

УДК 528.71, 631.42, 621.378.33+535.214

**Е.К. Наumenко, И.Л. Кацев, А.Н. Чумаков**

## **АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

*Рассматриваются вопросы, касающиеся разработки перспективных технологий зондирования поверхности Земли на основе дистанционного спектрометрирования. Дается анализ работ, выполненных в Институте физики НАН Беларуси по трем основным направлениям, включающим усовершенствование спектральных систем дистанционного зондирования, разработку методов априорной оценки информативности спектральных данных и разработку новых методов решения обратных задач с целью обеспечения оперативности определения искомым параметров, повышения надежности и точности решений. Приводится описание разработанных методик дистанционной идентификации различных природных объектов. Обсуждается проблема разработки основ лазерно-плазменного двигателя космического назначения.*

### **Введение**

Институт физики Национальной академии наук Беларуси (ИФ НАН Беларуси) – ровесник становления космической эры – с первых лет своего существования активно включился в исследования по новым актуальным научным направлениям своего времени. Наряду с такими направлениями, как лазерная физика и физика плазмы, нелинейная оптика и спектроскопия, оптика атмосферы и океана, особое место в деятельности института занимала и по сей день остается актуальной космическая тематика. За прошедшие годы в ИФ НАН Беларуси была создана аппаратура для дистанционного зондирования Земли, которая длительное время работала на борту космических станций «Салют-4», «Салют-6», «Салют-7», «Мир». В результате этого накоплен большой объем данных и создан каталог статистических характеристик спектральной плотности энергетической яркости излучения. Часть данных была использована при разработке модели фонов Земли. Выполнены экспериментальные и теоретические исследования спектральных характеристик подстилающих поверхностей, которые позволили решить ряд практически важных задач. Разработаны методики дистанционной оценки идентификации различных природных объектов, которые в настоящее время продолжают развиваться. Вместе с тем развиваются новые направления космической тематики. В данной статье, наряду с экскурсом в традиционно развиваемые в ИФ НАН Беларуси направления аэрокосмической спектрометрии, обсуждается проблема разработки основ лазерно-плазменного двигателя космического назначения.

Наиболее современным и производительным средством получения многих видов информации об окружающей среде и ее экологическом состоянии являются аэрокосмические исследования. Спутниковый мониторинг атмосферы, земных и водных поверхностей является важнейшей частью глобальной системы контроля окружающей среды. Десятки оптических инструментов на разных носителях осуществляют измерения спектральных и поляризационных характеристик солнечного излучения, отраженного земной поверхностью, которые содержат информацию о компонентном составе атмосферы и о состоянии природных объектов. В ходе аэрокосмических, наземных и комплексных экспериментов к настоящему времени накоплен большой объем данных о спектрах излучения, зарегистрированных на верхней границе атмосферы и на различных уровнях над поверхностью Земли. Сотни алгоритмов восстановления параметров атмосферы (аэрозоль, газы), земных поверхностей и воды используются для тематической обработки результатов спутниковых наблюдений, однако до сих пор актуальными остаются задачи разработки перспективных технологий дистанционного зондирования, включающие усовершенствование спектральных систем дистанционного зондирования, разработку методов априорной оценки информативности спектральных данных и методов решения обратных задач с целью обеспечения оперативности их решения, повышения надежности и точности определения искомым параметров. Принципиальным вопросом в дистанционном зондировании в настоящее время являются коррекция и тестирование спутниковых данных с привлечением

статистически обоснованных оптических моделей, построенных на основе спектрального мониторинга тестовых участков поверхности Земли.

В ИФ НАН Беларуси проводятся работы в указанных выше направлениях с целью повышения эффективности дистанционного зондирования.

### 1. Спектральные и спектрополяризационные приборы и их использование для дистанционного зондирования

ИФ НАН Беларуси имеет большой опыт проектирования, создания и практического использования спектральной аппаратуры для авиакосмических исследований. В институте разработана серия малогабаритных скоростных спектральных приборов МСС [1, 2] и на их базе – спектрополяриметров [3–5]. Все спектрометры снабжены каналом фотопривязки. В поляриметрах реализованы различные способы измерения поляризационных характеристик. Монохроматор [3] собран по схеме Эберта-Фасти с диспергирующим элементом (плоской дифракционной решеткой), обеспечивающим развертку спектра за 0,4 с. Поляризационные фильтры, размещенные перед выходной щелью монохроматора, ориентируются последовательно под углами  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $120^\circ$  с помощью мальтийского механизма. В приборе [5] использован метод Фурье-анализа интенсивности излучения, проходящего через равномерно вращающийся поляризатор анализатора, установленного перед входной щелью прибора, спектральные диапазоны выделяются интерференционными фильтрами. С помощью поляриметров [3, 4] измеряются спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), степень и азимут поляризации, с помощью прибора [5] – четыре параметра Стокса. Авиакосмическая спектрометрическая система «СКИФ» [6] предназначена для дистанционных измерений, визуализации и регистрации спектров излучения, поступающего от поверхности природных объектов с одновременным фотографированием исследуемого участка местности (рис. 1).

В изготовленной серии приборов СКИФ реализована возможность работы в диалоговом режиме с оператором. СКИФ обеспечивает накопление и усреднение от 2 до 256 спектров; вывод на дисплей средних значений яркости, значений яркости на любой длине волны, зависимостей яркости на любой длине волны от времени, автоматический выбор масштаба изображения спектра. Переносной оптико-механический блок СКИФ-ОМ приспособлен для работы с рук, что позволяет производить съемку любого объекта. Для съемки в стационарных условиях блок снабжен специальным кронштейном. Конструкция прибора позволяет оператору на борту летательного аппарата изменять спектральное разрешение в отдельных поддиапазонах до 0,03 мкм применительно к решению конкретных задач.



Рис. 1. Авиакосмическая спектрометрическая система «СКИФ»: слева – блок, осуществляющий накопление, отображение и обработку спектральной и служебной информации; справа – оптико-механический блок СКИФ-ОМ, включающий спектрометр, канал фотосопровождения, устройство визуального слежения за объектом

По техническим характеристикам (табл. 1) созданная в ИФ НАН Беларуси спектральная аппаратура не уступает аналогичным зарубежным системам дистанционного зондирования поверхности Земли [6–10].

Таблица 1

Технические характеристики малогабаритной спектральной аппаратуры

Параметр	МСС-2П	СКИФ
Спектральный диапазон, мкм	0,40–0,80	0,40–1,10 (1) 0,40–0,59 (2) 0,56–0,74 (3) 0,72–0,79 (4) 0,86–1,02 (5)
Спектральное разрешение, мкм	0,007	0,013 для (1) 2–5 для (2–5)
Угловое поле зрения	$5,7^\circ \times 1,15^\circ$	$10' \times 52'$ 28 <sup>0</sup> , фотопривязка 23 <sup>0</sup> , визир
Динамический диапазон, дБ	40	50
Пороговая чувствительность, Вт/см <sup>2</sup> ·мкм·ср	$10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-5}$ (1) $4,0 \times 10^{-4}$ (2–5)
Масса, кг	5	8 (блок СКИФ-ОМ)
Габариты, мм	314 × 310 × 106	326 × 262 × 220 (блок СКИФ-ОМ)
Время регистрации спектра, с	0,4	0,25

Примечание: в скобках указаны номера спектральных каналов.

Различные модификации спектральных приборов [1–6] неоднократно использовались в международных подспутниковых экспериментах (на Курском полигоне) и натурных экспериментах в интересах народного хозяйства [11–14 и др.]. Спектрополяризационные характеристики измерялись для разных классов подстилающих поверхностей (леса, пастбища, пустыни, горы и др.) как в наземных экспериментах, так и на разных высотах с борта вертолетов и самолетов-лабораторий в различных регионах бывшего СССР.

На основе экспериментальных исследований и численного моделирования спектров яркости отраженного излучения выявлены регрессионные функции связи между оптическими характеристиками мелиорированных торфяно-болотных почв и содержанием органики и влаги в почве, спектрами отражения растений и концентрацией хлорофилла в листьях, уровнем минерального питания, степенью поражения сельскохозяйственных культур болезнями, а также изучены закономерности формирования спектров отражения фотометрически неоднородных растительно-почвенных объектов. Разработаны методики дистанционной оценки уровня минерального питания посевов сельскохозяйственных культур, определения степени минерализации торфяников, дистанционного обнаружения вод с повышенным содержанием фитопланктона по координатам цвета, индекса листовой поверхности по значениям первых производных от коэффициентов яркости в спектральном диапазоне 0,71–0,74 мкм.

Выполненные экспериментальные и теоретические исследования спектральных характеристик подстилающих поверхностей позволили решить ряд важных задач, таких как:

- раннее обнаружение очагов поражения посадок картофеля фитофторой;
- дистанционное выявление очагов заболевания посевов озимой ржи ржавчиной;
- определение степени деградации мелиорированных торфяных почв;
- оценка устойчивости растительности к техногенным загрязнениям;
- определение концентрации фитопланктона и др.

В последние годы особую актуальность приобрели вопросы борьбы с распространением наркотиков. С целью выяснения возможностей дистанционного обнаружения посевов наркотикосодержащих растений на фонах естественной и сельскохозяйственной растительности был выполнен ряд работ по изучению спектров яркости посевов мака, участков дикорастущей конопли, сельскохозяйственных культур и фоновых растительно-почвенных объектов в районах Средней Азии [15, 16]. Измерения спектров яркости и освещенности выполнялись в наземных условиях приборами серии МСС и с борта вертолета спектрометрической системой «СКИФ». Были определены диапазоны длин волн, обеспечивающие условия максимального контраста посевов мака на фонах естественной и сельскохозяйственной растительности для фото- и видеосъемки как с малых высот, так и с верхней границы атмосферы; выявлены дешифровочные признаки, определяющие стадии вегетации опийного мака.

С помощью указанной аппаратуры, работавшей длительное время на борту космических станций «Салют-4», «Салют-6», «Салют-7», «Мир», накоплен большой объем спектральных данных о яркости излучения и его поляризационных свойствах на верхней границе атмосферы над земными поверхностями разных классов в диапазоне географических широт  $\pm 52^\circ$ . В ИФ НАН Беларуси по результатам космической съемки был создан каталог статистических характеристик спектральной плотности энергетической яркости отраженного излучения, часть данных была использована при разработке модели фонов Земли.

## **2. Методы априорной оценки информационного содержания спектральных данных применительно к задачам дистанционного зондирования**

Важным этапом в разработке как многоцелевых, так и специализированных помехоустойчивых методов оперативного контроля экологически значимых параметров природных объектов являются оценка и прогнозирование информативности спектральных данных, получаемых при дистанционном зондировании природной среды. Для выявления оптимальных условий проведения эксперимента, обоснования выбора спектральных диапазонов, обеспечивающих получение наиболее устойчивых и точных решений, необходимы методы априорной оценки возможных ошибок восстановления искомого параметра при решении обратных задач.

*Детерминированный подход.* В дистанционном зондировании имеется определенный класс задач, для которых априори известно, что по своей физической природе выходная переменная (измеряемая спектральная характеристика) является линейной функцией искомого параметра, характеризующего состояние объекта. В этот класс входят важные для сельского хозяйства задачи, такие как определение всхожести посевов и степени поражения всходов весенними заморозками, оценка состояния посевов после перезимовки, степени поражения сельскохозяйственных культур болезнями, оценка проективного покрытия, а также задача идентификации смешанных пикселей. При дистанционном спектрофотометрировании перечисленные выше задачи сводятся к определению относительных площадей фотометрируемых поверхностей, различающихся спектральной отражательной способностью. В этот класс могут быть отнесены также задачи, в которых путем преобразования переменных определение неизвестных параметров может быть сведено к решению систем линейных уравнений.

Решение задач восстановления параметров объекта из измерений яркости излучения на нескольких длинах волн сопряжено с определенными трудностями, характерными для систем линейных уравнений с неточно заданными значениями элементов матрицы и компонентов вектора свободных членов. В дистанционных измерениях матричные элементы (спектральные коэффициенты отражения) в момент съемки известны приближенно и могут быть подвержены временным и пространственным вариациям, а измерения яркости отраженного излучения отягощены экспериментальными ошибками. Оценкой точности определения искомого параметра в этом случае может служить норма разности решений систем линейных уравнений с точными и приближенными коэффициентами. Такой подход был использован для анализа возможности определения проективного покрытия и относительных площадей, занятых различными сельскохозяйственными культурами (ячменем, рожью, картофелем), с применением спектров отражения, измеренных с борта вертолета системой «СКИФ». На основе анализа устойчивости решений систем четырех линейных уравнений, составленных из всех возможных комбинаций

длин волн (всего 24 длины волны в диапазоне 0,5–0,9 мкм), было показано, что отсутствуют комбинации длин волн, обладающие ярко выраженным преимуществом в повышении точности решения задачи, и при относительных ошибках матричных элементов порядка 5 % ошибки определения относительных площадей достигают 50–60 %.

*Многомерный статистический анализ.* Характерной особенностью многопараметрических задач диагностики природных объектов являются временная и пространственная изменчивость параметров, наличие сложных функциональных связей между измеряемыми спектральными характеристиками и искомыми параметрами, а также экспериментальные и методические ошибки при регистрации спектров с борта авианосителей или космических аппаратов. Перечисленные особенности позволяют рассматривать объект как недетерминированный и для его исследования применять методы многомерного статистического анализа.

В работах [17, 18] показано, что при решении многопараметрических задач с нестабильными параметрами (варьирующими в пространстве и времени) эффективным для оценки информативности является способ, основанный на применении методов математической статистики в сочетании с физическим и математическим моделированием процессов взаимодействия излучения с объектом. Разработанный способ, в основу которого положена теория оптимального планирования эксперимента, позволяет на основе анализа небольшого количества численных или натуральных экспериментов дать оценку значимости влияния каждого параметра в интересующей области их варьирования, проанализировать чувствительность измеряемой характеристики к изменению каждого параметра и обосновать выбор оптимальных условий проведения экспериментов для повышения точности решения задачи.

Разработанный метод был использован при решении некоторых задач, связанных с дистанционным зондированием:

1. С целью выявления спектральных диапазонов, наиболее пригодных для передачи спектральной информации в условиях аэрозольных помех, были выполнены оценки значимости влияния параметров естественных аэрозолей и маскирующих дымов на оптическую передаточную функцию в видимом и инфракрасном диапазонах [18].

2. Применительно к задаче дистанционного обнаружения районов повышенной биопродуктивности в открытых водах океана была построена модель взаимосвязи яркости выходящего из воды излучения с концентрациями основных компонентов (фитопланктона, минеральной взвеси и растворенного органического вещества) [19]. Анализ коэффициентов модели показал, что традиционно используемый индекс цвета мало информативен относительно концентрации фитопланктона. Задачу определения концентрации фитопланктона необходимо решать в комплексе с определением концентрации всех трех компонентов.

3. Выявлены оптимальные спектральные диапазоны, использование которых обеспечивает определение компонентов с минимальными ошибками.

*Разработка оптической модели объекта.* Предлагаемый подход может быть использован не только как способ оценки чувствительности измеряемой величины к изменению параметров, характеризующих состояние объекта, но и как эффективный способ построения многопараметрической математической модели недетерминированного объекта в виде уравнения связи измеряемой спектральной характеристики с параметрами состояния объекта на основании небольшого количества экспериментов. Такую возможность обеспечивает основной принцип теории оптимального планирования – принцип многофакторности, согласно которому для решения задач со многими параметрами исследователю предлагается ставить опыты так, чтобы варьировать все параметры одновременно в соответствии с оптимальным планом эксперимента, в отличие от традиционного подхода, при котором изучается влияние каждого параметра поочередно.

В оптической модели объекта, которая строится на основе результатов измерений спектральных характеристик, выполненных в соответствии с оптимальным планом, имеется возможность учета вероятных вариаций разных параметров (например, высоты и плотности растений, направления и силы ветра, пространственных вариаций оптических свойства почв и т. п.). Такая многопараметрическая модель представляет собой гибкий инструмент для прогнозирования отражательных характеристик подстилающей поверхности на момент спутниковой съемки. Ее применение позволит сократить затраты на проведение дорогостоящих подспутниковых экспериментов и одновременно увеличить точность корректировки.

Спектральная аппаратура, аналогичная разработанной в ИФ НАН Беларуси, может быть с успехом использована для сбора спектральной информации, необходимой для создания оптических и спектрополяризационных моделей подстилающих поверхностей разных классов, включая тестовые участки. Аппаратура обеспечивает возможность измерения яркости отраженного излучения в абсолютных единицах и параметров Стокса со спектральным разрешением 0,003–0,01 мкм, что позволяет моделировать сигналы на входе спутниковых приборов для любого спектрального канала с учетом пространственной неоднородности тестовых объектов.

### 3. Комплексная информационно-аналитическая система

Выше было дано описание трассовой спектральной аппаратуры и ее применения. В настоящее время при дистанционном зондировании Земли из космоса широко используются различные типы аппаратуры для получения изображений местности. Наряду с классом оптико-электронных приборов, базирующихся на многоэлементных приемниках, продолжают применяться фотографические системы. Фотоизображения до сих пор выдерживают конкуренцию, так как имеют высокое пространственное разрешение и высокую точность геометрической привязки к местности, что весьма ценится при решении задач картографического характера.

Необходимым условием для осуществления количественной интерпретации данных многозональной съемки в целях решения экологических и природоресурсных задач является получение высококачественных информативных снимков в каждом спектральном канале.

В течение нескольких лет ИФ НАН Беларуси совместно с ОАО «Пеленг» проводили работы по созданию новой аэрокосмической изображающей системы, реализующей преимущества фотографических и оптико-электронных методов регистрации изображений [20, 21]. Планировалось создать систему из согласованно работающих четырехканального фотоаппарата и пятиканального сканирующего радиометра, размещенных на одной платформе (табл. 2). В основу функционирования системы положена опережающая съемка природных объектов спектрометриком, обработка и анализ данных на борту летательного аппарата с дальнейшим использованием результатов их анализа для выработки команд управления режимом работы фотоаппаратуры.

Суть работы комплексной информационно-аналитической системы состоит в следующем. Сканирующий спектрометриком на ПЗС-линейках обеспечивает измерение спектральной плотности энергетической яркости в пяти спектральных участках из диапазона 0,53–1,75 мкм для элементов сцены, соответствующих кадру, снимаемому фотографической многозональной аппаратурой (МЗА). ПЗС-линейки расположены перпендикулярно направлению полета, и кадр изображения формируется за счет движения носителя. Опережающее формирование оптико-электронного кадра осуществляется за счет наклона оптической оси радиометра в направлении полета.

Абсолютные значения яркости элементов сцены в спектральных каналах радиометра вычисляются с использованием цифровых сигналов от каждого элемента ПЗС-линейки с учетом спектральной чувствительности. Для оценки принадлежности элемента сцены (пикселя) к определенному классу поверхности (облачность, растительность, вода, почва, пустыня, снег или неопознанный класс) применяется совместный анализ данных всех спектральных каналов. Алгоритмы распознавания классов подстилающей поверхности строятся на основе данных, полученных в экспериментах с борта орбитальных станций «Салют-4», «Салют-6», «Салют-7» и «Мир» спектральной аппаратурой, созданной ранее в ИФ НАН Беларуси [2–6]. В проектируемой системе планировалось по результатам анализа яркостей в кадре радиометра рассчитывать оптимальные значения диафрагмы для каждого спектрального канала МЗА и каждого класса в отдельности и передавать их в систему управления комплексом.

Из табл. 2 видно, что радиометр и фотографическая аппаратура имеют разное пространственное разрешение, отличающиеся спектральные диапазоны, разные системы регистрации, типы приемников излучения (фотоматериал и светочувствительные элементы ПЗС-линейки). Для выработки команд управления МЗА необходимо согласовать по энергетике сигналы двух регистрирующих систем. В работе [22] рассмотрены вопросы, связанные с оценкой потоков светового излучения, которое поступает в плоскость изображения спек-

тральных каналов МЗА при съемке поверхности Земли из космоса, создаваемых ими уровней освещенности и степени почернения фотоматериалов в зависимости от экспозиции; предложен способ выбора оптимальных значений времени экспонирования при съемке различных классов земной поверхности в каждом спектральном канале МЗА. Выполненные исследования дают возможность существенно и целенаправленно повысить качество и информационную емкость многозональных снимков.

Таблица 2

Основные технические характеристики информационного комплекса

Параметры	МЗА	Спектро- радиометр
Фокусное расстояние, мм	500	56
Угол поля зрения, град	26	26
Разрешающая способность на местности (H = 250 км) при коэффициенте контраста 0,2, м	3–5	50 (1–4) 500 (5)
Спектральные диапазоны съемки, мкм		
канал 1	0,53–0,57; 0,50–0,54; 0,545–0,565	0,53–0,57
канал 2	0,645–0,685; 0,58–0,62; 0,64–0,68	0,64–0,68
канал 3	0,71–0,77; 0,81–0,87; 0,735–0,765	0,71–0,77
канал 4	0,61–0,76	0,61–0,76
канал 5	–	1,55–1,75
Погрешность определения СПЭЯ, %		10
Количество кадров в каждом канале	4000	–
Масса аппаратуры, кг	846	15
Габаритные размеры, мм	1480 × 1288 × 1050	450 × 450 × 180

Вопрос согласования сигналов различных сенсоров имеет фундаментальное значение, поскольку унификация спектральных данных, полученных при дистанционном зондировании поверхности Земли системами с различными техническими характеристиками, позволит сопоставлять результаты измерений и сводить их в единый банк данных. Все это создаст основу для осуществления долговременного мониторинга поверхности Земли и позволит сделать количественные оценки изменений экологически важных параметров в зависимости от времени.

К сожалению, по ряду причин финансирование этих разработок было прекращено, хотя, несомненно, комплексная информационно-аналитическая система, предусмотренный на борту анализ спектров яркости подстилающих поверхностей и экспресс-классификация природных объектов за промежуток времени между моментом получения электронного изображения и фотосъемкой поверхности создают новые возможности для определения в ходе съемки оптимальных условий экспонирования, обеспечивающих повышение качества, надежность и точность информации.

#### 4. Атмосферная коррекция спутниковых данных

Атмосфера существенно искажает спектральные характеристики земной поверхности, измеряемые оптико-электронными спутниковыми приборами. Поэтому эффективность применения спутниковой информации для решения ряда экологических и народнохозяйственных задач в значительной мере определяется эффективностью атмосферной коррекции спутниковых измерений, которая до настоящего времени является сложной и трудоемкой процедурой с использованием ряда априорных предположений.

В ИФ НАН Беларуси разработан оригинальный итерационный алгоритм и создано программное обеспечение атмосферной коррекции спутниковых данных для обработки

космических снимков в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, позволяющее очистить спектрональные космические снимки от искажающего влияния атмосферы. Алгоритм основан на развитых ранее быстрых и точных методах расчета переноса излучения в системе «атмосфера – подстилающая поверхность», что обеспечивает его уникальное быстродействие и оперативность обработки спутниковых данных. В алгоритме проводится дискриминация облачных пикселей и разделение участков поверхности по признаку «суша» или «вода». При этом учитываются профили давления и температуры в атмосфере, широтная модель молекулярной атмосферы, высота поверхности над уровнем моря. Алгоритм позволяет оценить локальные параметры атмосферы, в частности ее спектральную оптическую толщину, и восстановить истинные спектральные коэффициенты яркости подстилающей поверхности.

Первая версия программного пакета FAR (Fast Albedo Retriever) реализует данный алгоритм применительно к видеоспектрометру, разрабатываемому ЗАО «Научно-производственное объединение “Лептон”» совместно с ФГУП «ЦНИИмаш» и НИИ космических систем – филиалом ГКНПЦ им. М.В. Хруничева.

Входными данными программы являются результаты измерений спутникового инструмента. Для каждого пикселя задаются спектральные коэффициенты яркости, измеренные в различных спектральных интервалах в диапазоне 0,4–0,9 мкм; азимут и зенитный угол инструмента; азимут и зенитный угол Солнца; параметры, определяющие процедуру коррекции. Системные требования для работы программы: операционная система Windows 2000/XP; 20 Мб свободного дискового пространства; объем необходимой виртуальной памяти варьируется в зависимости от размеров обрабатываемого файла и параметров модели атмосферы. Основным выходным продуктом программного пакета являются карты распределения спектральных альбедо подстилающей поверхности.

Практически во всех известных алгоритмах атмосферной коррекции спутниковых данных используется метод lookup tables (LUT). Основной недостаток этого метода – необходимость замены массива предварительно вычисленных данных при изменении каких-либо параметров модели. Отличительной особенностью нового алгоритма атмосферной коррекции является проведение численных процедур расчета переноса радиации для конкретной модели системы «атмосфера – подстилающая поверхность», а также применение метода наименьших квадратов для определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности. Это обеспечивает гибкость алгоритма и, в частности, позволяет легко варьировать модели атмосферы, изменять число используемых длин волн и их положение в спектре излучения, регистрируемого на верхней границе атмосферы, а также адаптировать этот алгоритм для обработки данных различных спутниковых оптических инструментов, в том числе разрабатываемых в Федеральном космическом агентстве РФ, а также в ESA и NASA.

Результаты тестирования показали высокую эффективность разработанного алгоритма и программного пакета для восстановления характеристик аэрозольной атмосферы и истинных спектральных коэффициентов яркости подстилающей поверхности по коэффициентам яркости системы «атмосфера – подстилающая поверхность», регистрируемым спутниковым прибором на верхней границе атмосферы. Обработывались данные, полученные спутниковым инструментом MERIS на европейской платформе ENVISAT. Результаты обработки сравнивались с аналогичными, полученными другими алгоритмами по данным измерений различными спутниковыми инструментами (MODIS, MISR, AATSR, POLDER) в одном и том же районе примерно в одно и то же время. Измерения проводились 13 октября 2006 г. над малооблачным районом в Центральной Европе, в основном в Германии (от 49 до 53 N широты и от 7 до 12 E долготы). Важно, что в это же время в нескольких точках исследуемого района проводились измерения аэрозольной оптической толщины (AOT) атмосферы с помощью наземной сети AERONET.

Средние значения AOT, восстановленные с помощью программного пакета FAR, хорошо согласуются с результатами алгоритмов MERIS ESA, MISR JPL и MODIS NASA, а также с данными наземных измерений сети AERONET на длине волны  $\lambda = 550 \text{ нм}$  [23] (рис. 2).



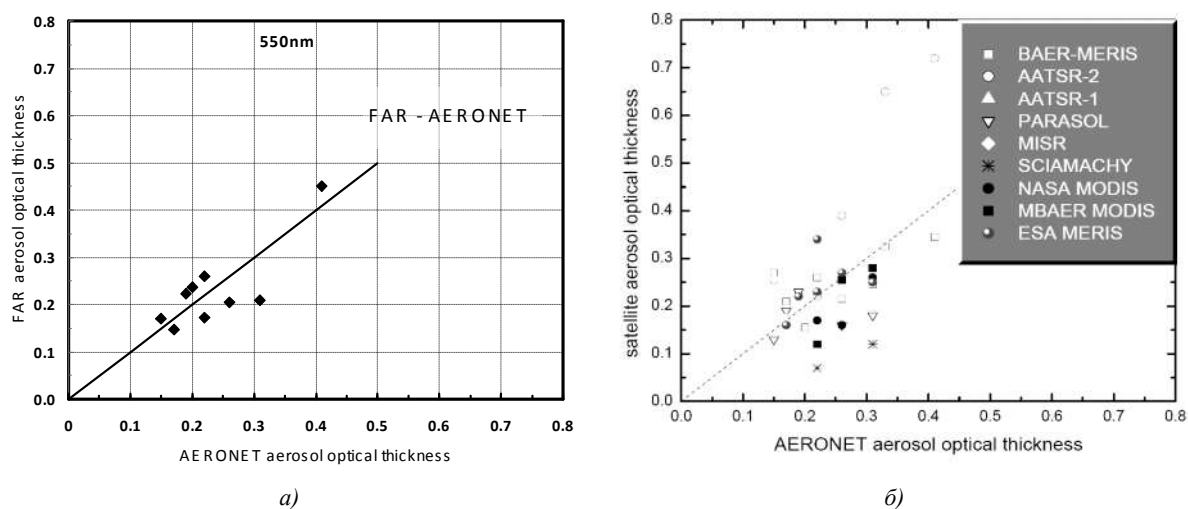


Рис. 2. Сравнение значений AOT с данными сети AERONET:  
 а) восстановленных по алгоритму FAR; б) по другим алгоритмам

Результаты тестовой обработки многоспектральных изображений показали, что время обработки по разработанному алгоритму сокращается в несколько раз по сравнению с лучшими зарубежными алгоритмами при сохранении погрешности восстановления спектральных альбедо поверхности порядка 1–2 %.

## 5. Разработка основ лазерно-плазменного двигателя космического назначения

Идея использования лазерного воздействия на материалы для создания реактивной тяги была впервые экспериментально обоснована Г.А. Аскарьяном [24]. Впоследствии А.Р. Кантровиц выдвинул концепцию вывода объекта на околоземную орбиту с помощью двигателя, основанного на поглощении излучения от расположенного на Земле лазера, что открыло перспективу многократного уменьшения стоимости доставки в космос полезного груза [25]. Проблемы создания таких двигателей, использующих воздух в качестве рабочего тела, неоднократно анализировались [26], а работы по их созданию ведутся и в настоящее время при поддержке Международного научно-технического центра. Заметный вклад в разработку физических основ лазерно-плазменных двигателей (ЛПД) был внесен и белорусскими физиками [27–29].

Решение многих задач освоения ближнего космоса связывают в последние годы с использованием микроспутников с малой массой [30]. Для управления такими микроспутниками требуются небольшие движущие импульсы, выверенные с большой точностью. Поэтому разработка физических основ лазерно-плазменных микродвигателей космического назначения была включена в белорусско-российскую космическую программу «Космос-СГ» [31] в качестве одного из заданий, в рамках которого ведется совместная работа ИФ НАН Беларуси и ФГУП «ЦНИИмаш». Достигнутые уровни развития физики лазерного воздействия на материалы и лазерной техники обеспечивают реальную основу для создания таких двигателей при условии решения ряда проблем. Среди них – выбор оптимального режима лазерного воздействия и расходуемого материала для эффективного набора механического импульса в процессе образования и разлета лазерной плазмы, создание малогабаритной и эффективной лазерной системы, а также выбор оптимальной схемы построения двигателя. В решении этих проблем участвуют сотрудники ИФ НАН Беларуси и Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси.

В результате выполненных исследований выбраны перспективные материалы для рабочих тел ЛПД и эффективные лазерные системы, оптимизированы режимы лазерного воздействия на выбранные материалы, создан макет ЛПД и определен ресурс работы ряда рабочих тел из углеродных композитов и металлических сплавов [32–34]. Полученные результаты показывают, что оптимальная схема ЛПД может быть основана на следующих принципах: импульсно-

периодический режим лазерного воздействия на твердое рабочее тело с высокой интенсивностью лазерного излучения  $10^8$ – $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> при наносекундной длительности лазерных импульсов; использование моноимпульсного твердотельного лазера с диодной накачкой для формирования реактивного импульса отдачи, получаемого при воздействии излучения на твердое рабочее тело в режиме образования эрозионной плазмы; использование углеродных композитов в качестве рабочего тела лазерно-плазменного микродвигателя.

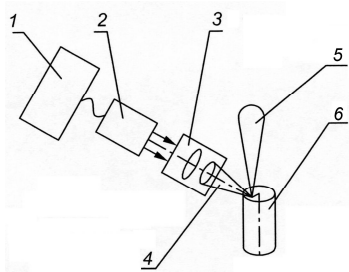


Рис. 3. Типичная схема ЛПД: 1, 2 – твердотельный импульсный лазер с диодной накачкой; 3 – объектив; 4 – лазерное излучение; 5 – струя лазерной плазмы; 6 – рабочее тело

ЛПД, основанный на испарении твердотельного материала лазерным излучением, способен обеспечить устойчивую работу на малых уровнях тяги (рис. 3). Созданный по такой схеме лабораторный макет ЛПД обеспечивает следующие характеристики: одиночный импульс тяги  $I = 2 \cdot 10^{-7}$  Н·с; удельный импульс  $I = V/g = 1100$  с; удельный вынос массы рабочего тела  $\Delta m_{\text{э}}/E = 1 \cdot 10^{-6}$  г/Дж.

В настоящее время создается прототип ЛПД, устройство которого защищено патентом Республики Беларусь [35].

### Заключение

Многолетняя работа, выполняемая ИФ НАН Беларуси по разработке и применению малогабаритной спектральной аппаратуры, способствовала созданию базы данных, которую целесообразно использовать при проектировании новых спектральных приборов для аэрокосмических исследований поверхности Земли. Накопленный опыт проведения натурных исследований в наземных условиях и с борта авианосителей, разработанные методы тематической обработки и анализа экспериментальных данных, приемы построения многопараметрических оптических моделей подстилающих поверхностей могут быть полезны при решении многих народнохозяйственных задач. Исследования по динамике лазерной плазмы находят применение в области разработки и создания нового семейства микродвигателей космического назначения – лазерно-плазменных двигателей.

### Список литературы

1. Спектрометрические исследования природной среды в видимом диапазоне с орбитальной научной станции «Салют-4» / Б.И. Беляев [и др.] // Журн. прикл. спектр. – 1978. – № 6. – С. 1011–1017.
2. Малогабаритный скоростной спектрометр МСС-2 / Б.И. Беляев [и др.] // Журн. прикл. спектр. – 1978. – № 6. – С. 1070–1073.
3. Малогабаритный скоростной спектрополяриметр МСС-2П / Б.И. Беляев [и др.] // ПТЭ. – 1985. – № 1. – С. 243.
4. Поляризационный радиометр «Надир» / Б.И. Беляев [и др.] // ПТЭ. – 1985. – № 1. – С. 247.
5. Малогабаритный скоростной спектрометр-поляриметр МСС-Стокс / Б.И. Беляев [и др.] // ПТЭ. – 1985. – № 1. – С. 239.
6. Авиакосмическая диагностика природной среды с использованием спектрометра «Скиф» / В.Е. Плюта [и др.] // Журн. прикл. спектр. – 1997. – № 5. – С. 691–697.
7. Wirth, J. AVCSR – an airborne radiometer as a tool for satellite data validation / J. Wirth, M. Peeters // Proceeding of IGARSS'88. – Edinburgh, Scotland, 1988. – P. 11–12.
8. Chaver, Pat.S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images / Pat.S. Chaver // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1989. – Vol. 55, № 9. – P. 1285–1294.

9. Kaufman, Y.J. Atmospheric effect on spectral signature-measurements and corrections / Y.J. Kaufman // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. – 1988. – Vol. 26, № 4. – P. 441–450.
10. Frouin, R. Calibration of NOAA-7 AVHRR, GOES-5, GOES-6 VISSR/VAS solar channels / R. Frouin, C. Gautier // Remote Sens. Environ. – 1987. – Vol. 22, № 1. – P. 73–101.
11. Комплексные дистанционные и контактные экологические исследования Солигорско-Старобинского промышленного района / А.А. Ковалев [и др.] // Тр. XIV Научных чтений по космонавтике. – М.: НИИТ АН СССР, 1993. – С. 56–71.
12. Чиберкус, Ю.Н. Исследование влияния параметров состояния растительного покрова на коэффициенты спектральной яркости / Ю.Н. Чиберкус, Е.А. Яновская, А.Ф. Яновский // Исследования Земли из космоса. – 1995. – № 6. – С. 59–66.
13. Зайцева, В.А. Определение степени деградации мелиорированных торфяных почв с различной влажностью по данным спектральных измерений / В.А. Зайцева, С.В. Никоненко, З.А. Ничипорович // Журн. прикл. спектр. – 1995. – Т. 62, № 1. – С. 53–58.
14. Яновская, Е.А. Спектральные методы оценки состояния посевов озимой ржи / Е.А. Яновская, А.Ф. Яновский, Ю.Н. Чиберкус // Журн. прикл. спектр. – 1995. – Т. 64, № 5. – С. 646–650.
15. Спектры отражения наркотикосодержащих растений и выбор спектральных диапазонов для их съемки / В.А. Зайцева [и др.] // Журн. прикл. спектр. – 1996. – Т. 63, № 6. – С. 911–918.
16. Спектры коэффициентов яркости фитоземленов и посевов мака в различных стадиях вегетации / В.А. Зайцева [и др.] // Журн. прикл. спектр. – 1997. – Т. 64, № 1. – С. 85–89.
17. Науменко, Е.К. Информативность спектральных данных в задачах оптической диагностики дисперсных сред / Е.К. Науменко // Тез. докл. Междунар. симпозиума «Аэрозоли в сельском хозяйстве, биологии и медицине. Теория аэрозолей». – М., 1994. – С. 99.
18. Науменко, Е.К. Информативность спектральных данных в многопараметрических задачах диагностики природных объектов / Е.К. Науменко // Журн. прикл. спектр. – 1996. – Т. 63, № 2. – С. 26–33.
19. Кононович, С.И. Исследование информативности спектров яркости выходящего излучения относительно содержания рассеивающих и поглощающих компонентов морской воды / С.И. Кононович, Е.К. Науменко, В.Е. Плюта // Журн. прикл. спектр. – 1988. – Т. 48, № 1. – С. 127–133.
20. Комплекс «Гемма» с многозональной фотографической аппаратурой и системой автоматической регулировки экспозиции / Ю.Л. Белоус [и др.] // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65, № 11. – С. 48–51.
21. Информационно-аналитическая система автоматического управления многозональной аппаратурой дистанционного зондирования / В.Е. Плюта [и др.] // Сб. материалов Междунар. семинара «Конверсия научных исследований в Беларуси в рамках деятельности МНТЦ». – Минск, 1999. – Ч. 2. – С. 215–218.
22. Науменко, Е.К. Выбор оптимальных экспозиций при съемке различных классов земной поверхности многозональной аппаратурой / Е.К. Науменко, В.Е. Плюта // Журн. прикл. спектр. – 2000. – Т. 67, № 1. – С. 111–116.
23. Aerosol remote sensing over land: A comparison of satellite retrievals using different algorithms and instruments / A.A. Kokhanovsky [et al.] // Atmos. Res. – 2007. – doi:10.1016.
24. Аскарьян, Г.А. Давление при испарении вещества в луче радиации / Г.А. Аскарьян, Е.М. Мороз // ЖЭТФ. – 1962. – Т. 43. – С. 2319–2320.
25. Kantrowitz, A.R. The Relevance of Space / A.R. Kantrowitz // Astronautics and Aeronautics. – 1972. – Vol. 10, № 5. – P. 74–76.
26. Бункин, Ф.В. Использование лазерного источника энергии для создания реактивной тяги / Ф.В. Бункин, А.М. Прохоров // Успехи физ. наук. – 1976. – Т. 119, № 3. – С. 425–446.
27. Минько, Л.Я. Лазерные плазменные ускорители и плазмотроны / Л.Я. Минько; под ред. А.И. Морозова // Физика и применение плазменных ускорителей. – Минск: Наука и техника, 1974. – С. 142–180.

28. Динамика плазмы, возникающей при действии лазерного излучения на твердотельные преграды / М.А. Ельяшевич [и др.] // Изв. АН СССР. Сер. физич. – 1985. – Т. 49, № 6. – С. 1132–1139.

29. Чумаков, А.Н. Влияние размеров мишени на импульс отдачи при лазерном воздействии на поглощающие материалы / А.Н. Чумаков, А.М. Петренко, Н.А. Босак // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 10. – С. 948–950.

30. Протасов, Ю.С. Исследование и разработка космических лазерных микродвигателей / Ю.С. Протасов, Ю.Ю. Протасов // Изв. вузов. Сер. машиностр. – 2002. – № 5. – С. 35–40.

31. Результаты и перспективы выполнения программ серии «Космос» в интересах создания многофункциональной космической системы Союзного государства / В.А. Меньшиков [и др.] // Второй Белорусский космический конгресс, Минск, 25–27 октября 2005 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – С. 7–10.

32. Влияние ограничения разлета и параметров плазмы на импульс отдачи лазерного микродвигателя / А.Н. Чумаков [и др.] // Второй Белорусский космический конгресс, Минск, 25–27 октября 2005 г. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2005. – С. 131–135.

33. Чумаков, А.Н. Особенности импульсного лазерного разрушения металлов и композитов в вакууме / А.Н. Чумаков, Ю.А. Станкевич, Н.А. Босак // Материалы VI Междунар. конф. «Лазерная физика и оптические технологии». – Гродно, 2006. – С. 193–195.

34. Лазерно-плазменные микродвигатели: проблемы и перспективы / Ф.Н. Любченко [и др.] // VII Междунар. симпозиум по радиационной плазмодинамике: сб. науч. тр. – М., 2006. – С. 26–34.

35. Лазерно-плазменный двигатель: пат. 3704 Респ. Беларусь, МПК(2006) F 02K 11/00, H 05H 1/24 / Чумаков А.Н., Босак Н.А., Петренко А.М., Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Безъязычная Т.В., Рябцев А.Г., Щемелев М.А., Красковский А.С.; заявители ИМАФ НАН Беларуси, ИФ НАН Беларуси. – № u 20060830; заявл. 07.12.2006; опубл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальнай уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 173.

Поступила 13.08.07

*Институт физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси,  
Минск, пр. Независимости, 68  
e-mail: ifanbel@ifanbel.bas-net.by*

**E.K. Naumenko, I.L. Katsev, A.N. Chumakov**

## **AEROSPACE LASER-OPTICAL TECHNOLOGIES**

The questions of the development of perspective technologies of remote sensing of the Earth on the basis of remote spectrometry are considered. The analysis of the works executed in the Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus on three basic directions is given: improvement of spectral systems of remote sensing, development of methods for an apriory estimation of informativity of the spectral data and development of new methods of inverse problems solution for operative definition of required parameters, increasing the reliability and accuracy of the solutions. The description the developed techniques of remote identification of various natural objects is given. The problem of development of bases of a laser-plasma engine for space purposes is discussed.