала. При регистрации слабого излучения верхней атмосферы приходится производить достаточно медленное сканирование для обеспечения необходимого накопления сигнала, что может обуславливать значительные искажения в спектральном распределении измеряемого излучения.

В последние годы в практику регистрации и исследований слабых излучений стали активно внедряться приемники на ПЗС-матрицах [9]. Эти приборы, сочетая достоинства фотографических и фотоэлектрических методов, существенно расширили возможности исследований характеристик излучения различных светящихся объектов верхней атмосферы.

Требования к спектрофотометрическому комплексу

На основе изложенных выше методов измерений светящихся объектов в атмосфере совершенно очевидно, что для регистрации различных оптических явлений с быстро меняющимися пространственными и спектральными характеристиками необходимо обеспечить возможности одновременной регистрации изображения объекта (видео съемка в интегральном свете и в выбранных спектральных интервалах) и спектра свечения (спектральный прибор). Для этих измерений необходимо иметь средства калибровки.

Прибор должен обеспечить возможность регистрации изображения в интегральном и заданном интервалах диапазона спектра, получения спектра светящегося объекта в видимом и ближнем ИК-диапазонах ($0,5-1,2\text{ мкм}$), изменения поля зрения используемой фотометрической и спектральной аппаратуры от 1 до 45° , а также отслеживания и сопровождения перемещения объекта в пространстве. Необходимыми условиями являются получение результатов и обработка данных измерений в реальном времени.

Мобильный спектрофотометрический комплекс

Мобильный спектрофотометрический комплекс (МСФК) предназначен для одновременных исследований фотометрических и спектральных характеристик излучения различных объектов как в лабораторных, так и в полевых условиях. Внешний вид оптического комплекса представлен на рис. 1.

Комплекс состоит из нескольких блоков, комплектация которых в конкретных исследованиях может меняться в зависимости от задачи и условий наблюдений.

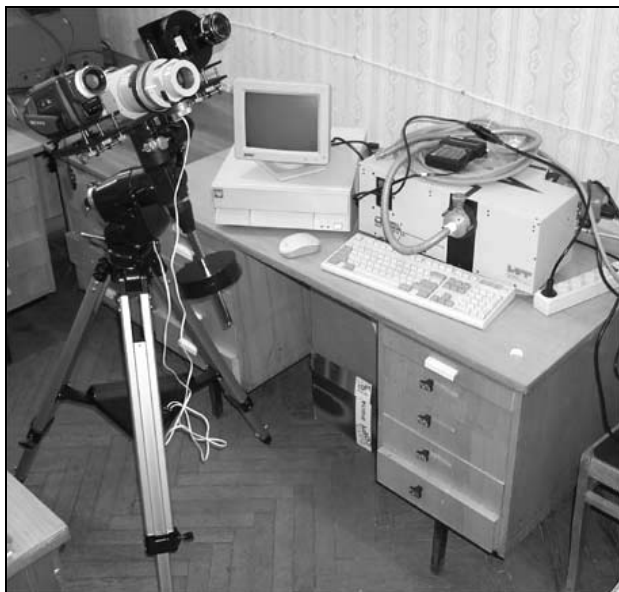


Рис. 1. Мобильный спектрофотометрический комплекс для проведения лабораторных и натурных измерений яркостных и спектральных характеристик светящихся объектов

В состав МСФК входят: системы регистрации светящихся объектов, спектрофотометры, система записи, хранения и обработки информации, монтаж для установки аппаратуры.

В качестве систем регистрации светящихся объектов используются:

1. *Цифровая видеокамера (Sony)* для регистрации динамических процессов. Выпускаемые промышленностью современные камеры могут работать в широком диапазоне освещенностей (до 0,2 люкс), имеют достаточно большой (до 10 бит) динамический диапазон и позволяют регистрировать процессы с временным разрешением порядка 0,05–0,1 с.

2. *Цифровые зеркальные фотоаппараты* (в комплексе использовались аппараты Canon EOS 1Ds Mark II, Kodak DC-290) для регистрации изображений светящихся объектов с высоким пространственным разрешением. Возможность смены объективов позволяет выбирать питающую оптику в зависимости от требуемого масштаба изображений и использовать фотоаппараты в качестве системы регистрации в спектрофотометрах. Необходимое разрешение при использовании цифровых камер в спектральной аппаратуре с запасом обеспечивают 16-мегапиксельные полномерные (24×36 мм) матрицы. Временное разрешение при съемке в непрерывном режиме ~0,2–0,3 с. Динамический диапазон матрицы ~10 бит.

3. *Система регистрации ST-7* (приемник излучения, использующий ПЗС-матрицу, фирмы Santa Barbara, USA) для регистрации объектов с низким уровнем яркости. При работе в режиме термоэлектрического охлаждения матрицы этот прибор позволяет получать изображения с большим временем накопления сигнала (часы), динамический диапазон в таком режиме регистрации составляет до 14 бит. Размер матрицы 500×500 пикселей.

Эта система регистрации может быть использована при наблюдениях относительно слабосветящихся объектов, в частности различных атмосферных и астрономических явлений, и широко применяется в любительских и профессиональных астрономических наблюдениях.

Для регистрации спектров светящихся объектов используются два спектрометра:

- 1) спектрофотометр MS-257™ORIEL;
- 2) портативный светосильный спектрограф, разработанный и изготовленный в ИЗМИ РАН, ИФА РАН и ИЭЭ РАН.

Спектрофотометр MS-257 производства фирмы ORIEL Instruments (США) предназначен для регистрации спектров излучения в диапазоне длин волн от 200 до 2500 нм в зависимости от используемых дифракционных решеток, максимальная дисперсия 2 нм/мм. При работе в видимой и ближней ИК-областях спектра в качестве системы регистрации используется приемник излучения INSTASPEC IV [10], который представляет собой ПЗС-матрицу с числом элементов (пикселей) 1024×128. Размер пикселя 26×26 мкм. Для получения наилучшего соотношения сигнал-шум ПЗС-матрица охлаждалась до –20 °С с помощью термоэлектрического холодильника. Приемник излучения подключался через интерфейсную плату к персональному компьютеру, с помощью которого осуществлялись автоматический контроль за работой приемника во время регистрации спектров и их фотометрическая обработка. Обработка сигнала производилась с помощью программного стандартного приложения InstaSpec 1.11 [10].

Этот спектрофотометр удобен при проведении исследований в лабораторных условиях, однако при работе в полевых условиях обладает рядом недостатков, связанных с необходимостью обеспечения сетевым электропитанием и переносом изображения исследуемых объектов на спектральную щель при помощи волоконной оптики.

Малогобаритный светосильный спектрофотометр

Оптическая схема спектрофотометра приведена на рис. 2.

В качестве коллиматорного и камерного объективов используются светосильные фотографические объективы (Zeiss, Nikon, Zenitar), обладающие высоким и равномерным пространственным разрешением по рабочему полю. Диспергирующим элементом является прозрачная дифракционная решетка (300, 600 или 1200 штр./мм). Такая схема спектрофотометра позволяет существенно облегчить юстировку прибора и упрощает его использование, что особенно важно при работе в полевых условиях.

Современные светосильные фотографические объективы (относительное отверстие 1,2–1,5) имеют достаточно хорошие хроматические параметры, что допускает их применение в спектральной аппаратуре при работе в видимой и ближней ИК-областях спектра. В качестве системы регистрации предусмотрено использование цифровых зеркальных фотоаппаратов,

приемника излучения INSTASPEC IV, а также системы фотографической регистрации с усилителями яркости (ЭОП) для наблюдений слабосветящихся объектов.

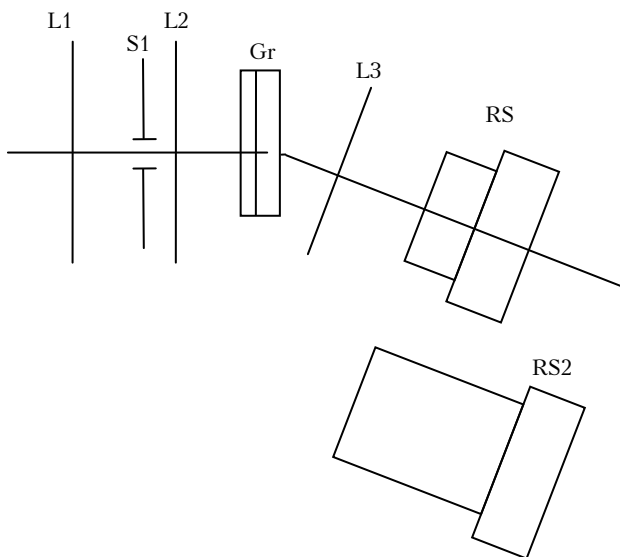


Рис. 2. Оптическая схема портативного спектрофотометра: L1 – объектив системы освещения щели; S1 – спектральная щель; L2 – коллиматорный объектив; Gr – прозрачная дифракционная решетка; L3 – камерный объектив; RS – система регистрации; RS2 – система регистрации с усилителем яркости

При использовании дифракционной решетки 600 штр./мм линейная дисперсия спектрографа за счет плавного изменения фокусного расстояния камерного объектива может варьироваться в пределах от примерно 20 ($f = 85$ мм) до 7 нм/мм (250 мм). При этом спектральное разрешение составляет 0,2–0,5 нм. При использовании системы регистрации с усилителем яркости спектральное разрешение определяется размерами ячеек микроканальной пластины ЭОП и составляет 0,5–1 нм.

Портативность прибора, простота использования, отсутствие необходимости в юстировке делают его достаточно универсальным инструментом при исследованиях, когда можно ограничиться относительно невысоким спектральным разрешением – от учебных лабораторных спектральных исследований до различных экологических и геофизических исследований, проводимых в полевых условиях.

В зависимости от цели наблюдений различные блоки комплекса монтируются на платформе, установленной на азимутальной или параллактической монтировке для наведения на объект наблюдения. В изготовленном комплексе используется монтировка CELESTRON G-8, снабженная механизмом ручного и электроприводного гидрирования по двум осям (см. рис. 1). Скорости электроприводного гидрирования могут изменяться в пределах от 0,2 до 1,5 град/мин. Указанная монтировка может использоваться как в Северном, так и в Южном полушарии; компенсация суточного вращения Земли может производиться на географических широтах, не превышающих 70°.

Масса комплекса, включающего все комплектующие блоки, не превышает 50 кг. Время развертывания комплекса в полевых условиях составляет приблизительно 2 ч.

Примеры использования МСФК в различных геофизических исследованиях

1. Оптические наблюдения

Для проведения наблюдений оптических явлений в верхней атмосфере, связанных с запусками ракетной техники, с достаточно высоким пространственным, спектральным и временным разрешением необходима организация наблюдательных пунктов, привязанных к местам расположения полигонов и трассам запусков ракет [11]. Поскольку области развития таких явлений расположены на высотах атмосферы более 100 км, наблюдательные пункты могут располагаться как непосредственно вблизи полигонов, так и на достаточно больших удалениях от них, вдоль трасс полета ракет-носителей в зависимости от конкретной задачи исследования.

Проведение наблюдений при запусках ракет с космодрома Байконур связано с определенными организационными трудностями и целесообразно в тех случаях, когда условия наблюдений (погода, время запуска, условия освещенности вдоль траектории запуска и пр.) с достаточно большой вероятностью гарантируют успешное выполнение работ.

Эти же требования распространяются на запуски с космодрома «Плесецк», однако для этого полигона возможна организация патрульных наблюдений на Звенигородской научной станции ИФА РАН, для чего на ней был организован наблюдательный пункт. Патрульные наблюдения в ночное и сумеречное время суток оптических явлений, связанных с запусками ракет на космодроме «Плесецк», проводились в период с 15 апреля по 15 сентября. В этот период высота земной тени в районе Плесецка не превышает 100 км (на широте 62,8° при склонении Солнца более 17,1°). Поэтому область верхней атмосферы, в которой проходит полет ракеты, всегда освещена Солнцем, и газопылевые облака, образованные выбросами ракетных двигателей, могут уверенно наблюдаться в ночных и сумеречных условиях на значительной территории к югу от места запуска.

Регистрация осуществлялась цифровой фотокамерой Kodak DC-290, которая позволяла проводить регистрацию в автоматическом режиме с частотой съемки от одного кадра 15 мин до непрерывной съемки (один кадр 2–4 с). В отдельные периоды наблюдений на пункте подключались и другие блоки мобильного оптического комплекса – спектральная аппаратура, система регистрации ST-7. Испытания оптического комплекса в полевых условиях показали, что он обладает достаточно высокой чувствительностью и высоким временным разрешением для регистрации свечений.

В качестве иллюстрации возможностей фотографического блока комплекса представлены фотографии (рис. 3, *a, б*), полученные на Звенигородской станции ИФА РАН во время запуска ракеты с космодрома «Плесецк» в июле 2001 г.



a



б



в

Рис. 3. Фотографии, полученные на Звенигородской станции ИФА РАН: *a* — за 2 мин до запуска и через 7 мин после запуска (*б*) ракеты в июле 2001 г. на полигоне «Плесецк»; *в* — серебристые облака, сфотографированные при помощи камеры Canon EOS 1D Mark2. Оптическая ось фотоаппарата направлена на север при зенитном угле 70° . Экспозиция 2 с

Было зарегистрировано интенсивное свечение вблизи горизонта, связанное с рассеянием солнечного

света на продуктах сгорания ракетного двигателя в сумеречных условиях. Продолжительность интенсивной фазы явления, определяемая временем разлета газопылевого облака ракетного выхлопа, составляет около 10 мин. На рис. 3, *в* представлена фотография серебристых облаков, полученная в июне 2002 г.

2. Спектральные наблюдения

Оценки оптических наблюдений и результатов фотометрических измерений характеристик светящихся объектов, появляющихся в ночном или сумеречном небе, показали, что эти данные могут быть использованы для анализа причин возникновения таких явлений. Однако для детального вывода о природе механизмов свечения наблюдаемых оптических явлений в атмосфере визуальных характеристик оказывается недостаточно. Для этого необходимы данные о спектральном составе регистрируемого излучения. В мобильном комплексе, как уже упоминалось выше, в зависимости от реализуемых задач предусмотрены два спектральных прибора: дифракционный спектрометр MS-257 и малогабаритный светосильный спектрометр, использующий прозрачные дифракционные решетки.

На рис. 4, *a* показан спектр свечения ночного неба в области 775–1032 нм, полученный с помощью спектрометра MS-257 в августе 2004 г. на ст. Звенигород.

На полученном спектре хорошо видны вращательно-колебательные полосы 5,1; 6,2; 7,3; 8,4 и 9,5 основного состояния $X^2\Pi$ молекулы гидроксила, а также полоса 0,1 атмосферной системы молекулярного кислорода $b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-$. Качество спектра позволяет надежно определять по распределению интенсивностей вращательных линий в зарегистрированных полосах вращательную и колебательную температуры молекулы гидроксила [2] и, таким образом, получать сведения о температуре атмосферы на высотах свечения и ее плотности. На рис. 4, *б* представлен спектр излучения продуктов сгорания двигателя твердотопливной ракеты. Спектр излучения газопылевого облака продуктов сгорания двигателя ракеты получен с помощью оптической телескопической насадки, которая переносила изображение светящегося облака с помощью световода на входную щель спектрометра. Оптическая ось телескопа вручную перемещалась за объектом наблюдения с помощью визира, установленного на монтировке CELESTRON G-8. Регистрация спектров осуществлялась с помощью электронно-оптического преобразователя, используемого как усилитель яркости изображения, что позволило сократить время экспозиции до нескольких секунд.

Регистрация молекулярных спектров эмиссий, возникающих в результате взаимодействия продуктов сгорания топлива ракетных двигателей или специально распыленных различных химически активных элементов, дает возможность определять температуру атмосферы на высотах распыления 100–160 км.

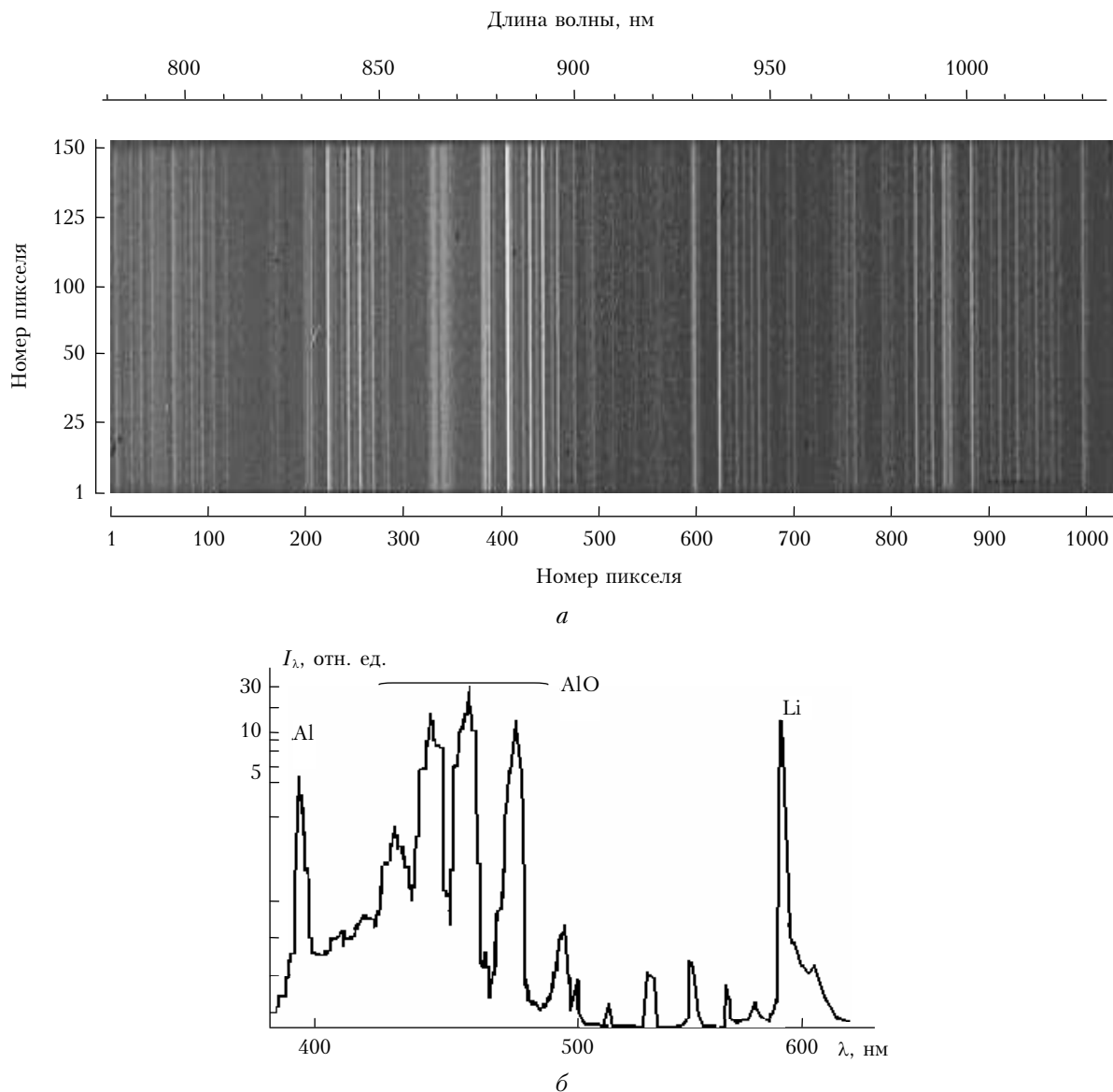


Рис. 4. Изображение спектра свечения ночного неба в области 775–1032 нм, зарегистрированного на ст. Звенигород в августе 2004 г. с помощью спектрометра MS-257 мобильного спектрофотометрического комплекса. На осях указаны номера пикселей ПЗС-матрицы приемника ISTASPEC IV (а). Спектр свечения облака, обусловленного продуктами сгорания двигателя твердотопливной ракеты (б)

Известно, что измерение температуры на этих высотах представляет достаточно сложную задачу, в частности из-за того, например, что в этом диапазоне высот практически отсутствуют эмиссии, обусловленные естественными компонентами.

Заключение

Опыт эксплуатации разработанного мобильного спектрофотометрического комплекса в лабораторных и естественных условиях показал, что его технические характеристики позволяют осуществлять регистрацию слабых и ярких источников излучений естественного и искусственного происхождения.

Прибор может быть рекомендован для проведения измерений фотометрических и спектральных характеристик светящихся объектов в различных типах исследований.

1. *Khomich V.Yu., Zheleznov Yu.A., Platov Yu.V., Semenov A.I., Shefov N.N.* Disturbance of hydroxyl emission in mesopause by combustion products of rocket engines // *Combustion Science and Technology*. Moscow: Torus Press, 2005. P. 17–26.
2. *Khomich V.Yu., Semenov A.I., Shefov N.N.* Airglow as an indicator of upper atmospheric structure and dynamics. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 739 p.
3. *Артемьев В.В.* Фотоэлектронные счетчики фотонов // *Оптико-механическая промышленность*. 1979. № 1. С. 62–68.

4. Берковский А.Г., Гованин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь, 1988. 272 с.
5. Капорский Л.Н., Николаева И.И. Оптические приборы: Каталог / Отв. ред. В.А. Никитин. М.: Машиностроение, 1969. Т. 4. 305 с.
6. Докучаева О.Д. Астрономическая фотография. Материалы и методы. М.: Физматлит, 1994. 480 с.
7. Потапов Б.П., Семенов А.И., Соболев В.Г., Шагаев М.В. Внутренние гравитационные волны вблизи мезопаузы. II. Аппаратура и методы оптических измерений // Полярные сияния и свечение ночного неба / Отв. ред. Ю.И. Гальперин. М.: Сов. радио, 1978. № 26. С. 30–65.
8. Broadfoot A.L., Kendall K.R. The airglow spectrum 3100–10000 Å // J. Geophys. Res. 1968. V. 73, N 1. P. 426–428.
9. Семенов А.И., Баканас В.В., Перминов В.И. Спектр излучения ночной верхней атмосферы Земли в ближней инфракрасной области // Геомагнетизм и аэрон. 2002. Т. 42, № 3. С. 407–414.
10. *The book of photon tools*. Stratford: Oriel Instruments, 1999. 800 p.
11. *Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду: Справочное пособие*. М.: Анкил, 2000. 640 с.

Yu.A. Zheleznov, V.Yu. Khomich, Yu.V. Platov, A.I. Semenov. Mobile spectrophotometric complex.

The paper describes designed and created mobile spectrophotometric complex intended for simultaneous research of both photometric and spectral features of radiation of various objects in both laboratory and field.

Examples of using the complex for registering silvery clouds encountered at about 82 km height, aurora Polaris, and intrinsic glow of night upper atmosphere in different spectral ranges are presented.

Images of solid-fuel rocket launched at Plesetsk site were taken with the complex at Zvenigorod station of IAP RAS.