

Название журнала	ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА						
Издательство	Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Российской академии наук "Издательство "Наука"						
Сведения о переименовании и переводе	Переводная версия: <i>Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics</i> <i>Earth Observation and Remote Sensing</i>						
Год выпуска	2013	Том		Номер выпуска	6		
	Название статьи					Страницы	Цит.
	ПРЕДИСЛОВИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА К ТЕМАТИЧЕСКОМУ ВЫПУСКУ ЖУРНАЛА "ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА" Бондур В.Г.					3	1
	СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СПУТНИКОВОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АТМОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ Успенский А.Б., Рублев А.Н.					4	2
	БЫСТРАЯ РАДИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ИК-ЗОНДИРОВАНИЯ СПУТНИКОВ СЕРИИ "МЕТЕОР-М" Успенский А.Б., Рублев А.Н., Русин Е.В., Пяткин В.П.					16	2
	БОРТОВЫЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г., Козлов Д.А., Монахов Д.О., Козлов И.А., Архипов С.А., Целиков В.А., Романовский А.С.					25	2
	КАЛИБРОВКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ АВИАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ПО СОПУТСТВУЮЩИМ НАЗЕМНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЭТАЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАБЛЮДАЕМЫХ СЦЕН Остриков В.Н., Плахотников О.В.					38	0
	СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ (GOSAT) И НАЗЕМНЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ CO₂ ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА Гаврилов Н.М., Тимофеев Ю.М.					43	1
	СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ (GOSAT) И НАЗЕМНЫХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА Макарова М.В., Гаврилов Н.М., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.					50	0
	СИСТЕМА ОБРАБОТКИ САМОЛЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П.					57	5
	АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ САМОЛЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ Козодеров В.В., Егоров В.Д.					65	0
	АВИАЦИОННЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ Родионов И.Д., Родионов А.И., Ведешин Л.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П.					81	3

ПРЕДИСЛОВИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА К ТЕМАТИЧЕСКОМУ ВЫПУСКУ ЖУРНАЛА “ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА”

DOI: 10.7868/S0205961413060079

Одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся направлений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является применение инновационных гиперспектральных методов и технологий. В настоящее время гиперспектральные аэрокосмические изображения все более широко используются в интересах экологического мониторинга, исследования и рационального использования природных ресурсов, предупреждения и ликвидации последствий природных катастроф и техногенных аварий, метеорологии и климатологии, лесного и сельского хозяйства, транспорта, в интересах фундаментальных наук о Земле и др.

Основной отличительной особенностью гиперспектральной информации является возможность одновременного анализа пространственных и спектральных характеристик наблюдаемых объектов, процессов и явлений. При этом используется “гиперкуб” данных, состоящий из строк и столбцов, формирующих матрицу пространственного распределения яркостей, совместно с третьей координатой, являющейся длиной волны регистрируемого электромагнитного излучения.

Широкому применению гиперспектральных методов и технологий для аэрокосмического мониторинга в настоящее время препятствуют малое количество спутников и воздушных носителей, оборудованных гиперспектрометрами с требуемыми характеристиками, а также сложности, связанные с обработкой и интерпретацией больших потоков информации, формируемой этими приборами. В связи с этим для эффективного использования гиперспектральных данных, поступающих при аэрокосмическом мониторинге, требуются более широкое использование современных гиперспектральных датчиков, установленных на космических и воздушных носителях, а также

разработка и применение эффективных методов, технологий, программных и высокопроизводительных технических средств обработки больших потоков гиперспектральной информации.

Именно этим вопросам посвящены два тематических выпуска журнала Российской академии наук “Исследование Земли из космоса”. Актуальность формирования таких тематических выпусков журнала обусловлена также тем, что в 2013 г. осуществлен успешный запуск российского космического аппарата “Ресурс-П” с гиперспектральной аппаратурой (ГСА).

Статьи, вошедшие в эти тематические выпуски, написаны на основе материалов докладов, сделанных их авторами на научных конференциях, в том числе на Научно-технической конференции “Гиперспектральные приборы и технологии”, состоявшейся на базе Открытого акционерного общества “Красногорский завод им. С.А. Зверева” (ОАО “КМЗ”) в январе 2013 г. Главная задача, которую ставили перед собой организаторы этой конференции, — объединение на одной площадке представителей научных и производственных организаций с целью освещения и обсуждения перспектив развития и применения гиперспектральных методов, технологий и приборов, а также обмен новыми идеями, знаниями, формирование конструктивного диалога и налаживание взаимовыгодных контактов.

Настоящий выпуск журнала является первым из двух запланированных выпусков, в котором освещен ряд актуальных вопросов в области разработки и применения гиперспектральных методов и технологий дистанционного зондирования Земли.

*Главный редактор журнала,
академик Бондур В.Г.*

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СПУТНИКОВОГО ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АТМОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2013 г. А. Б. Успенский*, А. Н. Рублев

ФГБУ «НИЦ «Планета», Москва

*E-mail: uspensky@planet.iitp.ru

Поступила в редакцию 06.05.2013 г.

Дано краткое описание гиперспектральных атмосферных ИК-зондировщиков, устанавливаемых на оперативных полярно-орбитальных метеоспутниках EPS/Metop, Suomi-NPP, «Метеор-М». Рассмотрены результаты анализа качества и валидации данных ИК-зондировщика IASI/Metop. Представлен обзор методов и технологий тематической обработки измерений указанных зондировщиков, позволяющих получать различные информационные продукты по параметрам атмосферы и подстилающей поверхности. Сообщаются результаты усвоения данных IASI в моделях численного прогноза погоды ведущих зарубежных прогностических центров. Обсуждается применимость указанных данных и результатов дистанционного зондирования в климатических исследованиях. Сформулированы задачи, связанные с повышением эффективности использования спутниковых данных, которые требуют дополнительных исследований.

Ключевые слова: гиперспектральный ИК-зондировщик, спектральное разрешение, температурно-влажностное зондирование атмосферы, калибровка, валидация, статистический и физический алгоритмы, малые газовые составляющие, численный прогноз погоды

DOI: 10.7868/S0205961413060092

ВВЕДЕНИЕ

Разработка и применение гиперспектральной аппаратуры и технологий дистанционного зондирования атмосферы (ДЗА) – важнейшее направление развития космических наблюдательных систем гидрометеорологического назначения. Определяющим фактором при этом являются требования пользователей спутниковой гидрометеорологической информации, в соответствии с которыми метеорологические спутники должны оперативно поставлять данные о термодинамических параметрах и составе атмосферы с определенными пространственно-временной дискретностью, разрешением и уровнем погрешности.

Выходные продукты ДЗА уже в настоящее время существенно дополняют данные наземной наблюдательной сети (аэрологические, синоптические и др.), а в будущем должны стать основными в информационном обеспечении численного прогноза погоды (ЧПП), мониторинга климатических изменений и изучения процессов атмосферной химии. Наибольший приоритет из упомянутых спутниковых информационных продуктов при усвоении в моделях ЧПП имеют данные температурно-влажностного зондирования атмосферы (ТВЗА), роль которых возрастает в условиях сокращения наземной сети аэрологического зондирования.

Многолетние обсуждения, проведенные под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) и подкрепленные результатами специальных вычислительных экспериментов, поз-

волили гармонизировать требования производителей и пользователей данных ТВЗА (Успенский и др., 2005): спутниковые оценки профилей температуры в тропосфере и нижней стратосфере должны иметь погрешность не более 1 К и вертикальное разрешение около 1 и 2 км соответственно; точность оценок профилей относительной влажности в тропосфере должна быть не хуже 10% при вертикальном разрешении 1–2 км. В цитируемом обзоре можно найти также требования к другим выходным информационным продуктам, получаемым по данным гиперспектральных зондировщиков.

Технологии получения данных ТВЗА по информации спутниковых зондировщиков инфракрасного (ИК) и микроволнового (МКВ) диапазонов спектра достаточно хорошо отработаны за рубежом и в нашей стране. С середины 1980-х годов указанные продукты оперативно производились по данным спутников серии NOAA, «Метеор», причем, по уровню погрешности и вертикальному разрешению данные ТВЗА заметно уступали данным аэрологического зондирования. Поэтому последние 20 лет теоретически прорабатывались и экспериментально апробировались пути улучшения этих характеристик. Применительно к ИК-зондировщикам они сводятся к переходу от спутниковой аппаратуры малого спектрального разрешения ($\lambda/\Delta\lambda \approx 50$, где λ – длина волны, $\Delta\lambda$ – абсолютное спектральное разрешение) с небольшим числом каналов (5–20) к приборам высокого спектрального разрешения типа Фу-

рье-спектрометра (двухлучевого интерферометра Майкельсона) или дифракционного спектрометра ($\lambda/\Delta\lambda \approx 1000$). Спектрометры позволяют регистрировать спектры с большим (несколько тысяч) количеством точек отсчета. В терминах волновых чисел ν , ($\nu = 10^4/\lambda$, где $[\nu] = \text{см}^{-1}$, $[\lambda] = \text{мкм}$) спектральное разрешение современных ИК-зондировщиков меняется в пределах $0.3\text{--}2.0 \text{ см}^{-1}$. В отечественной и зарубежной литературе принято называть подобную аппаратуру гиперспектральной.

В статье, носящей обзорный характер, дано краткое описание гиперспектральных ИК-зондировщиков, которые устанавливаются на оперативные полярно-орбитальные (п/о) метеоспутники нового поколения. Представлен обзор методов и алгоритмов получения продуктов ДЗА на основе тематической обработки или “обращения” измерений указанных зондировщиков. Приведены данные об эффективности использования результатов ТВЗА в ведущих зарубежных прогностических центрах. Обсуждается также применимость выходных продуктов ДЗА в климатических исследованиях. В заключении кратко обсуждаются перспективы работ по данной тематике, включая задачи, которые требуют дополнительных исследований.

Следует отметить, что настоящая статья продолжает и дополняет обзоры (Успенский и др., 2005; Smith et al., 2009; August et al., 2012; Hilton et al., 2012). При ее подготовке использованы материалы последней Международной конференции по данным IASI (Франция, 04–08 февраля 2013 г., <http://www.iasi2013com/oral.html>). Потребность в написании нового обзора связана с необходимостью ознакомить российских читателей со значительным прогрессом, достигнутым в создании гиперспектральной аппаратуры и технологий ДЗА за последнее десятилетие. В 2002 г. на борту спутника EOS/Aqua (США) был запущен гиперспектральный ИК-зондировщик AIRS, данные которого уже в 2004 г. стали оперативно поступать для усвоения в ведущие прогностические центры мира. К настоящему времени на европейских и американском п/о-метеоспутниках функционируют еще три гиперспектральных ИК-зондировщика (IASI/Metop-A, -B, CrIS/Suomi-NPP) и готовится к запуску первый отечественный гиперспектральный ИК-зондировщик ИКФС-2. За этот период накоплены большие по объему архивы фактических спутниковых измерений ИК-зондировщиков, созданы и успешно функционируют оперативные технологии обработки и усвоения данных и информационных продуктов ДЗА. Выполнен ряд оригинальных методических проработок, направленных на расширение номенклатуры и повышение достоверности результатов ДЗА. Вне рамок обзора, учитывая его направленность, остались довольно многочисленные эксперименты по различным задачам ДЗА, выполненные в последние годы с использованием гиперспектральной аппаратуры на зарубеж-

ных исследовательских спутниках (MIPAS/Envisat, TES/Aura, FTS/GOSAT).

СОВРЕМЕННЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ ИК-ЗОНДИРОВЩИКИ

Программы развития оперативных метеоспутников Европы, США и России предусматривают разработку атмосферных гиперспектральных ИК-зондировщиков. Запуск спектрометра AIRS (Advanced IR Sounder – усовершенствованный ИК-зондировщик), см. (Aumann et al., 2003), позволил проверить экспериментально возможность получения данных ТВЗА с улучшенными точностными характеристиками и подтвердил высокий информационный потенциал данных измерений. Продолжение запусков аналогичной аппаратуры не планируется. Аппаратура IASI (IR Atmospheric Sounding Interferometer – ИК-интерферометр атмосферного зондирования) разрабатывалась Национальным центром космических исследований Франции CNES (Chalon et al., 2001) и установлена на европейских п/о метеоспутниках серии EPS/Metop. В качестве будущего штатного ИК-зондировщика Агентство США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) разработало и запустило в 2011 г. на борту спутника Suomi-NPP гиперспектральный ИК-зондировщик CrIS (Cross-track IR sounder – ИК-зондировщик поперечного сканирования). В нашей стране ведется подготовка к запуску отечественного гиперспектрального зондировщика ИКФС-2 (ИК-Фурье-спектрометр-2) на борту п/о метеоспутника “Метеор-М” № 2 (Завелевич и др., 2008; Головин и др., 2013).

Основные характеристики перечисленной аппаратуры вместе с указанием года запуска приведены в таблице. В дополнение к таблице отметим, что бортовая радиометрическая калибровка измерений IASI выполняется отдельно для спектральных областей 1 ($645\text{--}1210 \text{ см}^{-1}/8.26\text{--}15.5 \text{ мкм}$), 2 ($1210\text{--}2000 \text{ см}^{-1}/5.00\text{--}8.26 \text{ мкм}$) и 3 ($2000\text{--}2760 \text{ см}^{-1}/3.62\text{--}5.00 \text{ мкм}$), а затем формируется полный спектр (область покрытия $645\text{--}2760 \text{ см}^{-1}$). В спектрах ИКФС-2 отсутствуют данные в области 3. Спектры AIRS, CrIS несплошного покрытия содержат данные в областях $650\text{--}1095 \text{ см}^{-1}$, $1210\text{--}1750 \text{ см}^{-1}$ и $2155\text{--}2550 \text{ см}^{-1}$.

Наилучшие для целей ДЗА характеристики по спектральному разрешению и покрытию, а также по пространственному разрешению имеют, согласно таблице, ИК-зондировщики IASI (IASI-A, IASI-B). Другие ИК-зондировщики из таблицы, несмотря на более грубое спектральное разрешение и не сплошное покрытие, также, в соответствии с теоретическими и экспериментальными оценками, обеспечивают получение данных ТВЗА с требуемыми уровнем погрешности и вертикальным разрешением.

Характеристики гиперспектральных ИК-зондировщиков

Аппаратура	IASI-A	IASI-B	AIRS	CrIS	ИКФС-2
Спутник	Metop-A	Metop-B	EOS/Aqua	NPP	“Метеор-М” № 2
Год запуска	2006	2012	2002	2011	2013
Местное время пересечения экватора (нисходящая орбита), ч : мин	Утреннее (09:30)		Послеполуденное (13:30)		Утреннее (09:00 – планируется)
Технология (техника измерений)	Фурье-спектрометры		Дифракционный спектрометр	Фурье-спектрометр	Фурье-спектрометр
Пространственное разрешение, км	12		14		35
Спектральный диапазон, см ⁻¹ /мкм	645–2760/3.62–15.5				667–2000/5.0–15.0
Количество каналов	8461		2378	1305	2700
Спектральное покрытие	Сплошное		Не сплошное		Сплошное
Спектральное разрешение, см ⁻¹	0.5		0.4–2.1	0.625–2.5	0.7–1.4

Аппаратура IASI должна функционировать на спутниках серии Metop до 2018 г. В последующие годы планируется заменить эту аппаратуру на ИК-зондировщик нового поколения IASI-NG повышенной информативности (с улучшенными спектральным разрешением и другими характеристиками).

Достичь требуемых точностных характеристик результатов ТВЗА можно только при отсутствии облачности в поле зрения ИК-зондировщика. Исходя из этого, существенным недостатком аппаратуры ИКФС-2, по сравнению с зарубежными аналогами, является достаточно грубое пространственное разрешение (35 км в надире), что повышает вероятность попадания облачности в поле зрения прибора. Разработчики аппаратуры ИКФС-2 планируют до 2018 г. ее модернизацию и создание ИК-зондировщика ИКФС-3 с характеристиками, близкими к аппаратуре IASI (Головин и др., настоящий выпуск).

Для эффективного использования данных ИК-зондировщиков необходимы регулярные мониторинг качества и валидация спутниковых измерений, которые обычно выполняются разработчиком аппаратуры совместно со спутниковым оператором. Оператором космической системы п/о метеоспутников EPS/Metop, на которых устанавливается аппаратура IASI, является EUMETSAT – Европейское Агентство по эксплуатации метеоспутников (www.eumetsat.int). Результаты мониторинга качества данных ИК-зондировщика IASI уровня 1С (после предварительной обработки спутниковых данных) в части спектральной, радиометрической и геометрической калибровок представлены в (Hilton et al., 2012).

Для контроля и валидации спектральной калибровки используются высокоточное моделирование измеренных спектров и данные о параметрах состояния атмосферы (наземные измерения или результаты ЧПП) в области зондирования, выбранной из условий хорошей пространственной однородности (отсутствие облачности, над водной поверхностью). Точность спектральной

калибровки оказалась близка к заданной спецификации $\delta v/v = 2 \times 10^{-6}$.

Оценка точности радиометрической калибровки выполнялась путем сравнения данных IASI с данными измерений в ИК-каналах аппаратуры AVHRR и HIRS, также установленных на спутниках Metop. Сравнение измерений IASI, “свернутых” со спектральными аппаратными функциями ИК-каналов сканера AVHRR и зондировщика HIRS показало, что точность абсолютной калибровки данных IASI лучше 0.35 К. Уровень инструментального шума стабилен и за исключением спектральных областей 660–680 см⁻¹ и 2300–2400 см⁻¹ (инструментальный шум в этих областях превышает 0.5 К) соответствует заданной спецификации (Hilton et al., 2012). Влияние крио-осадков мало и проявляется в незначительном искажении измерений в области 700–1000 см⁻¹ за счет появления ледяной пленки на оптических элементах системы.

Проверка точности географической привязки пикселей IASI проводится путем совмещения с данными более высокого пространственного разрешения, в качестве которых используются измерения AVHRR. Для облегчения процедуры совмещения IASI с AVHRR используются данные IIS – радиометра высокого пространственного разрешения, специально встроеного в IASI. Точность привязки контролируется, используя сцены с большими контрастами (береговая линия). Согласно оценкам рассогласование привязки данных IASI и AVHRR не превышает 100 м.

Исследования по интеркалибровке данных IASI и измерений другой аппаратуры (HIRS, AIRS, AATSR/Envisat, SEVIRI/MSG), проводимые с использованием различных методов (Goldberg et al., 2011; Ghander et al., 2013), подтверждают высокую точность и стабильность калибровки данных IASI. В частности, сопоставление с данными AIRS показывает, что в большинстве спектральных областей расхождение не превышает 0.2 К.

Для калибровки/валидации данных IASI были также организованы специальные подспутниковые эксперименты. В апреле–мае 2007 г. эксперимент JAIView был проведен в США над Оклахомой и Мексиканским заливом с привлечением полетов исследовательских самолетов США, Великобритании (Lagar et al., 2010). Самолетные измерения с помощью ИК-интерферометра подтвердили малую погрешность абсолютной калибровки данных IASI (лучше 0.3 К). Подспутниковые измерения во время проведения JAIView использовались для косвенной оценки уровня инструментального шума. Оценки подтвердили соответствие уровня шума в данных IASI уровня 1С предполетным оценкам.

Аналогичные исследования, проводимые в настоящее время с данными IASI-B, включая сопоставление с данными IASI-A, подтверждают высокие точностные характеристики измерений аппаратуры IASI и их временную стабильность. Поэтому в ведущих Космических Агентствах принято использовать данные IASI в качестве референсных при контроле и уточнении калибровки измерений других ИК-зондировщиков и данных сканеров в ИК-каналах.

Данные IASI уровня 1С (аподизированные спектры, 8461 каналов, разрешение $\sim 0.5 \text{ см}^{-1}$) глобально покрытия распространяются пользователем через систему EUMETSAT (Европейская система распространения метеоданных (<http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataAccess/EUMETSAT/index.htm?l=en>) в режиме почти реального времени (с задержкой не более 2 ч 15 мин с момента приема спутниковых данных), а также доступны на сайте Центра данных EUMETSAT (с задержкой не более 7 ч после приема). Ввиду большого объема информации ($\sim 1.5 \text{ Тб}$ для данных IASI уровня 1С с одного витка) “редуцированные” спектры (измерения в 316 каналах, наиболее информативных для целей ЧПП) оперативно передаются через Глобальную систему телевидения ВМО.

Еще одна возможность радикального сокращения объема передаваемых данных – “сжатие” спектров с помощью метода главных компонент (МГК), см., например, (Aires et al., 2002; Успенский и др., 2003а; 2005). В конце 2010 г. EUMETSAT начал экспериментальную передачу “сжатых” спектров IASI (в терминах главных компонент). В свободно распространяемый программный комплекс AAPP предварительной обработки спутниковых данных, в том числе данных IASI (NWPSAF, 2010), включен рассчитанный априори набор из 290 старших собственных векторов (с.в.) ковариационной матрицы спектров, называемых также эмпирическими ортогональными функциями (ЭОФ). Главные компоненты (ГК) или коэффициенты разложения каждого измеренного спектра по ЭОФ должны оперативно передаваться пользователям, чтобы можно было восстанавливать полный спектр или значения сигналов в любом подмно-

жестве каналов. В работе (Виролайнен и др., 2010) подобная техника применяется для сжатия данных ИКФС-2.

АЛГОРИТМЫ И ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Сравнительный анализ методов и алгоритмов анализа и обращения данных гиперспектральных ИК-зондировщиков для получения продуктов ДЗА выполнен в (Успенский, 2003б; Успенский и др., 2005), см. также монографии (Rodgers, 2000; Тимофеев, Васильев, 2003). В данном обзоре мы остановимся на методических проработках последних лет и на практических аспектах их применения в технологиях обработки измерений аппаратуры IASI, CrIS. Кроме того, кратко рассмотрим состояние работ по подготовке к анализу и обработке данных ИКФС-2.

В обзоре (Успенский и др., 2005), наряду с методами получения различных выходных продуктов ДЗА, обсуждается решение важной вспомогательной задачи, а именно, создание методических и программных средств быстрого и высокоточного моделирования измеренных спектров. В зарубежной литературе соответствующие программные комплексы получили название FRTM (Fast Radiative Transfer Models), или быстрые радиационные модели (БРМ). Принципы построения указанных моделей и, в частности, работы по адаптации известного комплекса RTTOV (Saunders et al., 1999) к данным ИКФС-2, обсуждаются в (Успенский и др., настоящий выпуск).

В результате обращения спутниковых данных по измеренным спектрам – векторам \mathbf{r} (размерности, равной количеству спектральных каналов) – восстанавливается искомый вектор состояния \mathbf{x} . Компонентами \mathbf{x} при отсутствии облачности в поле зрения прибора являются профили температуры $T(p)$, отношений смеси водяного пара $q(p)$ и озона $q_{oz}(p)$, где p – давление, температура T_s и ε – излучательная способность поверхности, а также общие содержания (X) поглощающих газовых компонент – оксида углерода (CO), метана (CH₄), закиси азота (N₂O), диоксида углерода (CO₂).

Профили $T(p)$, $q(p)$, $q_{oz}(p)$ обычно задаются векторами значений этих функций на фиксированной сетке давлений или векторами ГК – коэффициентов разложения последних по ортогональным базисам ЭОФ. Такое представление позволяет сократить размерность обратной задачи ДЗА. При наличии облачности вектор \mathbf{x} дополняется параметрами облачного покрова.

Методы и алгоритмы “обращения” данных ИК-зондировщиков принято подразделять на физические (численное решение обратной задачи ДЗА), и статистические (линейная и нелинейная регрессии, нейронные сети) (Rodgers, 2000; Успенский, 2003). На практике вместо чисто физического или

чисто статистического алгоритмов применяют ту или иную их комбинацию, иными словами, физико-статистический алгоритм.

Типичный пример – алгоритм множественной линейной регрессии, когда при построении матрицы коэффициентов регрессии (статистическая часть алгоритма), векторы измерений \mathbf{r} в обучающей выборке пар (\mathbf{x}, \mathbf{r}) заменяются векторами моделированных измерений \mathbf{r}^m , рассчитанных с помощью БРМ. Описанный подход широко используется для получения выходных продуктов ДЗА по данным ИК-зондировщиков (Uspensky et al., 2003), его применение к данным ИКФС-2 обсуждается в работах (Поляков и др., 2009, 2010а, б), где предложен и испытан на моделированной информации алгоритм линейной регрессии на главные компоненты (Айвазян и др., 1985), т.е. регрессии, в которой предикторы/предиктанты представлены в терминах ГК.

Применение алгоритма множественной линейной регрессии дает удовлетворительные по точности результаты ДЗА при линейной (или “почти” линейной) зависимости между векторами \mathbf{r} и \mathbf{x} . Такая ситуация имеет место, например, при восстановлении профилей $T(p)$ в условиях отсутствия облачности в поле зрения прибора. При дистанционном температурном зондировании в условиях облачности, а также при восстановлении профилей $q(p)$, $q_{oz}(p)$, концентраций других газовых компонент обратная задача ДЗА становится нелинейной, что приводит к необходимости использовать нелинейные регрессионные алгоритмы.

В определенной степени универсальным подходом к получению нелинейных регрессионных зависимостей между \mathbf{x} и \mathbf{r} в обратной задаче ДЗА является применение физико-статистического алгоритма искусственных нейронных сетей (ИНС) (Aires et al., 2002). Для нелинейной аппроксимации решения обратной задачи ДЗА используется математическая модель ИНС, представляющая многослойный персептрон (как правило, трехслойный с одним скрытым слоем). Обучение ИНС и поиск подходящей нелинейной регрессионной связи между \mathbf{x} и \mathbf{r} требует формирования представительной выборки пар $(\mathbf{x}, \mathbf{r}^m)$. При этом, по аналогии с линейной регрессией, в случае большой размерности вектора \mathbf{x} полезно использовать разложения искомым профилей $T(p)$, $q(p)$, $q_{oz}(p)$ по базисам ЭОФ. Это позволяет уменьшить количество нейронов в сети и сократить объем вычислительной работы при обучении ИНС. Подобный подход был, в частности, предложен и испытан на моделированных данных в (Aires et al., 2002) для восстановления профилей $T(p)$, $q(p)$, $q_{oz}(p)$ по измерениям ИК-зондировщика IASI. В настоящее время в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) ведется отработка алгоритмов ИНС для “обращения” данных ИКФС-2. Результаты испытания

алгоритмов путем обработки моделированных спутниковых измерений являются весьма обнадеживающими. Точность определения профиля относительной влажности $q(p)$ составляет 10–15% в атмосферном слое 0–8 км при отсутствии облачности и превосходит точность оценок $q(p)$, получаемых с помощью линейной регрессии или физического алгоритма.

Определенной альтернативой к нелинейной регрессии и алгоритмам ИНС применительно к нелинейной обратной задаче ДЗА является физико-статистический алгоритм двойной регрессии (double-regression algorithm), или кратко – алгоритм ДР из (Smith et al., 2012). Наличие облачности в поле зрения прибора является основным мешающим фактором при получении различных продуктов ДЗА (в частности, данных ТВЗА) и делает исходную обратную задачу нелинейной, см., например, (Плохенко, Успенский, 1984; Успенский и др., 2005).

Алгоритм ДР предназначен для восстановления вектора состояния \mathbf{x} в условиях ясного неба и при наличии однослойной тонкой или разорванной (частичной) облачности. Компонентами \mathbf{x} являются, как и выше, профили $T(p)$, $q(p)$, $q_{oz}(p)$, а именно, наборы ГК – коэффициентов разложения искомым профилей по базисам ЭОФ, а также T_s и набор ГК для излучательной способности ε . Кроме того, в состав \mathbf{x} включены в качестве дополнительных компонент общее содержание CO_2 (X_{CO_2}) в атмосфере и параметры облачного покрова – высота верхней границы ($h_{\text{ВГО}}$) и эффективная оптическая толщина (τ).

Фактически в алгоритме ДР реализовано построение набора независимых линейных регрессионных оценок $\mathbf{x}_{\text{ДР}}(k)$ с помощью стандартной формулы

$$\mathbf{x}_{\text{ДР}}(k) = C_k (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0(k)) + \mathbf{x}_0(k). \quad (1)$$

Здесь $k = 1, 2, \dots$ – номер обучающей выборки и соответствующей регрессионной оценки, $\mathbf{x}_0(k)$ и $\mathbf{r}_0(k)$ – средний по ансамблю k -й обучающей выборки вектор \mathbf{x} и моделированный спектр, рассчитанный по заданному вектору $\mathbf{x}_0(k)$ соответственно; C_k – матрица коэффициентов регрессии для k -й обучающей выборки. Для обеспечения устойчивости расчета матриц C_k из (1) вместо полных спектров \mathbf{r} используются отфильтрованные с помощью МГК и “редуцированные” спектры. К примеру, для спектров, зарегистрированных с помощью IASI, выделен 7021 канал из имеющихся 8461 и использовано разложение по базису из 50 старших ЭОФ.

Полная обучающая выборка пар $(\mathbf{x}, \mathbf{r}^m)$ разделена на подвыборки в зависимости от параметров облачного покрова, зенитного угла и формируется с использованием спектров \mathbf{r}^m , полученных расчетным путем. Расчеты спектров \mathbf{r}^m выполнены с помощью двух типов БРМ – для условий ясного неба и при наличии однослойной облачности. Вы-

делены один класс (подвыборка) для условий ясного неба и 8 “облачных” классов в зависимости от значения $h_{\text{ВГО}}$ в слое 100–1000 гПа. Формирование векторов x для облачных классов, а именно, задание параметров облачного покрова основано на совместном анализе поведения вертикальных профилей температуры и относительной влажности, ср. (Рублев и др., 2004).

Для получения результирующих оценок вектора x в условиях ясного неба ($x^{\text{ясн}}$) или облачной атмосферы ($x^{\text{обл}}$) выполняются совместный анализ и комбинирование оценок (1). Важным для эффективной работы алгоритма ДР является привлечение дополнительной информации — прогностических данных или данных численного анализа метеополей, оперативно получаемых из Национального Прогностического Центра NCEP (США).

Данные NCEP используются при получении начального приближения для оценок $h_{\text{ВГО}}$, выделении конкретного “облачного” класса и соответствующей регрессии. Кроме того, прогностические профили $T(p)$ и значения T_s необходимы для анализа качества и достоверности получаемых результирующих оценок $x^{\text{ясн}}$, $x^{\text{обл}}$. В цитированной работе (Smith et al., 2012) приведены количественные критерии для получения результирующих оценок профилей $T(p)$, $q(p)$ и расчета показателя качества.

Важным преимуществом описанного алгоритма ДР является его высокое быстродействие в сравнении с физическими алгоритмами тематической обработки данных ИК-зондировщиков в условиях облачной атмосферы (Плохенко, Успенский, 1984; Plokhenko, Menzel, 2010).

С учетом положительного опыта тематической обработки данных AIRS в условиях интенсивных и особо опасных погодных явлений (Smith et al., 2012), алгоритм ДР положен в основу программного комплекса CSPP (Community Satellite Processing Package), находящегося в свободном доступе, см. http://cimss.ssec.edu/cspp/uwhrtv_edr_v1.0shtml. Комплекс CSPP предназначен, в первую очередь, для тематической обработки данных ИК-зондировщиков CrIS/Suomi-NPP и IASI/Metop.

Рассмотрим теперь технологию получения продуктов ДЗА по данным ИК-зондировщика IASI/Metop (August et al., 2012). Выходные продукты ДЗА производятся в главном центре EUMETSAT (г. Дармштадт, Германия), а также в восьми прикладных спутниковых центрах SAF, расположенных в странах — членах EUMETSAT. Комплекс тематической обработки данных IASI для получения продуктов ДЗА уровня L2 (The level 2 IASI Product Processing Facility (PPF)) разрабатывался с учетом требований пользователей. Первая версия комплекса начала функционировать в 2007 г. после окончания летных испытаний IASI (КА Metop А был запущен в 2006 г.), а в настоящее время оперативно эксплуатируется 5-ая версия (PPF v.5).

Комплекс PPF v.5 имеет модульную структуру и предназначен для оперативного получения оценок вектора состояния x . Искомый вектор x включает в качестве компонентов профили $T(p)$, $q(p)$ на сетке давлений p_i (90 уровней в слое 0.005–1050 гПа), температуру T_s , излучательную способность ϵ для 12 каналов IASI, общее содержание озона в слоях 0–6, 0–12, 0–16 км, X_{CO} , X_{CH_4} , $X_{\text{N}_2\text{O}}$ и X_{CO_2} , а также параметры облачности (количество облачности в пикселе, $h_{\text{ВГО}}$, фазовый состав). Перечисленные выходные продукты производятся и доступны пользователями с временной задержкой 3 ч от момента приема спутниковой информации. При этом оценки X_{CH_4} , $X_{\text{N}_2\text{O}}$ и X_{CO_2} производятся в экспериментальном режиме и не распространяются пользователям.

Основные модули комплекса PPF реализуют последовательно следующие этапы обработки данных IASI уровня IC (результатов предварительной обработки измерений IASI): подготовка и контроль качества дополнительной информации, фильтрация инструментального шума; детектирование и идентификация облачности; построение предварительной оценки вектора x (первое приближение) с помощью статистических алгоритмов; уточнение оценок профилей $T(p)$, $q_{\text{oz}}(p)$ с помощью физического алгоритма (при отсутствии облачности в поле зрения IASI).

В состав дополнительной информации входят, наряду со статическими архивами (маска “суша-море”, высота местности, атлас излучательных способностей), динамические данные — выходные продукты ЧПП, синхронные измерения аппаратуры AVHRR, AMSU, MHS, также установленной на спутнике Metop. Чтобы выполнить основные требования пользователей — независимость результатов ТВЗА от данных ЧПП — прогностические поля $T(p)$, $q(p)$ используются только в процедуре детектирования облачности и не используются при построении оценок $T(p)$, $q(p)$. Фильтрация (частичная) инструментального шума проводится с помощью алгоритмов МГК. Для этого каждый измеренный спектр аппроксимируется разложением по базису ЭОФ, включающему старшие с.в. ковариационной матрицы спектров. В разложениях используются 90, 120 и 80 с.в. для спектральных областей 1, 2 и 3 соответственно.

Модуль детектирования облачности и оценки ее параметров является обязательным во всех технологиях обработки данных ИК-зондировщиков, см. описание соответствующих процедур в следующем разделе статьи. В результате работы этого модуля определяются параметры облачного покрова, и формируется специальный показатель (“флажок”), классифицирующий условия измерений в каждом пикселе по трем типам — ясно, частичная облачность, сплошная облачность. Дальнейшая обработка и получение оценки век-

тора x выполняются только для условий ясного неба и частичной облачности.

На этапе построения предварительной оценки вектора x используются два типа статистических алгоритмов: линейная регрессия на главные компоненты для оценки компонент $x(T(p), q(p), q_{oz}(p), T_s, e)$ в условиях ясного неба; алгоритм ИНС из (Schlüssel et al., 2005) для оценки X_{CO_2} , X_{N_2O} , X_{CH_4} , X_{CO_2} в условиях ясного неба. Последние оценки далее не уточняются.

Для условий частичной облачности с помощью регрессионного алгоритма из (Zhou et al., 2005; 2009) строится оценка профилей $T(p), q(p)$, которая также далее не уточняется. Уточнение оценок профилей $T(p), q_{oz}(p)$ в условиях ясного неба производится путем численного решения обратной задачи с помощью физического алгоритма – метода наилучшего линейного оценивания или статистической регуляризации (Успенский, 2003а). Ввиду нелинейности исходной обратной задачи процесс построения оценок $T(p), q_{oz}(p)$ – итерационный, причем допускается не более пяти итераций.

В качестве входных данных используются измерения IASI в 316 каналах спектральных областей 1, 2. Для моделирования измерений и других радиационных расчетов используется БРМ RT-TOV-10. Кроме того, предусмотрена процедура расчета и коррекции систематических смещений, определяемых путем сравнения фактических и модельных измерений. При построении регуляризованной оценки используется одна глобальная априорная ковариационная матрица восстанавливаемых параметров и одна ковариационная матрица ошибок измерений.

В период эксплуатации комплекса PPF v. 5 регулярно велись работы по валидации выходных продуктов ДЗА. Для этого спутниковые оценки различных компонент вектора x сравнивались с синхронными наземными наблюдениями, независимыми спутниковыми оценками и выходными продуктами ЧПП (August et al., 2012).

Сравнение спутниковых оценок $T(p)$ с данными численного анализа метеополей, производимыми в ЕСМWF (ЕЦСПП – Европейский Центр Среднесрочных Прогнозов Погоды), дает величины средне-квадратичных отклонений (СКО) в диапазоне 0.7–1.0 К для слоя 200–800 гПа и 2.5–3.5 К для пограничного слоя ниже 800 гПа. Для оценок $q(p)$ (в терминах относительной влажности) величины СКО составляют около 10% в слое выше 700–800 гПа (при близком к нулю смещении) и увеличиваются до 20% в пограничном слое. Отмечено, что попытка уточнить оценки $q(p)$ путем численного решения обратной задачи ТВЗА с помощью физического алгоритма не дает положительного эффекта ввиду заметного возрастания систематических смещений (вклад априорной информации). Близкие величины СКО получаются при сравнении спутниковых оценок $T(p)$,

$q(p)$ с синхронными данными аэрологического зондирования, что в основном соответствует требованиям пользователей к данным ТВЗА и превосходит продукты предшествующих атмосферных зондировщиков.

Оценки T_s для водной поверхности имеют систематические смещения около -0.3 К (оценки T_s по данным IASI холоднее) и стандартные отклонения около 0.3 К при сравнении с независимыми спутниковыми оценками (по данным AVHRR) и измерениями T_s *in situ* с буев. Величины СКО между оценками температуры суши T_s и независимыми спутниковыми оценками T_s (по данным аппаратуры SEVIRI, установленной на геостационарных спутниках Meteosat-8, -9), как правило, не превышают 2.5 К.

Достоверность дистанционного определения X_{O_3} по данным IASI определялась сравнением с независимыми спутниковыми оценками по данным спектрометра GOME-2, установленного на спутнике EPS/Metop. Сравнение обоих видов спутниковых оценок, усредненных за месяц и по одноградусной широтно-долготной сетке, дает величины СКО в диапазоне 3–5% при коэффициенте корреляции больше 0.9.

Валидация спутниковых оценок X_{CO_2} , X_{N_2O} , X_{CH_4} , X_{CO_2} не завершена. Это объясняется, прежде всего, тем, что наземная сеть наблюдений за атмосферными газовыми компонентами – достаточно редкая.

Как уже отмечалось выше, тематическая обработка данных IASI позволяет получать данные ТВЗА с приемлемой точностью только в условиях ясного неба и при частичной облачности. В условиях плотной сплошной облачности указанные продукты можно получать по совмещенным данным ИК- и МКВ-зондировщиков. Процедуру совместной обработки данных IASI и МКВ-зондировщика AMSU предполагается включить в шестую версию PPF.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАЧНОСТИ, ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА

Дистанционная индикация облаков и оценка параметров облачного покрова (макро- и микрофизических) необходимы для информационного обеспечения анализа и прогноза погоды, климатических исследований. Помимо самостоятельного значения, детектирование облачности в поле зрения ИК-зондировщика необходимо для решения большинства задач ДЗА. Дело в том, что облачные образования в поле зрения спутникового прибора “искажают” сигнал и представляют один из основных мешающих факторов при дистанционном определении геофизических параметров. Для ИК-зондировщиков IASI (с линейным размером одного пиксела ~ 12 км) вероят-

ность покрытия пиксела облачностью составляет, согласно (Smith, Huang, 1996), около 75%; для аппаратуры ИКФС-2 при линейном размере пиксела ~ 35 км вероятность наличия облачности в поле зрения еще выше. Все это делает задачу детектирования облачности весьма актуальной. Идентификация или оценка параметров облачного покрова также имеет важное самостоятельное значение, хотя, разумеется, ИК-зондировщики не являются единственным и основным источником информации об облачности.

Анализ измерений ИК-зондировщика в условиях наличия/отсутствия облачности требует решения трех взаимосвязанных задач: – детектирование облачности; – идентификация или оценка параметров облачности; – коррекция “облачных” спектров и приведение их к условиям отсутствия облачности (cloud clearing).

Решение последней задачи требует привлечения независимой спутниковой (данные МКВ-зондировщиков) и/или прогностической информации, и до настоящего времени соответствующие процедуры не приобрели статуса оперативных. Вместо этого при усвоении данных ИК-зондировщиков в моделях ЧПП обычно выделяют спектральные каналы, измерения в которых не искажены (или “мало” искажены) облачностью (McNally, Watts, 2003). Весовые функции таких каналов (якобианы) расположены в атмосферном слое выше верхней границы облачности ($h_{\text{ВГО}}$).

Существующие методы решения перечисленных задач условно можно разделить на пороговые и статистические (Рублев и др., 2004). Наибольшее развитие получили т.н. многоспектральные пороговые алгоритмы, которые основаны на сопоставлении измеренных и референсных (пороговых) сигналов в совокупности специально отобранных каналов (наиболее чувствительных к вариациям параметров облачности). Близок к такому подходу алгоритм детектирования облачности, основанной на технике МГК – разложении измеренного спектра \mathbf{r} по с.в. ковариационной матрицы, описывающей ансамбль “безоблачных” спектров.

Перспективными для детектирования и идентификации облачности представляются статистические алгоритмы классификации, базирующиеся на байесовском подходе. В работе (Рублев и др., 2004) в зависимости от общего балла облачности α выделено пять классов ($\alpha = 0$ – безоблачно, ..., $\alpha = 1$ – сплошная облачность), кроме того, введен шестой класс полупрозрачной облачности высокого яруса (типа C_i). Процедура классификации базируется на поиске максимума апостериорной плотности вероятности – байесовской дискриминантной функции. Согласно результатам испытаний на моделированных данных IASI для различных широтных зон и сезонов вероятность правильного распознавания классов “безоблачно”, “преимущественно облачность”, “облака типа C_i ” – не ниже 85%. В рамках предложенной

схемы наряду с детектированием оцениваются общий балл, температура и высота верхней границы облачности.

Для повышения достоверности детектирования облачности целесообразно привлечение спутниковых данных более высокого пространственного разрешения, например, измерений сканирующих радиометров типа AVHRR.

В оперативной технологии PPF v.5, описанной выше, используются следующие процедуры детектирования облачности:

- многопороговая (сравнение измеренных сигналов в “прозрачных” каналах 751 (832 см^{-1}) и 1023 (900.25 см^{-1}) с модельными, рассчитанными с использованием данных ЧПП);

- выделение облачных кластеров в поле зрения IASI на основе анализа данных AVHRR, совмещенных с данными IASI. При отработке алгоритмов детектирования облачности и в процессе эксплуатации комплекса PPF v.5 результаты применения описанных процедур сравнивались друг с другом. Кроме того, спутниковые оценки $T(p)$, $q(p)$ сравнивались с данными ЧПП. Анализ показал, что в ряде случаев отдельные пиксели IASI ошибочно классифицируются как облачные. Это уменьшает количество спутниковых зондирований.

Для более эффективного использования данных IASI (в т.ч. при наличии облачности) в следующую версию технологии (PPF, v.6) предполагается ввести дополнительно процедуру, основанную на анализе совмещенных данных IASI и AVHRR с помощью алгоритма ИНС (August et al., 2012). По оценкам разработчиков включение новой процедуры позволит повысить точность данных ТВЗА за счет более достоверного выделения измерений IASI в условиях частичной облачности. Как показали эксперименты с реальными данными IASI и AVHRR, процедура позволяет более точно, по сравнению с описанными выше, детектировать облачность над снегом и льдом, а также выделять облачные образования малого размера над водными поверхностями.

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ ИК-ЗОНДИРОВЩИКОВ В РАЗЛИЧНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ

Прогностические модели

Как уже отмечено во Введении, одной из основных целей создания гиперспектральных ИК-зондировщиков является обеспечение моделей ЧПП высокоточными данными ТВЗА. Большое количество каналов, высокое спектральное разрешение и стабильно низкий уровень инструментального шума позволяют получать по данным IASI большой объем информации о вертикальной структуре атмосферы. Измерения IASI в спектральной области 1 содержат в основном информацию о $T(p)$ (полоса 645–800 см^{-1} поглощения CO_2) и T_s (окно прозрачности 800–1200 см^{-1}), а в

области 2 – о распределении влажности в атмосфере (полоса 1200–1600 см⁻¹ поглощения H₂O).

Данные ИК-зондировщиков IASI, AIRS (а с недавнего времени CrIS) оперативно используются в ведущих прогностических центрах Европы и США. Усвоение данных ТВЗА позволит повысить точность определения начального состояния атмосферы (полей метеоэлементов), что в свою очередь повышает точность результатов ЧПП. При этом в настоящее время в ведущих прогностических центрах вместо данных ТВЗА усваиваются непосредственно измерения атмосферных ИК- и МКВ-зондировщиков. Основная причина таких технологических изменений – необходимость адекватного описания погрешности данных, подлежащих усвоению. Погрешности измерений ИК-зондировщиков гораздо легче количественно характеризовать, в сравнении с погрешностями данных ТВЗА. С другой стороны, непосредственное усвоение спутниковых измерений порождает определенные проблемы, связанные с большой размерностью векторов \mathbf{g} и трудоемкостью необходимых радиационных расчетов (моделирование спектров, расчет якобианов), а также с необходимостью тщательного отбора измерений, не искаженных облачностью.

В работе (Guidard et al., 2011) представлены обзорные материалы по использованию данных IASI в оперативных моделях ЧПП глобального и регионального покрытия ведущих европейских прогностических центров (ЕЦСПП, Метеослужбы Великобритании, Франции). Существующие оперативные процедуры усвоения данных IASI во многом подобны друг другу и характеризуются следующим. Усваиваются измерения в 150–200 каналах, выбранных из условий максимальной информативности, – 90–150 “температурных”, 10–20 “прозрачных”, 10–30 “влажностных”, 10–16 “озонных”. Измерения IASI “прореживаются”, т.е. отбираются данные в пикселях, отстоящих друг от друга на 120–150 км. Кроме того, выполняются обязательные процедуры детектирования облачности и отбора каналов, измерения в которых наименее “искажены” облачностью, а также коррекции систематических смещений.

Усвоение данных IASI в глобальных моделях ЧПП дает заметный положительный вклад. В частности, относительное уменьшение погрешности результатов ЧПП для ряда прогнозируемых параметров достигает 15–16%, что сопоставимо с положительным вкладом данных аэрологического зондирования. Стоит отметить, что положительный вклад данных МКВ-зондировщиков AMSU-A еще больше и составляет около 25%, однако, эта цифра характеризует совокупный вклад данных пяти зондировщиков AMSU, функционирующих на борту спутников серий NOAA, Metop.

До настоящего времени относительно небольшое количество работ посвящено усвоению данных ИК-зондировщиков (AIRS, IASI) в прогно-

стических моделях регионального покрытия (в т.ч. мезомасштабных). Одна из причин этого – высокое пространственное разрешение современных мезомасштабных моделей (2–7 км), превосходящее разрешение спутниковых данных (размер одного пиксела в надире составляет 12–14 км). Указанная особенность требует, вообще говоря, разработки процедур извлечения из данных IASI информации “подпиксельного” масштаба. Тем не менее, в обзорах (Guidard et al., 2011; Hilton et al., 2012) отмечен положительный вклад данных IASI при прогнозировании конвективных явлений и осадков с помощью моделей ЧПП регионального и локального покрытия.

Из приведенного материала следует, что в существующих прогностических моделях информационный потенциал ИК-зондировщиков IASI используется не в полной мере. Поэтому дальнейшее повышение эффективности использования данных IASI в моделях ЧПП связано с решением следующих проблем: увеличение количества усваиваемой спектральной информации (привлечение дополнительных каналов в полосах поглощения H₂O и O₃, “прозрачных” каналов при зондировании над сушей и ледяными покровами, использование спектров, “сжатых” и отфильтрованных с помощью МГК); разработка методов использования данных, искаженных облачностью.

Климатические исследования

Одной из задач программы GCOS (ГСКН – Глобальная Система Наблюдений за Климатом) является накопление многолетних однородных рядов наблюдений за т.н. “существенными климатическими переменными” (essential climate variables), или кратко с.к.п., (www.wmo.int/pages/prog/gcos/). Благодаря большой информативности и высокому качеству данных ИК-зондировщиков AIRS, IASI, CrIS, отдельные выходные продукты тематической обработки спутниковых измерений могут использоваться для формирования многолетних рядов данных по таким с.к.п., как результаты ТВЗА, параметры облачности, характеристики аэрозоля, концентрации парниковых газов CH₄, CO₂ в атмосфере, температура и излучательная способность подстилающей поверхности. Более чем пятилетний период эксплуатации ИК-зондировщика IASI-A позволил отработать методы получения перечисленных продуктов, оценить их достоверность и пригодность для формирования климатических рядов данных, см. примеры в (Hilton et al., 2012) и ссылки там же.

Список публикаций из (Hilton et al., 2012) можно дополнить отечественными работами по алгоритмам “обращения” данных IASI, AIRS для получения оценок различных с.к.п.: параметров облачного покрова (Рублев и др., 2004); температуры и излучательной способности поверхности (Успенский и др., 1999); содержания озона в ниж-

ней стратосфере (Успенский и др., 2003а); общего содержания малых газовых составляющих (CO , N_2O , CH_4) в атмосфере (Успенский и др., 1998а, 1998б), (Успенский и др., 2005). Технологические аспекты “обращения” данных IASI для получения оценок X_{CO} , $X_{\text{N}_2\text{O}}$, X_{CH_4} рассмотрены в (Trotsenko et al., 2003).

Отдельного комментария требуют работы (Кухарский, Успенский, 2009), (Успенский и др., 2011), в которых обсуждаются методы мониторинга тропосферной концентрации диоксида углерода X_{CO_2} и общего содержания метана X_{CH_4} в атмосфере над бореальными экосистемами Сибири по данным AIRS, IASI. Т.к. данные ИК-зондировщиков в каналах полосы поглощения CO_2 одновременно чувствительны к вариациям $T(p)$ и концентрации CO_2 , то получить достоверные оценки X_{CO_2} можно, разделяя эти эффекты, например, привлекая независимую (от данных AIRS, IASI) информацию о вертикальных профилях $T(p)$ в пунктах зондирования. Такой подход использован нами, а также в работах (Crevoisier et al., 2004, 2009), где независимые оценки $T(p)$ строятся по данным МКВ-зондировщика AMSU-A. В результате удается получить среднемесячные оценки X_{CO_2} в средней и верхней тропосфере с приемлемым уровнем погрешности (порядка 2.2 млн^{-1}). Это позволяет, в принципе, изучать межгодовой тренд – возрастание концентрации CO_2 над бореальными экосистемами Сибири.

Достоверность и точность выходных продуктов ДЗА зависят от используемых алгоритмов тематической обработки и могут меняться. В климатических исследованиях необходимо накопление однородных (в смысле неизменности характеристик) рядов данных о с.к.п., поэтому весьма важными являются работы, инициированные CNES по созданию долговременных архивов данных измерений IASI уровня 1С. Программа этих работ и первые результаты представлены в докладе Phulpin, Gaugin, на 3-й Международной конференции по данным IASI. Помимо самостоятельного значения (например, для оценки компонент радиационного баланса) указанные архивы могут быть использованы для повторной тематической обработки спутниковых данных с помощью усовершенствованных и унифицированных алгоритмов и формирования однородных рядов оценок с.к.п.

В заключение данного раздела отметим, что вследствие ограниченного объема вне рамок статьи остались работы последних лет, посвященные развитию методов мониторинга малых газовых составляющих и аэрозолей в интересах изучения процессов переноса примесей и атмосферной химии, оценки качества (загрязнений) воздуха в нижней тропосфере (Clerbaux et al., 2009). Вследствие высокого спектрального разрешения и малых инструментальных погрешностей данных IASI удается, наряду с мониторингом содержания основ-

ных газовых составляющих (O_3 , CO , N_2O , CH_4 , CO_2), детектировать наличие “второстепенных” и короткоживущих компонент. Всего, по данным IASI, согласно современным исследованиям, возможно детектирование около 20 различных газовых составляющих атмосферы. Примеры оценок общего содержания HNO_3 , HCOOH , CH_3OH , NH_3 , детектирования SO_2 (в облаках вулканического пепла) даны в обзоре (Hilton et al., 2012).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный обзор позволяет сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Создание и оперативная эксплуатация гиперспектральных ИК-зондировщиков (IASI, IASI, CrIS) подтвердили высокий информационный потенциал получаемых данных. Выходные продукты ДЗА по составу и точности соответствуют современным требованиям пользователей и заметно превосходят выходные продукты предшествующих атмосферных зондировщиков (аппаратуры ATOVS на спутниках серии NOAA).

2. Данные ИК-зондировщиков AIRS, IASI используются в ведущих прогностических центрах Европы и США, их усвоение в прогностических моделях вносит заметный вклад в повышение точности результатов ЧПП. При этом вклад данных IASI – наибольший, по сравнению со вкладом данных измерений и информационной продукции другой целевой аппаратуры п/о метеоспутников.

3. Запуск и эксплуатация гиперспектральных ИК-зондировщиков позволили достичь большого прогресса в создании систем дистанционного мониторинга газового состава атмосферы – детектировании и оценкам общего содержания различных (порядка 20) газовых составляющих атмосферы.

4. Стабильность спектральной и радиометрической калибровок, уровня инструментального шума позволяют использовать данные IASI в качестве референсных при контроле и уточнении калибровки данных других ИК-зондировщиков. Регулярная интеркалибровка данных ИК-зондировщиков, функционирующих на п/о метеоспутниках, необходима для их эффективного использования в моделях ЧПП, климатических исследованиях.

5. Расширение состава и улучшение качества выходных продуктов ДЗА, повышение эффективности использования данных IASI и других ИК-зондировщиков требуют дальнейших методических проработок в части:

- уточнения спектроскопических баз данных (HITRAN), создания БРМ повышенной точности и быстрого действия, разработки БРМ, пригодной для моделирования спутниковых данных в условиях облачной атмосферы;

- создания усовершенствованных алгоритмов “обращения” спутниковых данных, в том числе, при наличии облачности;

— увеличения качества используемой спектральной информации путем оптимизации состава каналов, замены спектров на совокупность ГК.

6. Опыт создания и эксплуатации зарубежных гиперспектральных ИК-зондировщиков необходимо использовать при отработке наземного комплекса анализа данных отечественного ИК-зондировщика ИКФС-2 КА “Метеор-М” № 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.* Прикладная статистика: Исследование зависимостей / Под ред. С.А. Айвазяна. М.: Финансы и статистика, 1985. 487 с.
- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Успенский А.Б.* Оптимальная параметризация спектров уходящего теплового излучения на примере данных спутникового ИК-зондировщика ИКФС-2 // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 2. С. 143–148.
- Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Мащицкий Ю.П. и др.* Бортовые инфракрасные Фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исслед. Земли из космоса (настоящий выпуск).
- Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятков А.В. и др.* Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Тр. Всерос. конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. 10–14 ноября 2008 г. Москва, ИКИ РАН. М.: ООО Азбука-2000, 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 259–266.
- Кухарский А.В., Успенский А.Б.* Определение концентрации диоксида углерода в тропосфере по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // Метеорология и гидрология. 2009. № 4. С. 15–28.
- Плохенко Ю.В., Успенский А.Б.* О повышении точности данных дистанционного температурного зондирования со спутников в условиях облачной атмосферы // Исслед. Земли из космоса. 1984. № 2. С. 15–22.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Температурно-влажностное зондирование атмосферы по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения ИКФС-2 // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 5. С. 3–10.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010а. № 3. С. 3–11.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б.* Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010б. № 4. С. 85–90.
- Рублев А.Н., Успенский А.Б., Пяткин В.П., Русин Е.В.* Быстрая модель радиационного переноса для анализа данных гиперспектрального ИК-зондировщика спутников серии “Метеор-М” // Исслед. Земли из космоса (настоящий выпуск).
- Рублев А.Н., Успенский А.Б., Троценко А.Н. и др.* Детектирование и оценка балла облачности по данным атмосферных ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 3. С. 43–51.
- Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. СПб.: Наука, 2003. 474 с.
- Успенский А.Б.* Дистанционное зондирование атмосферы с помощью спутниковых Фурье-спектрометров // Межд. конф. “Математические методы в геофизике”. Новосибирск: ИВМ и МГ, 2003. Ч. II. С. 579–584.
- Успенский А.Б.* Современное состояние и перспективы дистанционного температурно-влажностного зондирования атмосферы // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 2. С. 26–36.
- Успенский А.Б., Кухарский А.В., Романов С.В., Рублев А.Н.* Мониторинг концентрации диоксида углерода и общего содержания метана в тропосфере над Сибирью по данным спутниковых ИК-зондировщиков AIRS, IASI // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 1. С. 14–21.
- Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н.* Моделирование дистанционных измерений вертикального распределения озона в атмосфере по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2003а. № 1. С. 49–57.
- Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н.* Применение метода главных компонент для анализа ИК-спектров высокого разрешения, измеренных со спутников // Исслед. Земли из космоса. 2003б. № 3. С. 26–33.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Копылов А.В. и др.* Определение температуры земной поверхности по спутниковым измерениям уходящего теплового излучения высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 4. С. 21–31.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н.* Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18–33.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н. и др.* Определение общего содержания малых газовых составляющих атмосферы с помощью ИК-зондировщика IASI I. Анализ информативности спектральных измерений // Исслед. Земли из космоса. 1998а. № 2. С. 3–16.
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н., Романов С.В.* Определение общего содержания малых газовых составляющих атмосферы с помощью ИК-зондировщика IASI. II. Анализ точности результатов зондирования // Исслед. Земли из космоса. 1998б. № 3. С. 79–86.
- Aires F., Rossow W.B., Scott N.A. et al.* Remote sensing from the IASI instrument. 1. Compressing, denoising, and first-guess retrieval algorithms // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D22.4619. doi: 10.1029/2001/D000955.
- August T., Klaes D., Schlüssel P. et al.* IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit // J. Quant. Spectr. Rad. Transf. 2012. V. 113. № 11. P. 1340–1371. doi: 10.1016/j.jqsrt.2012.02.028.
- Aumann H.H., Chahine M.T., Gautier C. et al.* AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science, objectives, data, products, and processing systems // IEEE. Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. P. 253–264.
- Chalon G., Caila F., Diebel D.* IASI: An advanced sounder for Operational Meteorology // Proc. 52-th Congr. IAF. Toulouse, France, 2001. P. 1–5.
- Clerbaux C. et al.* Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/METOP sounder // At-

- mos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 6041–6054. doi: 10.5194/acp-9-6041-2009.
- Crevoisier C., Heilliette S., Chedin A. et al.* Midtropospheric CO₂ concentration retrieval from airs observations in the tropics // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. № L17106. doi: 10.1029/2004GL020141.
- Crevoisier C., Chédin A., Matsueda H., Machida T., Armante R., Scott N.A.* First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 4797–4810. doi: 10.5194/acp-9-4797-2009.
- Ghander G., Hewison T.J., Fox N. et al.* Overview of intercalibration of satellite instruments // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2013. V. 51. № 3. P. 1056–1080.
- Goldberg M. et al.* The Global Space-Based Inter-Calibration System // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2011. V. 92. P. 467–475.
- Guidard V., Fourrie N., Brousseau P., Rabier F.* Impact of IASI assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137. P. 1975–1987. doi: 10.1002/qj.928.
- Hilton F., Armante R., August T. et al.* Hyperspectral earth observation from IASI. Five years of accomplishments // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2012. V. 93. P. 347–368.
- Larar A.M., Smith W.L., Zhou D.K. et al.* IASI spectral radiance validation inter-comparisons: case study assessment from the JAIVEx experiment field campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 411–430.
- Liu X., Zhou D.K., Larar A.M. et al.* Retrieval of atmospheric profiles and cloud properties from IASI spectra using superchannels // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. № 9. P. 9121–9142.
- McNally A.P., Watts P.D.* A cloud detection algorithm for high spectral-resolution infrared sounders. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2003. V. 129. P. 3411–3423. doi: 10.1256/qj.02.208.
- NWP SAF.* IASI principal components in AAPP: User manual // *NWPSAF-MO-UD-022.* Ver. 1.0. 2010. 15 p.
- Plokhenko Yu., Menzel W.P.* Physical aspects of non-linear analysis and interpretation of hyperspectral measurements from the AIRS radiometer // *Intern. TOVS Study Conf. ITSC-17.* Monterey, CA. 14–20 Apr. 2010. <http://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/itsc/itsc17/papers.html>.
- Rodgers C.D.* Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice // *World Sci. Publ. Co.* 2000. 238 p.
- Schlüssel P., Hultberg T.H., Philips P.L. et al.* The operational IASI level 2 processor // *Adv. Space Res.* 2005. № 36. P. 982–988.
- Seeman S.W., Borbas E.E., Knutesen R.O. et al.* Development of a global infrared land surface emissivity database for application to clear sky sounding retrievals from multi-spectral satellite radiance measurements // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2008. № 47. P. 108–123.
- Smith W.L., Huang H.L.* An advanced sounder cloud contamination study // *J. Appl. Meteorol.* 1996. V. 35. № 8. P. 1249–1255.
- Smith W.L., Revercomb H., Bingham G. et al.* Technical note: Evolution, current capabilities, and future advances in satellite nadir viewing ultra-spectral IR sounding of the lower atmosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 5563–5574.
- Smith W.L., Weisz E., Kireev S.V. et al.* Dual-Regression Retrieval Algorithm for Real-Time Processing of Satellite Ultraspectral Radiances // *J. Appl. Meteorol. Clim.* 2012. V. 51. № 8. P. 1455–1476.
- Sounders R.W., Matricardi M., Brunel P.* An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1999. V. 125. P. 1407–1425.
- Susskind J., Blaisdell J., Iredell L. et al.* Improved temperature sounding and quality control methodology using AIRS/AMSU data: The AIRS Science team version 5 retrieval algorithm // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2011. № 49. P. 883–907.
- Trotsenko A.N., Uspensky A.B., Kopylov A. et al.* Modular prototype processor for geophysical parameters retrieval from IASI: pilot version // *Eumetsat Meteorological Satellite Conf.* 2003. Weimar, Germany. 2003. P. 110–117.
- Uspensky A.B., Romanov S.V., Trotsenko A.N.* Can a statistical regression be valuable tool for the inversion of advanced IR sounders data? // *Proc. 13th Intern. TOVS Study Conf. Sainte-Adele, Quebec, Canada.* 29 Oct.–04 Nov. 2003. P. 652–659.
- Zhou D.K., Smith W.L., Liu X. et al.* Thermodynamic and cloud parameters retrieval using infrared spectral data // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. № L 15805. doi: 10.1029/2005GL023211.
- Zhou D.K., Smith W.L., Larar A.M. et al.* All weather IASI single field-of-view retrievals: Case study—Validation with JAIVEx data // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 2241–2255. doi: 10.5194/acp-9-2241-2009.

The Current State and Promises of Satellite-Based Hyperspectral Atmospheric Sounding

A. B. Uspensky, A. N. Rublev

State Research Center “Planeta”, Moscow

The paper presents the brief description of hyperspectral IR sounders installed on-board operational polar-orbiting meteorological satellites EPS/Metop, Suomi-NPP, and “Meteor-M”. IASI performance characteristics (including calibration accuracy and instrumental noise) are considered. The overview of satellite data processing algorithms and technologies is given that provide various remote sounding products on atmosphere and surface parameters. The impact of IASI data in numerical weather prediction models is discussed together with their contribution to climate studies. Some problems of developing more efficient sounders data processing and utilization are formulated.

Keywords: hyperspectral IR sounder, spectral resolution, temperature-humidity remote sounding, calibration, validation, statistical and physical algorithms, trace gases, numerical weather prediction

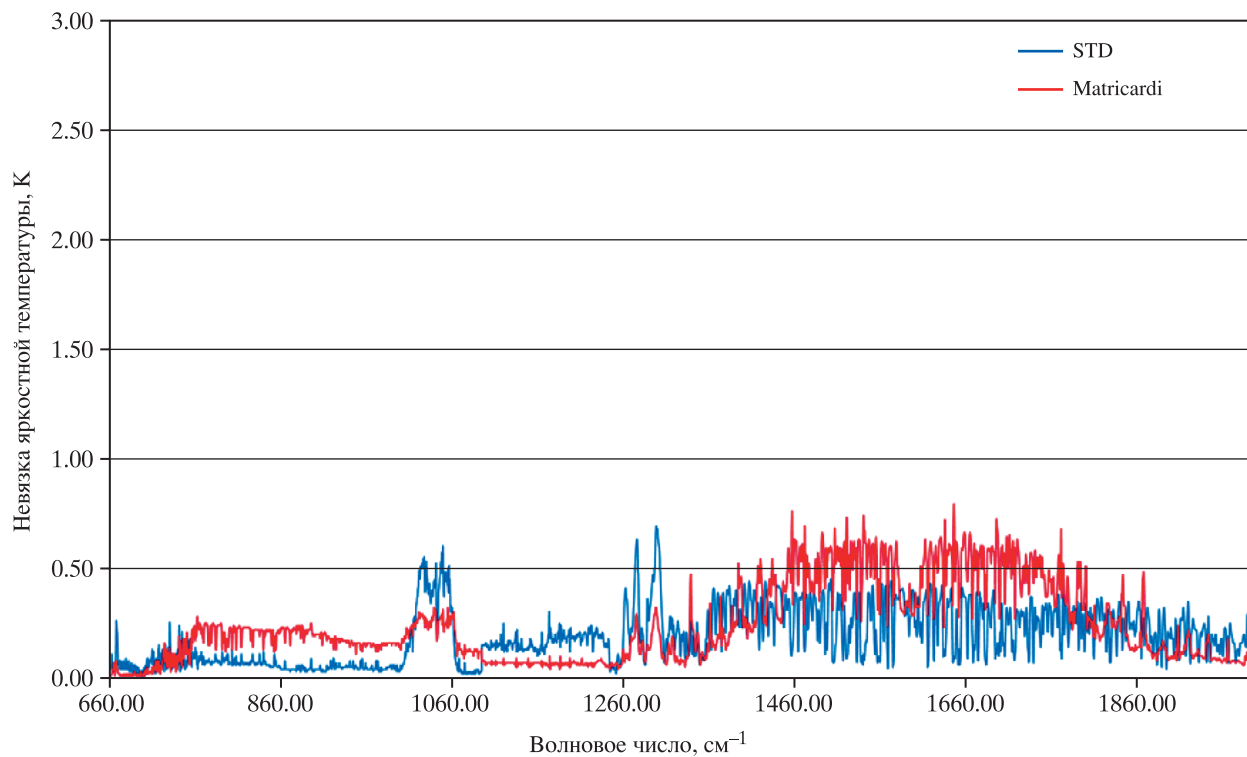


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования спектров ИКФС-2 с помощью БРМ/ИКФС и LBLRTM.

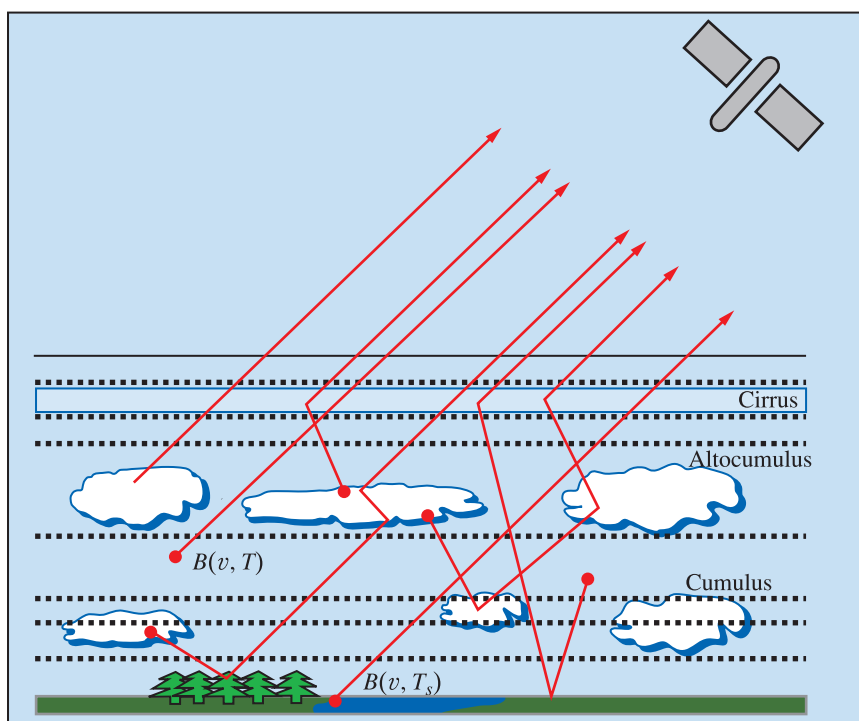


Рис. 2. Геометрическая схема расчетов в алгоритме Монте-Карло.



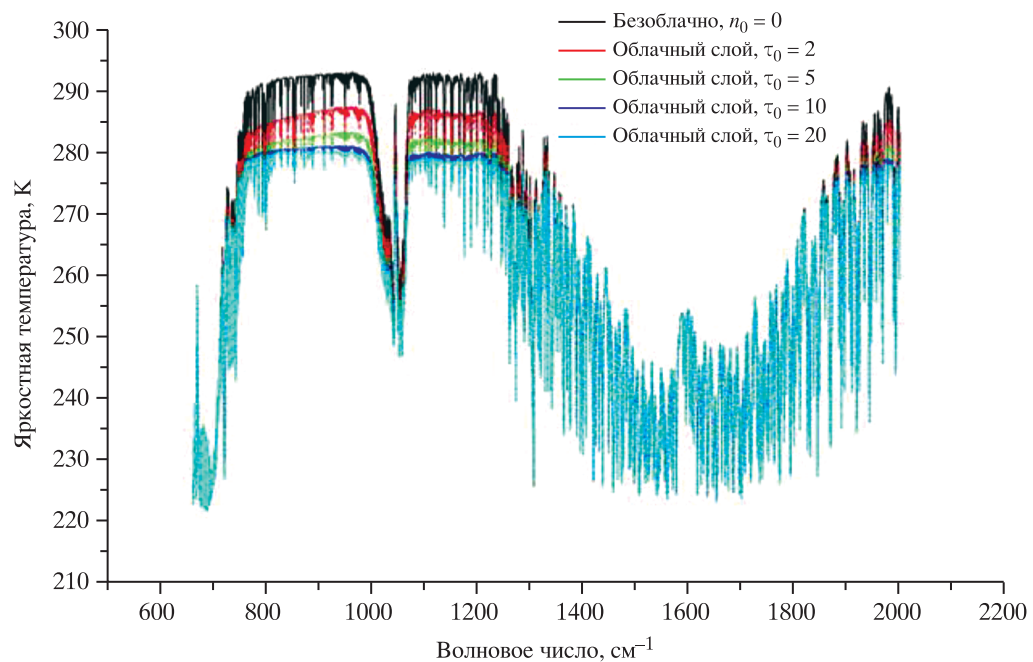


Рис. 4. Спектры яркостных температур в каналах ИКФС-2 при сплошном облачном слое с различной оптической толщиной τ_0 , летняя среднеширотная модель атмосферы.

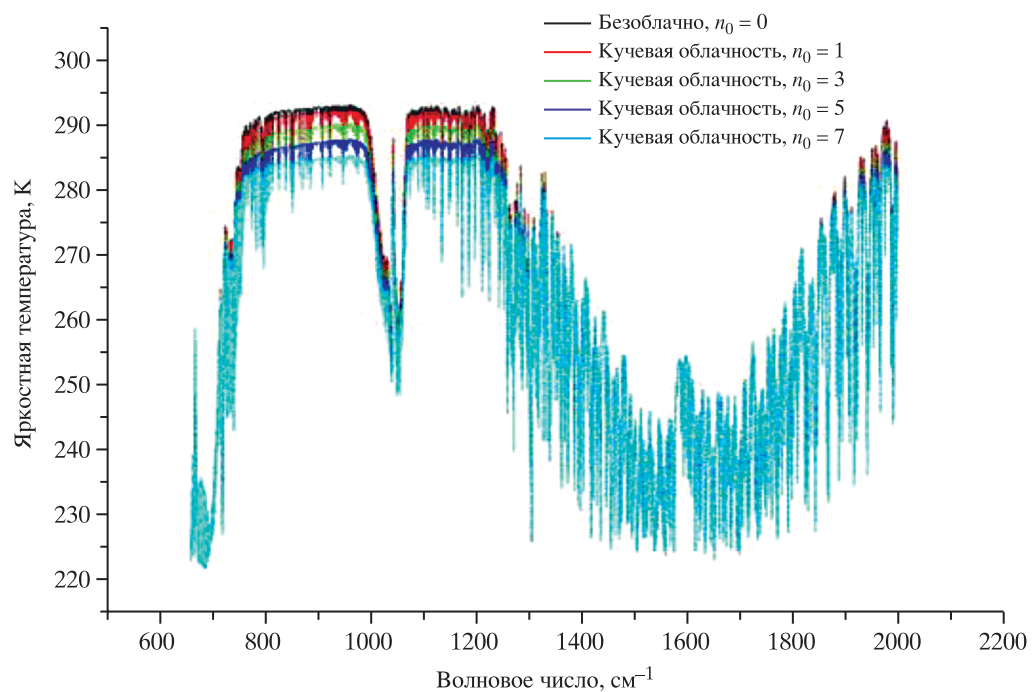


Рис. 5. Спектры яркостных температур в каналах ИК-зондировщика ИКФС-2 при различных баллах кучевой облачности, летняя модель атмосферы.

БЫСТРАЯ РАДИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО ИК-ЗОНДИРОВЩИКА СПУТНИКОВ СЕРИИ “МЕТЕОР-М”

© 2013 г. А. Б. Успенский¹, А. Н. Рублев¹, Е. В. Русин², В. П. Пяткин²

¹ФГБУ “НИЦ “Планета”, Москва

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

E-mail: alex.rublev@mail.ru

Поступила в редакцию 06.05.2013 г.

Рассмотрены методические и вычислительные аспекты создания быстрых радиационных моделей (БРМ), предназначенных для анализа и валидации данных измерений спутниковой гиперспектральной аппаратуры – ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения. Приведено описание БРМ для анализа и моделирования измерений ИК-Фурье-спектрометра ИКФС-2 полярно-орбитальных метеоспутников серии “Метеор-М”, созданной на основе известной БРМ RTTOV. Оценивается вычислительная производительность и приводятся результаты верификации созданной БРМ, полученные путем сравнения модельных расчетов с точными полинейными расчетами для ИК-зондировщика ИКФС-2. Обсуждается повышение вычислительной производительности и точности БРМ за счет использования алгоритмов метода главных компонент. Рассмотрено построение радиационных моделей, использующих алгоритм метода Монте-Карло и пригодных для анализа и моделирования данных ИК-зондировщиков при наличии облачности в поле зрения прибора.

Ключевые слова: быстрая радиационная модель, ИК-зондировщик ИКФС-2, моделирование спутниковых измерений, RTTOV, оптическая толщина, якобиан, алгоритм Монте-Карло

DOI: 10.7868/S0205961413060109

ВВЕДЕНИЕ

Для обработки и анализа данных измерений гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-2 (инфракрасный Фурье-спектрометр-2), устанавливаемого на российских метеоспутниках серии “Метеор-М”, требуется создание быстрых и высокоточных процедур радиационных расчетов. Указанные процедуры и соответствующие программные комплексы (быстрые радиационные модели (БРМ)) предназначены для:

– валидации измеряемых спектров уходящего инфракрасного (ИК) излучения и мониторинга качества абсолютной калибровки;

– тематической обработки или “обращения” спутниковых данных, т.е. восстановления различных параметров состояния системы “атмосфера–подстилающая поверхность” (Rodgers, 2000; Успенский и др., 2005);

– усвоения спутниковых данных в схемах численного анализа и прогноза погоды (Saunders et al., 1999).

Создаваемые БРМ должны обеспечить высокое быстродействие моделирования измеряемых спектров при погрешности расчетов на уровне

инструментального шума. Кроме того, с помощью БРМ необходимо выполнять расчеты ряда характеристик переноса ИК-излучения в атмосфере (оптические толщины, функции пропускания), а также вычислять вариационные производные (якобианы) смоделированных измерений по различным параметрам состояния системы атмосфера–подстилающая поверхность.

В настоящее время существует несколько программных комплексов, предназначенных для моделирования и анализа данных ИК-зондировщиков IASI, AIRS, CrIS, устанавливаемых на полярно-орбитальных метеоспутниках EPS/Metop, EOS/Aqua, Suomi-NPP соответственно (Успенский и др., настоящий выпуск). Большинство указанных комплексов (RTTOV, RTIASI, SARTA), которые за рубежом принято называть FRTM (Fast Radiative Transfer Model – быстрая модель радиационного переноса), базируется на параметризации результатов точного спектрального полинейного (line-by-line – LBL) и пространственного интегрирования уравнения переноса ИК-излучения для плоскопараллельной безоблачной атмосферы. Источником информации о параметрах спектральных линий для LBL-моделей типа LBLRTM

являются спектроскопические базы данных HITRAN (версии 2004, 2008 гг).

В статье рассмотрено построение БРМ для анализа данных ИКФС-2 (БРМ/ИКФС) на основе известного комплекса RTTOV (Saunders et al., 1999), см. <http://nwpsaf.org>. Дано краткое описание методики построения БРМ/ИКФС, ее программной реализации, приводятся результаты валидации радиационных расчетов. Показаны возможности применения алгоритмов метода главных компонент для повышения точности и быстродействия БРМ. Отдельный раздел посвящен описанию комплекса радиационных расчетов достаточно высокой производительности, основанного на алгоритме метода Монте-Карло. С помощью этого комплекса можно производить радиационные расчеты и анализировать данные ИК-зондировщиков при наличии облачности в поле зрения прибора.

МЕТОДОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ БЫСТРЫХ РАДИАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Гиперспектральный ИК-зондировщик ИКФС-2/“Метеор-М” измеряет спектры уходящего ИК-излучения (2701 каналов в области 667–2000 см⁻¹ или 5.0–15.0 мкм), причем общее время измерения одного спектра составляет 0.7 с (Завелевич и др., 2008). Это предъявляет высокие требования к быстродействию БРМ – время моделирования сигнала (интенсивности ИК-излучения, регистрируемой в одном канале) не должно превосходить нескольких миллисекунд. Такая скорость вычислений может быть достигнута путем использования простых аналитических выражений или интерполяционных схем без привлечения алгоритмов численного интегрирования уравнения переноса (спектрального и пространственного).

Рассмотрим кратко принципы построения подобных БРМ на примере FRTM RTTOV, SARTA (Saunders et al., 1999; Успенский и др., 2005; Strow et al., 2003). Основное назначение программных комплексов RTTOV (последние версии – RTTOV-10, RTTOV-11) – быстрый и достаточно точный расчет измеряемых на верхней границе атмосферы (ВГА) спектров уходящего излучения \mathbf{R} по заданному вектору состояния \mathbf{x} : $\mathbf{R} = H(\mathbf{x})$, где H – оператор уравнения переноса или оператор прямой задачи. Компонентами вектора \mathbf{x} являются профили температуры $T(p)$, отношения смеси водяного пара $q(p)$ и озона $Q(p)$, заданные на фиксированной сетке давлений $\{p_i\}$, а также T_s , ϵ (температура и излучательная способность поверхности) и T_a , q_a (температура и влажность воздуха в приповерхностном слое). В последних версиях RTTOV предусмотрено расширение \mathbf{x} за счет включения данных о параметрах облачности. Комплекс RTTOV позволяет также вычислить матрицу якобианов G (вариационных или функциональных производных \mathbf{R} по \mathbf{x}), с по-

мощью которой рассчитываются вариации излучения δR , соответствующие вариациям компонентов вектора состояния $\delta \mathbf{x}$ относительно исходного состояния \mathbf{x}_0 : $\delta \mathbf{R} = G(\mathbf{x}_0)\delta \mathbf{x}$.

Комплексы RTTOV обеспечивают моделирование измерений различных спутниковых радиометров, включая уже упомянутые ИК-зондировщики AIRS, IASI, CrIS. Специально разработанный для моделирования данных IASI программный комплекс RT IASI по принципам построения и использованным атмосферным моделям полностью соответствует RTTOV. Для моделирования и анализа измерений зондировщика AIRS разработан комплекс быстрых радиационных расчетов SARTA – Stand alone AIRS Radiative Transfer Algorithm. Методология быстрых расчетов характеристик переноса подобна используемой в RTTOV (Strow et al., 2003).

За основу при разработке БРМ применительно к ИК-зондировщику ИКФС-2 была принята методология создания RTTOV, основанная на “быстром” вычислении эффективных оптических толщин атмосферных слоев. Под эффективной оптической толщиной j -го слоя атмосферы на частоте, соответствующей центру выбранного канала, понимается величина $\Delta\phi_j$, для набора которых $\{\Delta\phi_j, j = 1, \dots, N\}$ выполняется соотношение

$$e^{-\sum_j^N \Delta\tau_j} = \Gamma.$$

Здесь N – число слоев атмосферы между земной поверхностью и ВГА, Γ – функция пропускания излучения атмосферы в данном канале (точнее, результат интегрирования функции пропускания со спектральной аппаратной функцией канала). Высокая скорость вычислений эффективных толщин $\Delta\phi_j$ достигается применением множественной линейной регрессии, в которой используются заранее выбранные предикторы – параметры состояния атмосферы или их функционалы для заданного зенитного угла наблюдений. Конкретный вид и параметры регрессии определяются на основе результатов точных радиационных расчетов со строгим полинейным учетом спектров поглощения атмосферных газов.

Вычисление эффективной оптической толщины в RTTOV выполняется суммированием определяемых в заданной последовательности вкладов поглощения отдельных газов. В версии RTTOV 9.1(принятой в качестве базовой при разработке БРМ) индивидуально учитывается поглощение ИК-излучения шестью газовыми компонентами: водяным паром H₂O, диоксидом углерода CO₂, озоном O₃, оксидом азота N₂O, оксидом углерода CO и метаном CH₄. Концентрации остальных оптически активных газов считаются постоянными, а их совокупный вклад в значение эффективной опти-

Таблица 1. Общее время (с) моделирования данных ИКФС-2 с помощью БРМ/ ИКФС и LBLRTM

Модель	Количество моделируемых каналов										
	2701	2500	2000	1500	1000	500	300	100	50	10	1
БРМ/ИКФС	1.3	1.2	0.96	0.72	0.48	0.24	0.14	0.049	0.026	0.007	0.003
LBLRTM	45.0	40.0	32.7	23.5	18.5	11.3	7.7	4.0	2.8	1.6	1.3

ческой толщины вычисляется отдельной суммарной функцией.

В качестве “точных” значений эффективных оптических толщин (“предиктантов” в уравнении регрессии) были использованы результаты расчетов с помощью точной полинейной модели LBLRTM (версия 11.7, январь 2010 г.). Модель LBLRTM разработана в американской корпорации AER (Atmospheric and Environmental Research, Inc) и находится в открытом доступе на сайте http://www.rtweb.aer.com/lblrmt_frame.html. Основным достоинством LBLRTM является то, что в ней учитываются последние достижения в области атмосферной спектроскопии, и она проходит тщательную экспериментальную проверку в рамках американской программы ARM и других натуральных экспериментов. Модель LBLRTM использовалась для расчетов монохроматических оптических толщин атмосферных слоев с высоким (0.0005 см^{-1}) спектральным разрешением, на основании которых затем выполнялся расчет аподизированных функций пропускания.

Для нахождения регрессионных коэффициентов используется обучение БРМ на представительном глобальном наборе из 83 моделей атмосферы (Matricardi, 2008). Указанный набор был ранее отобран при построении БРМ, предназначенной, в частности, для моделирования и анализа данных IASI, AIRS. В обучающем наборе вертикальные профили температуры и концентрации всех учитываемых газов-поглощителей заданы на 101 уровне давления. В вычислениях используется также “опорный” профиль, содержащий средние значения температур и концентраций. Вся спектральная область измерений ИКФС-2 разбита на 13 прилегающих спектральных диапазонов, для каждого из которых использован свой набор (от 73 до 89) предикторов.

Описанная методология стала основой при создании специализированного программного комплекса быстрого моделирования спутниковых измерений БРМ/ИКФС. Комплекс реализован в среде Microsoft Visual Studio 2008 на языках C++ и Fortran и обеспечивает построение БРМ и выполнение радиационных расчетов.

Время выполнения операции моделирования (в сек) для различного числа каналов с помощью БРМ/ИКФС в сравнении с “точными” вычисле-

ниями (LBLRTM) приведено в табл. 1. Замеры выполнялись на ПЭВМ с центральным процессором Intel Core i5 650 3.20 ГГц и 4 Гб оперативной памяти. Как видно, созданная БРМ обеспечивает существенное (30–200-кратное) ускорение по сравнению с LBLRTM. Для оперативного анализа данных ИКФС-2 требуется дальнейшее повышение вычислительной производительности БРМ, в связи с чем начаты методические проработки, связанные с распараллеливанием вычислений. Основой для распараллеливания вычислений является то, что моделирование измеренных спектров можно выполнять с помощью созданной БРМ/ИКФС одновременно для набора пикселей, меняя только входные данные (вектор состояния x).

В отсутствие прямых спутниковых измерений ИКФС-2 для валидации и оценки точности БРМ-спектры, рассчитанные с помощью БРМ/ИКФС и LBLRTM во всем рабочем спектральном диапазоне спектрометра ($660–2000 \text{ см}^{-1}$), сравнивались между собой. Сопоставление приведено для упомянутого выше обучающего набора атмосферных моделей, а также независимого набора стандартных моделей WCP-112. Приведенные на рис. 1 (см. на цветн. вклейках) кривые показывают, что среднеквадратическая невязка результатов расчетов БРМ и LBLRTM не превышает 0.3 К и всегда меньше 0.75 К. Важно при этом, что хорошее совпадение результатов наблюдается в полосе поглощения CO_2 в диапазоне $660–750 \text{ см}^{-1}$ — основном участке спектра, измерения в котором используются для восстановления вертикальных профилей температуры.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МГК ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ БЫСТРЫХ МОДЕЛЕЙ РАДИАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

Согласно современным исследованиям наиболее эффективными по своему быстрдействию и точности являются радиационные модели, основанные на алгоритмах метода главных компонент (МГК). Алгоритмы МГК применяются для “сжатия” данных ИК-зондировщиков и фильтрации инструментального шума (Huang, Antonelly, 2001; Aires et al., 2002; Успенский и др., 2003), а также для построения супер-быстрых моделей радиационных расчетов (Liu et al., 2005). В сравне-

нии с моделями типа RTTOV, SARTA, RT IASI супербыстрые модели имеют производительность в 3–30 раз выше, что позволяет эффективно “обращать” и усваивать большие объемы спутниковых данных. Супербыстрые модели радиационных расчетов, использующие МГК, называют PCRTM (Principal Component Radiative Transfer Model) или БРМГК (быстрая радиационная модель, использующая МГК).

Теоретической основой использования МГК для построения PCRTM является большая избыточность измерений ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения; вследствие большого количества “подобных” линий поглощения многие каналы “подобны” друг другу, что приводит к избыточности поканальных радиационных расчетов, реализованных в комплексах RTTOV, SARTA, RT IASI. Рассмотрим в качестве примера практической реализации описанного подхода комплекс PC_RTTOV, разработанный (Matricardi, 2010) и интегрированный в версию 10.2 пакета RTTOV (RTTOV 10.2, доступен с января 2012 г. на сайте <http://nwpsaf.org>).

Техника использования алгоритмов МГК при построении БРМГК включает два этапа. На первом этапе рассчитывается ковариационная матрица спектров “канал–канал”. Для этого используются программа точных расчетов (LBLRTM) и репрезентативная выборка атмосферных моделей. Монохроматические радиации рассчитывались с шагом 0.001 см^{-1} , а затем “свертывались” со спектральной аппаратной функцией конкретного ИК-зондировщика (IASI, AIRS). Общий объем выборки моделированных спектров для пяти значений зенитных углов составляет 5195 реализаций. В вычислительном плане это трудоемкая задача, но необходимые расчеты выполняются однократно и могут быть сделаны заранее. Для уменьшения трудоемкости расчетов весь спектр разделен на несколько прилегающих областей. Для каждой из областей и соответствующей ковариационной матрицы определяются собственные векторы (с.в.) и собственные значения (с.з.). Старшие с.в., упорядоченные в соответствии с убыванием с.з., образуют базис эмпирических ортогональных функций (ЭОФ).

На втором этапе вектор $\delta \mathbf{R}_j = \mathbf{R}_j - \bar{\mathbf{R}}$ отклонений измеренного спектра \mathbf{R}_j от среднего спектра $\bar{\mathbf{R}}$ аппроксимируется разложением по базису ЭОФ, используя метод наименьших квадратов (МНК). При этом для определения коэффициентов разложения (главных компонент (ГК)) можно использовать данные измерений не во всех каналах, а только в m наиболее информативных каналах. С формальной точки зрения для применения МНК достаточно воспользоваться данными в $m \geq n_c$ каналах (n_c – размерность базиса ЭОФ).

Применительно к данным IASI весь спектр ($645\text{--}2760 \text{ см}^{-1}$) разбит на три области: I ($645\text{--}1210 \text{ см}^{-1}$); II ($1200\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$); III ($2000\text{--}2760 \text{ см}^{-1}$). Для каждой области определены свои базисы ЭОФ: 40 для области I; по 30 для областей II и III. При моделировании сигналов в наиболее информативных каналах вместо многократных расчетов с помощью LBLRTM целесообразно применять пакет RTTOV. Это приводит к заметному сокращению объема вычислительной работы при моделировании полного спектра. Кроме того, как показали численные эксперименты, новая БРМ (названная PC_RTTOV) при надлежащем выборе параметров (количество главных компонент 200–300 и количество предикторов 300–400 для моделирования данных IASI) обеспечивает повышение точности моделирования полного спектра, по сравнению с использованием RTTOV.

Сравнение результатов моделирования спектров IASI с помощью LBLRTM и PC_RTTOV дает величины среднеквадратической невязки $\sim 0.05 \text{ К}$ для большинства каналов, что свидетельствует о повышении точности моделирования с помощью PC_RTTOV. Сравнение измеренных спектров IASI с модельными спектрами, полученными с помощью RTTOV (RT IASI) и PC_RTTOV, дает близкие результаты. При этом PC_RTTOV обеспечивает значительный выигрыш в быстродействии, по сравнению с комплексом RT IASI. Для моделирования спектра IASI с помощью RT IASI требуется 0.39 с (без расчета вариационных производных) и более 0.8 с с их расчетом. Расчет спектра IASI с помощью PC_RTTOV требует 0.045 с. Для расчета сигналов и вариационных производных в 100 каналах нужно 0.038 с.

РАДИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ ИК-ЗОНДИРОВЩИКА В УСЛОВИЯХ ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Применительно к спутниковым ИК-зондировщикам высокого спектрального разрешения необходимо создание радиационных моделей, которые могли бы использоваться для анализа и валидации спектров уходящего излучения, измеренных в условиях облачной атмосферы. Для этих целей был разработан трехмерный алгоритм метода Монте-Карло (Метод Монте-Карло..., 1976), основанный на моделировании сопряженных траекторий фотонов (Рублев и др., 2004). Радиационная модель, использующая созданный алгоритм (кратко алгоритм МК), предназначена для расчета аподизированных значений интенсивностей и якобианов уходящего излучения в каналах ИК-зондировщиков IASI и ИКФС-2 и в дальнейшем тексте названа РМ-МК.

В качестве исходных данных РМ-МК может использоваться, наряду с горизонтально однородными моделями атмосферы (при отсутствии об-

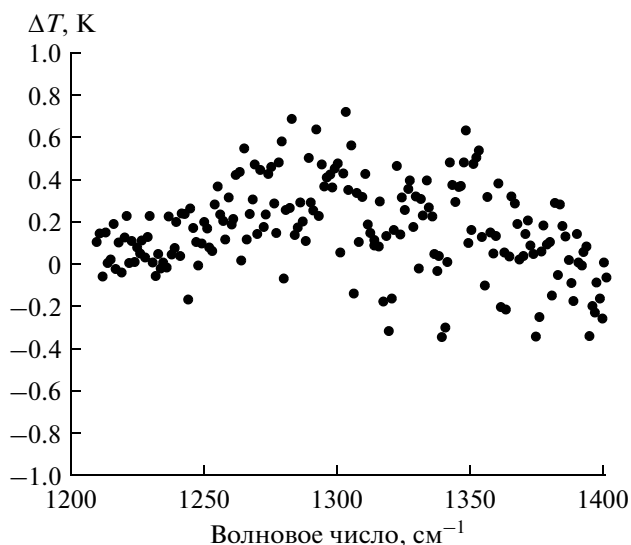


Рис. 3. Разность яркостных температур в спектральном диапазоне 1200–1400 cm^{-1} , рассчитанных с помощью РМ-МК и модели (Trotsenko et al., 2001).

лачности), атмосферные модели при наличии разорванной и многослойной облачности, например, подобные рассмотренным в (Рублев и др., 2004) и разработанные на основе известного набора NOAA 88/89 радиозондовых измерений. Геометрическая схема расчетов в РМ-МК показана на рис. 2 (на цветн. вклейках).

Моделирование сопряженных траекторий начинается на верхней границе атмосферы (ВГА) в направлении оси визирования спутниковой аппаратуры (т.е. фотон движется в направлении, противоположенном стрелкам на рис. 3), а заканчивается при поглощении фотона в атмосфере, на поверхности или при его уходе в космос через ВГА. Координаты стартовой точки равномерно распределены в пределах квадрата со стороной $L = 50$ км.

Интенсивность уходящего излучения I рассчитывается как математическое ожидание

$$I = (\Delta \cdot W) \quad (1)$$

энергетических вкладов W фотонов для всех смоделированных траекторий. Индикатор Δ принимает значение 1 или 0, в зависимости от того, произошло поглощение фотона или нет. Энергетический вклад фотона W с частотой ν в оцениваемую интенсивность I определяется функцией Планка $B(\nu, T)$, т.е. $W = B(\nu, T)$ при поглощении в атмосфере с температурой T в точке поглощения или $W = \varepsilon B(\nu, T_s)$ при поглощении на поверхности со спектральной излучательной способностью ε и температурой T_s .

При поглощении в атмосфере значение T находится линейной интерполяцией по высоте, используя заданные температуры на границах z_{i-1}, z_i

соответствующего атмосферного слоя. Далее для сокращения записи волновое число ν будет опущено во всех случаях, когда речь пойдет о монохроматическом излучении.

Вариационные производные (якобианы) по температуре, усредненные в заданном атмосферном слое, определяются как математическое ожидание

$$J_i^T = \frac{\delta I_i}{\delta T} = \left\langle \Delta_i \cdot \frac{\Delta B(T)}{\Delta T} \left(1 + \frac{\Delta k_g}{k_\Sigma} \right) \right\rangle. \quad (2)$$

Здесь Δ_i – индикатор, единичное значение которого указывает, что поглощение произошло в атмосферном слое $z_{i-1} - z_i$; ΔT – конечное приращение по температуре (в расчетах $\Delta T = 0.5$ К) и соответствующие ему смещение функции Планка $\Delta B(T)$ и суммарного газового коэффициента поглощения Δk_g ; k_Σ – суммарный (газовый + аэрозольный или облачный) коэффициент поглощения в точке обрыва траектории фотона. Поясним, что, несмотря на малую величину ΔT , определяемые им смещения $\Delta B(T)$ и Δk_g вычисляются аналитически, носят неслучайный характер и потому надежно определяются при любом уровне статистической ошибки, присущей методу Монте-Карло.

Аналогично (2) определяется якобиан по температуре поверхности T_s

$$J_s^T = \frac{\delta I_0}{\delta T} = \left\langle \Delta_0 \cdot \frac{\Delta B(T_s)}{\Delta T} \right\rangle.$$

Усреднение происходит по всем поглощениям фотонов подстилающей поверхностью, т.е. когда индикатор Δ_0 равен единице.

Для расчета якобианов по относительным изменениям концентраций газов также используется метод зависимых испытаний (Метод Монте-Карло..., 1976). На его основе получено выражение

$$J_{m,j}^q = \frac{\delta I_{m,j}}{\delta \ln(q_{m,j})} = \frac{1}{\alpha} \left\langle \Delta \cdot B(T) \times \left[\left(1 + \alpha \frac{k_{m,j}}{k_{m,\Sigma}} \cdot \Delta_m \right) \exp(-\alpha k_{m,j} l_{m,\Sigma}) - 1 \right] \right\rangle, \quad (3)$$

где $q_{m,j}$ – доля молекул j -газа в m -слое атмосферы; α – относительное приращение концентраций газов (в расчетах $\alpha = 0.1$); $k_{m,j}$ – коэффициент поглощения j -газа; $k_{m,\Sigma}$ – суммарный коэффициент поглощения; $l_{m,\Sigma}$ – накопленная геометрическая длина пробега фотона в m -слое атмосферы.

В отличие от (2), накопление для усреднения величин в (3) проводится по всем слоям атмосферы, если произошло поглощение фотона и $\Delta = 1$. В m -слое, в котором непосредственно произошло поглощение и $\Delta_m = 1$, умножением на отношение коэффициентов дополнительно учитывается из-

менение вероятности поглощения фотона за счет возмущения концентрации $q_{m,j}$.

Математические выражения (2), (3) довольно просты. Их вычисления алгоритмически хорошо увязываются с определением по формуле (1) энергетических вкладов фотонов в величину интенсивности уходящего излучения и практически не сказываются на времени счета. Предварительное вычисление коэффициентов газового поглощения производится LBL-методом (с помощью LBLRTM). Аподизация в алгоритме проводится за счет случайного выбора частоты фотона по нормальному закону, математическое ожидание которого совпадает с серединой канала, а дисперсия определяется шириной аподизирующей функции. Таким образом, интегрирование по геометрическому пространству при определении интенсивностей и якобианов происходит одновременно с интегрированием по спектру, что позволяет добиться достаточно высокой вычислительной эффективности алгоритма. Например, время расчета для 5361 каналов, равномерно расположенных с шагом 0.25 см^{-1} в диапазоне $660\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$, составляет примерно 4 мин для горизонтально однородных моделей атмосферы и 9 мин для вариантов с разорванной облачностью. Среднеквадратическая погрешность расчетов яркостных температур находится в пределах $0.05\text{--}0.2 \text{ К}$ в зависимости от канала, а погрешность определения якобианов $\sim 5\%$ в области их максимумов. Приведенные оценки быстродействия получены для обычного персонального компьютера с частотой процессора 3.5 ГГц и жестким диском.

Коэффициенты газового поглощения определяются для участка спектра, размеры которого примерно совпадают с шириной аподизированной рабочей полосы выбранного канала. Так, при заданном положении середины канала ν_{ch} коэффициенты рассчитываются со спектральным разрешением 0.001 см^{-1} в полосе $(\nu_{ch} - 3s, \nu_{ch} + 3s)$, где s — СКО нормального распределения, которое обычно используется для аподизации интерферограмм. Величина $s = 0.4247 \text{ FWHM}$, где FWHM (Full Width at Half Maximum) — полная ширина аподизирующей функции, рассчитанная на половинном уровне от ее максимума.

Для проверки алгоритма использовалось сопоставление полученных с его помощью оценок интенсивностей и яркостных температур с известными результатами расчетов для горизонтально однородных моделей атмосферы (при отсутствии облачности). В первую очередь было проведено сравнение интенсивностей уходящего излучения, вычисленных с помощью РМ-МК и LBLRTM для летней среднеширотной модели атмосферы MLS (WCP-112, 1986). Сравнение подтвердило близость результатов расчетов с помощью обеих моделей. Дополнительное тестирование РМ-МК было

выполнено путем сопоставления яркостных температур в спектральном диапазоне $1200\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$ с подобными оценками, полученными независимо. Параллельные расчеты были выполнены с помощью радиационной модели из (Trotsenko et al., 2000) использующей спектроскопическую базу данных HITRAN-96 и прошедшей тщательное тестирование по данным различных натуральных экспериментов. Максимальное расхождение в оценках яркостной температуры не превышает 0.7 К , что для подобного рода сравнений следует признать вполне приемлемым, учитывая различия в используемых спектроскопических базах данных, а также погрешности самой референсной радиационной модели.

Для проверки правильности вычисления якобианов по температуре и концентрациям оценивалась выполнимость приближенных равенств, основанных на формуле Лагранжа

$$\begin{aligned} I[T(z) + \Delta T] &\approx I[T(z)] + \Delta T \sum_m J_m^T, \\ I[T_s + \Delta T_s] &\approx I[T_s] + \Delta T_s J_s^T, \\ I[q(z)(1 + \alpha)] &\approx I[q(z)] + \alpha \sum_m \sum_j J_{m,j}^q. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь ΔT , ΔT_s , σ — постоянные величины, характеризующие сдвиг вертикального профиля температуры атмосферы или температуры подстилающей поверхности, а также относительное возмущение вертикальных профилей концентраций атмосферных газов. С этой целью интенсивности и якобианы собственного излучения невозмущенной атмосферы, используемые в правых частях (4), рассчитывались для модели MLS. Затем в исходные данные вносились возмущения ΔT , ΔT_s или σ и расчеты повторялись для определения интенсивностей $I[T(z) + \Delta T]$, $I[T_s + \Delta T_s]$, $I[q(z)(1 + \alpha)]$, стоящих в левых частях (4) и соответствующих им яркостных температур T_{B_0} . Результаты сопоставления значений яркостных температур T_{B_0} , полученных прямыми расчетами, с их оценками T_{Bp} на основе линейных приближений (4), представлены в табл. 2, 3 для трех волновых чисел при различных значениях возмущающих параметров. В табл. 2 также приведены разности рассчитанных значений яркостных температур, обозначенных $\Delta T_B = T_{B_0} - T_{Bp}$.

Данные табл. 2, 3 подтверждают правильность вычисления якобианов. Для температурных якобианов погрешность (разность между яркостными температурами, полученными прямыми расчетами, и их оценками) мала. Она в десятки раз меньше, чем диапазон изменчивости самих T_{B_0} . Например, при сдвигах температурного профиля атмосферы до 5 К , ошибка, связанная с применением

Таблица 2. Сравнение изменения оценок яркостных T_B температур уходящего излучения при постоянных сдвигах температурного профиля ΔT

ν	660 см^{-1}			1211.5 см^{-1}			1230.0 см^{-1}		
	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B
0	226.22	226.22	0.00	275.38	275.38	0.00	285.50	285.50	0.00
1	227.21	227.21	0.00	276.35	276.35	0.00	285.93	285.93	0.00
2	228.20	228.18	0.02	277.33	277.30	0.03	286.38	286.36	0.02
3	229.19	229.15	0.04	278.30	278.24	0.06	286.82	285.79	0.03
5	231.18	231.05	0.13	280.25	280.09	0.16	287.71	287.65	0.06
10	236.14	235.66	0.48	285.13	284.49	0.64	290.01	289.73	0.28

Таблица 3. Сравнение изменения оценок яркостных T_B температур уходящего излучения при увеличении относительного содержания атмосферных газов

ν	660 см^{-1}			1211.5 см^{-1}			1230.0 см^{-1}			
	α , %	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B	T_{B_0}	T_{Bp}	ΔT_B
0		226.22	226.22	0.00	275.38	275.38	0.00	285.50	285.50	0.00
10		226.65	226.63	0.02	274.62	274.70	-0.08	284.81	284.53	0.28
20		227.04	227.05	-0.01	273.96	274.01	-0.05	284.16	283.57	0.59
30		227.41	227.46	-0.05	273.28	273.32	-0.04	283.52	282.58	0.94

линейных приближений (4), не превышает инструментальной ошибки приборов ~ 0.2 ч– 0.5 К. Для всех представленных волновых чисел согласие между T_{B_0} и T_{Bp} в пределах измерительной погрешности наблюдается при условиях, что изменение концентраций поглощающих газов составляет менее 10%. Необходимо учитывать, что кроме ошибок в определении якобианов, основной причиной расхождений может быть нелинейная зависимость T_{B_0} от концентраций газов. На это указывает увеличение ΔT_B с ростом α для волнового числа 1230.0 см^{-1} .

Для отработки алгоритма МК были проведены расчеты яркостных температур и якобианов в каналах ИКФС-2 для различных атмосферных условий. На рис. 4 (на цветн. вклейках) показаны яркостные температуры T_B во всех каналах ИКФС-2 для модели атмосферы MLS при наличии сплошного облачного слоя (Stratus). Границы облачного слоя фиксированы, меняется только его оптическая толщина слоя τ_0 . Для сравнения здесь же (верхние кривые) приведены результаты расчета T_B в отсутствии облаков при тех же вертикальных профилях атмосферных параметров.

Результаты расчетов яркостной температуры для различных баллов кучевых облаков Cumulus показаны на рис. 5 (на цветн. вклейках). Форма спектров уходящего излучения в условиях куче-

вой облачности похожа на форму спектра при слоистой облачности. Как и в предыдущем случае, наибольшая разница яркостных температур наблюдается в окнах прозрачности атмосферы. По сравнению с безоблачной атмосферы разница в значениях T_B монотонно увеличивается с ростом балла и достигает 8 К при $n_0 = 7$.

Представленные графики носят иллюстративный характер и показывают, главным образом, возможности и универсальность разработанной модели радиационных расчетов. Тем не менее, на основе их анализа можно сделать важный вывод о необходимости учета в расчетном алгоритме эффектов рассеяния ИК-излучения, которые определяют “нечерноту” оптически тонкого ($\tau_0 < 10$) облачного слоя в окнах прозрачности атмосферы. Например, в областях 800–1300 см^{-1} и 1900–2000 см^{-1} разница в яркостных температурах при переходе от $\tau_0 = 2$ к $\tau_0 = 10$ может достигать 6° – 7° . Согласно данным (Справочник, 1989) вероятность присутствия в атмосфере оптически тонких облаков stratus с $\tau_0 < 10$ может достигать 30–50% в зависимости от времени года и географического региона, т.е. это не какая-то “экзотическая” ситуация, а типовые условия работы ИК-зондировщика.

На рис. 6 показаны результаты расчетов температурного якобиана для канала с $\nu = 792.00$ см^{-1} при различных баллах кучевой облачности и вы-

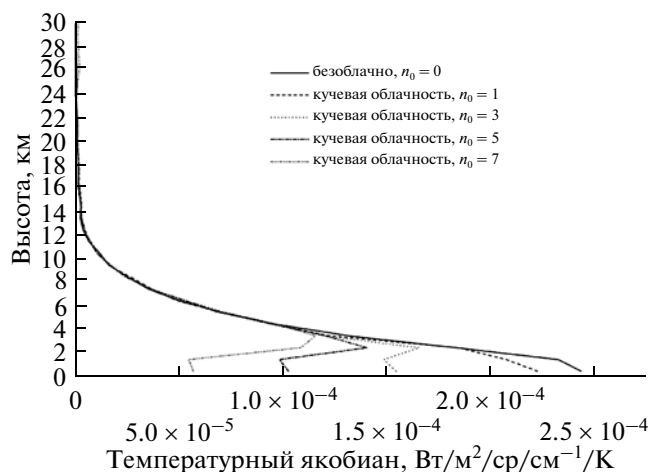


Рис. 6. Влияние кучевой облачности на форму температурного якобиана при $\nu = 792.00 \text{ см}^{-1}$, летняя среднеширотная модель атмосферы.

соте нижней границы $H_d = 2.1 \text{ км}$. В проведенных расчетах при использовании случайных реализаций гауссовского поля максимальное значение высоты верхней границы кучевых облаков не превышает 4 км. Это примерно совпадает с уровнем высот, начиная с которого облачность уже практически не оказывает влияние на форму температурного якобиана. В облачном слое влияние балла облачности на якобиан начинает заметно проявляться, начиная с $n_0 = 0.3$. При больших баллах становятся заметными количественные изменения в максимуме функции, и появление изломов в районе нижней границы облаков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований можно суммировать следующим образом:

1) разработаны метод и программные средства быстрых радиационных расчетов, предназначенные для анализа и моделирования измерений гиперспектрального ИК-зондировщика ИКФС-2, устанавливаемого на метеоспутниках серии “Метеор-М”. Сравнение с результатами полинейных расчетов (LBLRTM) подтверждает достаточную точность (рис. 1) и высокую вычислительную производительность (табл. 1) созданной БРМ. Обсуждается дальнейшее повышение вычислительной эффективности и точности БРМ за счет привлечения алгоритмов метода главных компонент;

2) рассмотрено построение радиационных моделей достаточно высокой производительности, использующих алгоритм метода Монте-Карло. Указанные модели могут применяться для анализа и моделирования данных ИК-зондировщиков

высокого спектрального разрешения при наличии облачности в поле зрения прибора.

Работа частично поддержана грантом РФФИ №13-07-0068.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятов А.В. и др. Фурье-спектрометр для дистанционного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2008. Т. 3. № 1. С. 224–230.

Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 276 с.

Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 647 с.

Рублев А.Н., Успенский А.Б., Троценко А.Н. и др. Детектирование и оценка балла облачности по данным атмосферных ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 2. С. 1–9.

Успенский А.Б., Романов С.В., Троценко А.Н. Применение метода главных компонент для анализа ИК-спектров высокого разрешения, измеренных со спутников // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 3. С. 26–33.

Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н. Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18–33.

Aires F., Rossow W.B., Scott N.A. et al. Remote sensing from the infrared atmospheric sounding interferometer instrument. 1. Compression, denoising, and first-guess retrieval algorithms // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № D22.4619. doi: 10.1029/2001JD000955.

Huang H.-L., Antonelli P. Application of principal component analysis to high-resolution infrared measurement compression and retrieval // J. Clim. Appl. Meteorol. 2001. V. 40. P. 365–388.

LBLRTM. http://rtweb.aer.com/line_param_frame.html.

Liu X., Smith W.L., Zhou D.K. et al. Principal component-based radiative transfer model for hyperspectral sensors: Theoretical concept // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 201–209.

Matricardi M. The generation of RTTOV regression coefficients for IASI and AIRS using a new profile training set and a new line-by-line database // ECMWF Research Dept. Tech. Memo. 2008. V. 564. 54 p.

Matricardi M. A principal component based version of the RTTOV fast radiative transfer model // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2010. V. 136. P. 1823–1835. doi: 10.1002/gj.680.

Rodgers C.D. Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice. World Sci. Publ. Co., 2000. 238 p.

Saunders R.W., Matricardi M., Brunel P. An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1999. V. 125. P. 1407–1425.

Strow L.L., Hannon S.E., DeSouza-Mackado S. et al. An overview of the AIRS radiative transfer model // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003. V. 41. № 2. P. 303–313.

Trotsenko, A.N., Kopylov A.V., Rublev A.N. et al. Efficient forward model to simulate IASI/METOP measurements and its validation against high-resolution field observations // IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation / Eds.: Smith and Timofeyev. Hampton: A. DEEPAK Publ., 2001. P. 401–404.

Trotsenko A.N., Uspensky A.B., Kopylov A.V. et al. Modular prototype processor for geophysical parameters retrieval from IASI: pilot version // Proc. “2003 Eumetsat Meteorological Satellite Conf.”. 29 Sept.–03 Oct. 2003. Weimar, Germany. 2003. P. 110–117.

WMO. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation // World Climate Research Program. WCP-112, WMO/TD. 1986. № 24. 60 p.

Fast Radiative Transfer Model for “Meteor-M” Satellite-Based Hyperspectral IR Sounders

A. B. Uspensky¹, A. N. Rublev¹, E. V. Rusin², V. P. Pyatkin²

¹State Research Center “Planeta”, Moscow

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

The methodological and computational aspects of Fast Radiative Transfer Model (FRTM) development are under discussion. The FRTM has been developed on the base of well-known FRTM RTTOV. It provides fast and accurate modeling of spectra measured by IR Fourier-transform spectrometer IRFS-2 which is planned to be installed on board Russian meteorological satellites of “Meteor-M” series. The results of FRTM application and verification for modeling IRFS-2 data are presented. The computational performance of the FRTM is assessed. The more efficient and accurate version of FRTM is described that exploits principal component analysis. Along with this a new version of radiative transfer model has been developed that utilizes Monte-Carlo algorithm and is capable to simulate IRFS-2 data for cloudy atmosphere.

Keywords: fast radiative transfer model, IR sounder IRFS-2, remote sensing, satellite data modeling, RTTOV, optical depth, jacobian, Monte-Carlo algorithm

БОРТОВЫЕ ИНФРАКРАСНЫЕ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2013 г. Ю. М. Головин¹, Ф. С. Завелевич¹, А. Г. Никулин¹, Д. А. Козлов^{1*}, Д. О. Монахов¹,
И. А. Козлов¹, С. А. Архипов², В. А. Целиков², А. С. Романовский³

¹Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие
“Исследовательский центр им. М.В. Келдыша”, Москва

²Открытое акционерное общество “Красногорский завод им. С.А. Зверева”, Красногорск

³Научно-исследовательский институт информатики и систем управления Московского государственного
технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва

*E-mail: dima_kozlov@mail.ru

Поступила в редакцию 30.04.2013 г.

Бортовой инфракрасный (ИК) Фурье-спектрометр предназначен для измерения спектров исходящего излучения атмосферы Земли и служит для обеспечения нужд оперативной метеорологии и климатологии в части получения следующих видов информации: вертикальные профили температуры и влажности в тропосфере и нижней стратосфере, общее и высотное распределение озона, концентрации малых газовых составляющих, температура подстилающей поверхности и др. В настоящее время в ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” широко развернуты работы по созданию аппаратуры серии ИКФС для спутников на солнечно-синхронных орбитах: прибор ИКФС-2 для космического аппарата “Метеор-М” № 2 космического комплекса “Метеор-3М” (разработан и поставлен для проведения испытаний в составе КА); перспективный прибор ИКФС-3 для гидрометеорологического и океанографического космического комплекса мониторинга Земли четвертого поколения “Метеор-МП” (в стадии разработки). В статье представлены состав, функциональная схема и технические характеристики ИК-Фурье-спектрометров.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, бортовой инфракрасный Фурье-спектрометр, ИКФС-2, ИКФС-3

DOI: 10.7868/S0205961413060018

ВВЕДЕНИЕ

Исследования температуры, газового состава атмосферы и характеристик подстилающей поверхности являются одной из центральных задач изучения атмосферы для целей климатологии и метеорологии. Для формирования глобальной системы наблюдений за состоянием суши, океанов и атмосферы необходимо объединить вклад различных систем наблюдений – и локальных (наземных, самолетных, аэростатных), и спутниковых, роль которых в последнее время существенно возросла.

В настоящее время точности и вертикальное разрешение большинства спутниковых измерений метеопараметров (2 К – по температуре, 20–30% – по влажности, 2–4 км – по вертикальному разрешению) не удовлетворяют современным международным требованиям для использования их в анализе и прогнозе погоды. Добиться существенного повышения вертикального разре-

шения (до 1 км) и точности (по температуре – 1 К, влажности – 10–15%) можно путем значительного улучшения спектральной разрешающей способности ИК-зондировщиков. Поэтому в США, Европе и России широко развернуты работы по созданию бортовой спектральной аппаратуры нового поколения.

В 2006 г. был произведен запуск европейского спутника MetOp-A, в состав которого входит фурье-спектрометр IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), в 2011 г. осуществлен запуск спутника Suomi NPP, на борту которого установлен Фурье-спектрометр CrIS (Cross-track Infrared Sounder). Запуск отечественного ИК-Фурье-спектрометра (ИКФС) ИКФС-2 в составе космического аппарата (КА) “Метеор-М № 2” планируется в 2013 г. Кроме того, в настоящее время ведется разработка аппаратуры ИКФС-3 для космического комплекса “Метеор-МП”.

Таблица 1. Характеристики ИК-зондировщиков температуры/влажности для низких околоземных орбит, отвечающие требованиям 2020 г.

Спектральный диапазон, мкм	Спектральное разрешение, см ⁻¹	Число каналов	NEΔT, К	Разрешение, км	Полоса обзора, км	Тип сканирования
3.6–16	0.25–0.5	4000–8000	0.2 @ 280	4–12	>2200	“кросс-надир”

В соответствии с классификацией Системы глобального наблюдения из космоса, утвержденной Всемирной метеорологической организацией (ВМО), Фурье-спектрометры ИКФС-2 и ИКФС-3 принадлежат к классу приборов “03” – ИК-зондировщик температуры/влажности для низкой околоземной орбиты (зарубежные аналоги – приборы IASI, CrIS).

В выпущенном в январе 2010 г. документе “Space-Based Global Observing System in 2010” сформулированы требования к приборам данного класса (табл. 1). Назначением приборов является измерение спектров исходящего излучения системы “атмосфера–поверхность”.

ИНФРАКРАСНЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ИКФС-2

ИКФС-2 состоит из оптико-механического блока (ОМБ), устанавливаемого в открытом космосе на приборной платформе КА, и модуля электроники, располагаемого в гермоотсеке. ОМБ включает в себя модуль сканера, модуль интерферометра и радиационный холодильник.

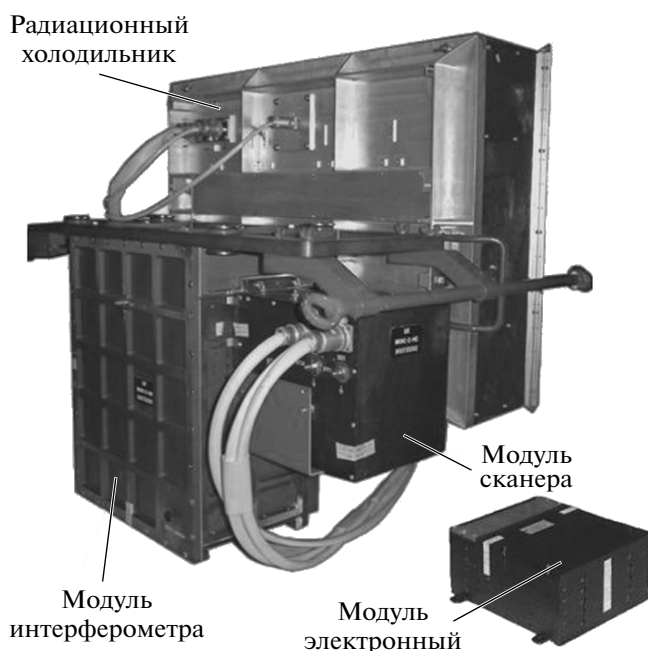


Рис. 1. Бортовой ИК-Фурье-спектрометр ИКФС-2.

Внешний вид прибора представлен на рис. 1. Технические характеристики ИКФС-2 в сравнении с приборами-аналогами представлены в табл. 2. На рис. 2 представлена функциональная схема ОМБ прибора ИКФС-2.

Модуль сканера устанавливается перед входным окном модуля интерферометра и предназначен для сканирования полосы обзора (шириной до 2500 км в режиме полного покрытия) и наведения на опорные источники излучения (бортовое черное тело и космос) при проведении калибровочных измерений. Полоса обзора и шаг пространственной сетки могут изменяться путем подачи функциональной команды с Земли. Зеркало сканера изготовлено из алюминиевого сплава, его внешняя поверхность покрыта золотом, что обеспечивает высокий коэффициент отражения по всему спектральному диапазону, а также минимизирует вносимую зеркалом сканера поляризацию. Зеркало установлено под углом 45° к оптической оси и разворачивается вокруг нее в заданном диапазоне азимутальных углов. Поворот зеркала сканера осуществляется шаговым двигателем по командам, вырабатываемым электронным модулем. Для обеспечения требования равномерности шага пространственной сетки используется редуктор.

В состав модуля сканера входит бортовой модуль калибровки (БМК), представляющий собой компактную модель абсолютно черного тела. Ввиду наличия ограничений по габаритам черное тело не может быть реализовано по традиционной полостной схеме, поэтому БМК выполняется в виде набора концентрических колец, образующих цилиндр толщиной 20 мм с кольцевыми углублениями конусообразного профиля. Расчетная степень черноты рабочей поверхности излучателя составляет не менее 0.98, при этом рабочая температура БМК – 40°С.

Модуль интерферометра (МИ) предназначен для формирования интерферограммы входного излучения, представляющей собой зависимость регистрируемого фотоприемниками сигнала от оптической разности хода. МИ представляет собой пылевлагонепроницаемую конструкцию, внутренняя полость которой при работах на Земле для устранения влаги заполнена сухим азотом. При выводе прибора за пределы атмосферы избыточное давление внутри корпуса стравливается через клапан, расположенный на боковой стенке.

Таблица 2. Технические характеристики ИК-Фурье-спектрометров для солнечно-синхронных орбит

	ИКФС-2	IASI	CrIS	ИКФС-3
Платформа/дата запуска	Метеор-М № 2, 2013 г.	MetOP, 2006 г.	NPP, 2011 г.	Метеор-МП, 2017 г.
Спектральный диапазон, см ⁻¹	667–2000	LW: 645–1210 MW: 1210–2000 SW: 2000–2760	LW: 650–1095 MW: 1210–1750 SW: 2155–2550	LW: 645–1200 MW: 1200–2000 SW: 2000–2760
Спектральное разрешение	не более 0.5	0.5 (с учетом аподизации)	LW: 0.625 MW: 1.25 SW: 2.5	LW: 0.35 MW: 0.45 SW: 0.55
Поле зрения (в надире) *	35 × 35 км ²	48 × 48 км ²	48 × 48 км ²	50 × 50 км ²
Мгновенное поле зрения (в надире), км *	35 × 35 км ²	Ø 12	Ø 14	не более 15
Полоса обзора, км шаг сетки, км	1000–2500 км 60–110 км	2200 км, ±48.2° 30 шагов, 24 км	2200 км, ±48°30' шагов, 16 км	2200 км, ±48.6° 28 шагов, 30 км
NEdT@280K **	15 мкм: 0.2 К 13 мкм: 0.065 К 6 мкм: 0.93 К	LW: 0.2–0.3 К MW: 0.2–0.5 К SW: 0.5–2.0 К	LW: 0.24–0.39 К MW: 0.19–0.28 К SW: 0.18–0.21 К	15 мкм: 0.47 К 5.7 мкм: 0.6 К 4.2 мкм: 2.9 К
Время съема интерферограмм, с	0.5	0.15	0.16	0.2
Входной зрачок, мм	Ø 50	Ø 80	Ø 80	Ø 80
Масса, кг	50	200	165	не более 210
Потребляемая мощность, Вт	50	240	123	не более 200
Информативность, Мбит/с	0.6	1.5	1.5	3.5

Примечание. * *Мгновенное поле зрения* определяется размерами одного чувствительного элемента фотоприемника (ФП), в отличие от *полного поля зрения*, определяемого также количеством и взаимным расположением чувствительных элементов. В ИКФС-2 используется одноплощадочный ФП.

** Значения *пороговой спектральной яркости NESR* [Вт/(м² · ср · см⁻¹)] для прибора ИКФС-2, соответствующие указанным значениям *пороговой разности температур NEdT*, следующие (см. рис. 6): 3×10^{-4} (15 мкм), 1×10^{-4} (13 мкм), 3×10^{-4} (6 мкм). Значения NESR, как и NEdT, характеризуют уровень *радиометрического шума* в спектрах, т.е. случайную составляющую погрешности определения спектральной яркости объекта.

МИ построен по схеме Майкельсона с уголковыми отражателями (УО) вместо плоских зеркал. Использование УО значительно облегчает требования, предъявляемые к точности перемещения зеркал, и, кроме того, позволяет применить механизм сканирования по разности хода “двойной маятник”. В данной схеме одновременный поворот двух УО учетверяет значение достигаемой разности хода (относительно механического смещения). Светоделитель и компенсатор выполнены из селенида цинка, который в отличие от бромида калия не является гигроскопичным.

Для формирования опросных импульсов, по которым производится привязка интерферограммы к шкале разности хода (соответственно получаемых спектров к шкале волновых чисел), а также для управления и стабилизации скорости изменения разности хода между ветвями интерферометра используется референтный канал. Излучение лазера референтного канала вводится в интерферометр через оптическое волокно и коллиматор, но в отли-

чие от излучения измерительного канала излучение лазера проходит в краевых зонах светоделительной и компенсаторной пластин. Для этого на два сегмента светоделителя нанесено светоделительное диэлектрическое покрытие для спектрального диапазона (0.61–1.31) мкм, обеспечивающее не только работу референтного канала, но и визуальный контроль при сборке и юстировке интерферометра.

Трехлинзовый объектив с фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1 : 1 фокусирует излучение на фотоприемник, расположенный в радиационном холодильнике.

Радиационный холодильник, построенный по двухступенчатой схеме, предназначен для обеспечения температурного режима фотоприемного устройства при эксплуатации прибора на орбите. В качестве приемника ИК-излучения применяется фотоспротивление из материала HgCdTe (КРТ, кадмий-ртуть-теллур). Фотоприемное устройство

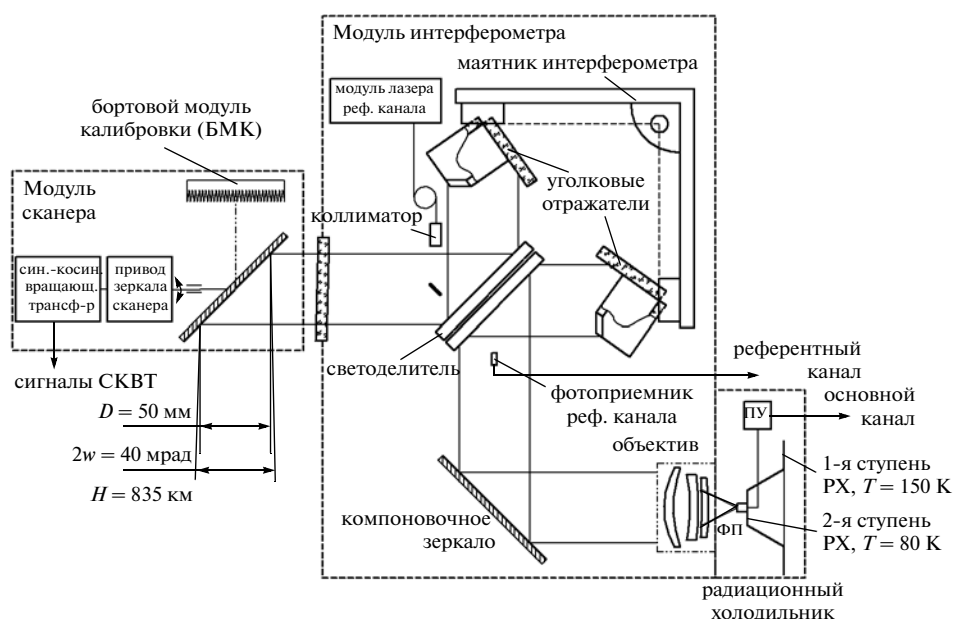


Рис. 2. Функциональная схема опто-механического блока прибора ИКФС-2.

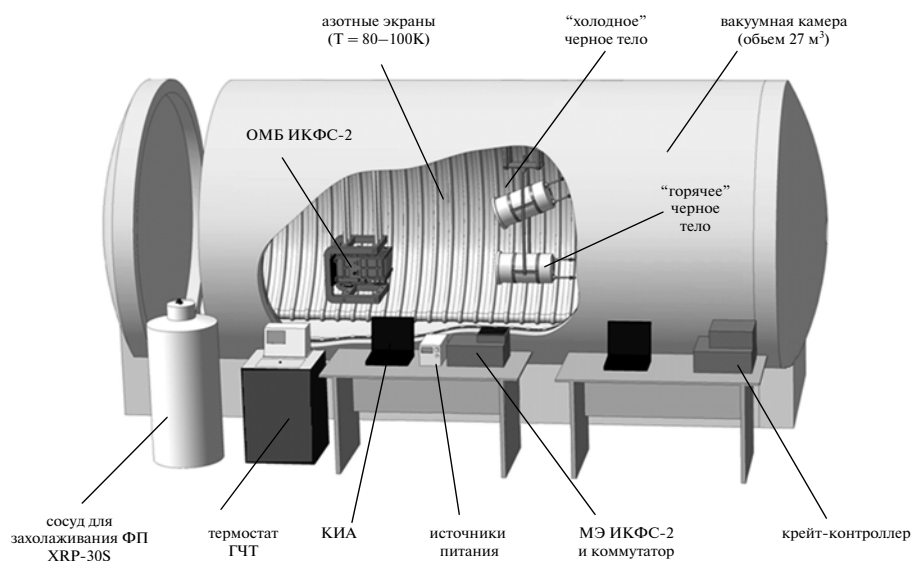


Рис. 3. Стенд для проведения радиометрической калибровки ИКФС-2.

состоит из двух блоков: фотоприемника и предусилителя, соединенных экранированным кабелем, что позволяет охлаждать фотоприемник до криогенных температур (80 К), при этом предварительный усилитель находится при нормальной (примерно +20°C) температуре.

Модуль электроники (МЭ) предназначен для управления работой прибора, предварительной обработки получаемых прибором данных и формирования пакетов научной и служебной информации. МЭ состоит из блока вторичных ис-

точников питания, блока управления двигателями сканера и маятника, блока предварительной обработки и управления, блока управления системой терморегулирования и блока функциональных команд, принимаемых с Земли.

Наземная калибровка прибора ИКФС-2 была проведена на стенде тепловакуумных испытаний ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” (Завелевич, 2009; Десятов, 2010). ОМБ прибора устанавливался в подвесе внутри вакуумной камеры (рис. 3). Напротив, также в подвесе, были установлены рабо-

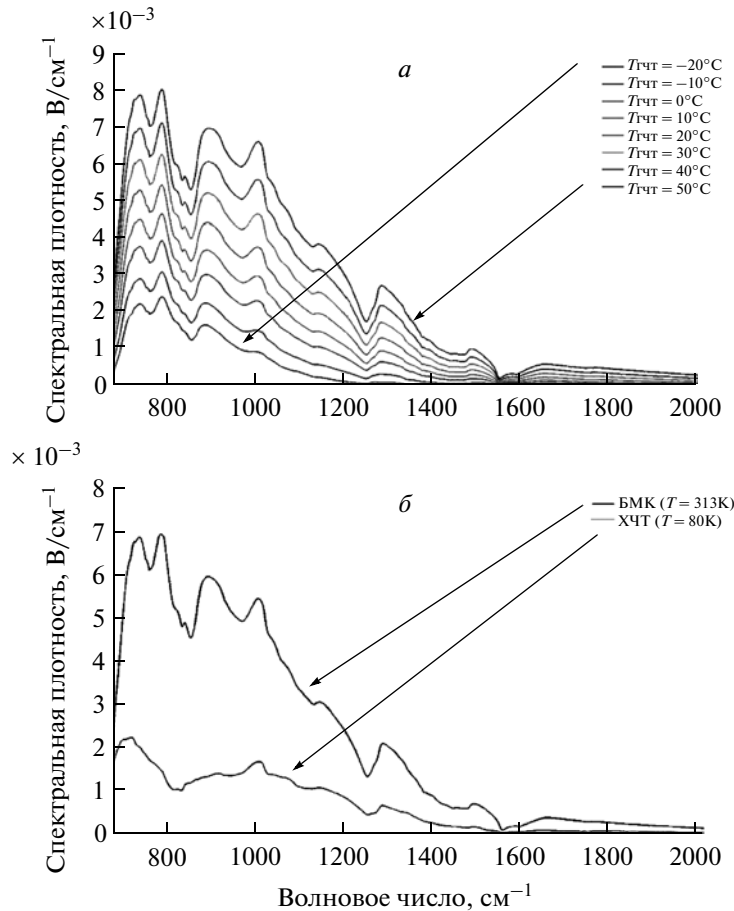


Рис. 4. Графики модулей регистрируемых комплексных спектров: *а* – рабочая модель АЧТ при различных температурах; *б* – опорные черные тела (БМК и ХЧТ).

чие модели “горячего” (ГЧТ) и “холодного” (ХЧТ) черных тел. С помощью термостата, использующего в качестве теплоносителя тосол, точно задавалась температура ГЧТ в диапазоне 250–325 К. Захолаживание фотоприемника осуществлялось с помощью криостата жидким азотом по проточной схеме. Кроме того, ОМБ прибора монтировался в блок нагревательных панелей для возможности изменения его температуры (на рис. 3 нагревательные панели не показаны). Давление в вакуумной камере поддерживалось на уровне 10^{-4} мм рт. ст., температура азотных экранов – (80–100) К.

Цикл измерений включал в себя последовательную запись интерферограмм рабочей модели абсолютно черного тела (АЧТ), бортового модуля калибровки (БМК) и “холодного” черного тела (ХЧТ), имитирующего наблюдение космоса, при различных температурах АЧТ в диапазоне от 253 до 323 К с шагом 10 К. Кроме того, такие циклы были проведены при различных температурах прибора ($T_{\text{приб}} = 15, 20$ и 23°C), предусмотренных для эксплуатации на орбите. На рис. 4а приведены изме-

ренные спектры эталонного черного тела, снятые при температуре прибора 20°C , а на рис. 4б – спектры опорных источников (БМК и ХЧТ). Следует отметить, что вследствие асимметричности измеряемых интерферограмм относительно положения нулевой разности хода спектры, получаемые в результате Фурье-преобразования, являются комплексными. Поэтому на графиках рис. 4 представлены амплитудные спектры, полученные взятием модуля комплексной функции.

После применения процедуры коррекции нелинейности фотоприемника и учета спектральной излучательной способности бортового черного тела остаточная погрешность радиометрической калибровки (т.е. систематическая составляющая погрешности определения спектральной яркости объекта) составила не более 0.5 К для всего измеряемого диапазона температур объекта (250–323) К (рис. 5).

На рис. 6 представлены измеренные результаты пороговой спектральной яркости летного образца ИКФС-2. Видно, что вблизи 6.4 мкм имеет место значительное ухудшение пороговой характеристики, обусловленное сильным поглощением

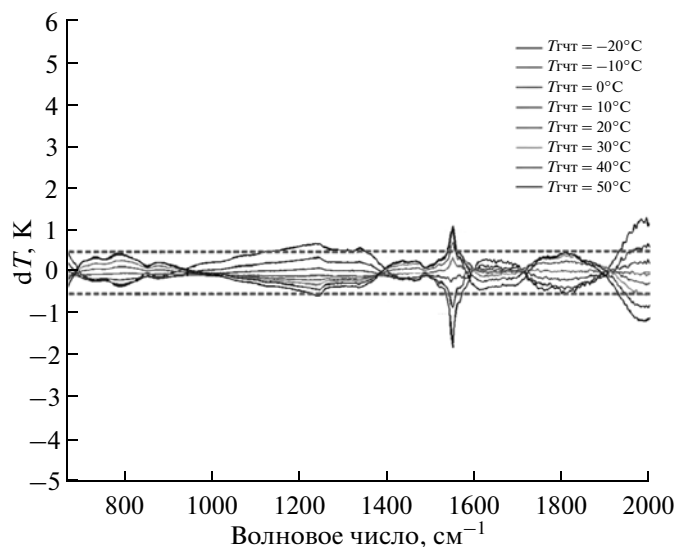


Рис. 5. Остаточная погрешность определения спектральной яркости объекта.

ем в просветляющих покрытиях. Применяемые многослойные покрытия в качестве материала с низким показателем преломления используют фториды, при нанесении которых не удается полностью обеспечить отсутствие влаги. В связи с этим использование спектральных каналов вблизи 6.4 мкм становится ограниченным.

Аппаратная функция Фурье-спектрометра определяется как спектральный отклик прибора на входное монохроматическое излучение. В качестве источника излучения используются CO₂-лазер (линия вблизи 10.3 мкм) и HeNe-лазер (линия вблизи 5.4 мкм). На рис. 7 представлены результаты измерения аппаратной функции для летного образца прибора на двух длинах волн. Анализируя результаты измерения, обратим внимание на следующее:

– ширина аппаратной функции по уровню 0.5: 0.39 см⁻¹ – для CO₂-лазера и 0.47 см⁻¹ – для HeNe-лазера;

– сдвиг положения максимума линии в сторону меньших волновых чисел: 0.119 см⁻¹ – для линии CO₂-лазера и 0.184 см⁻¹ – для линии HeNe-лазера;

– форма линии спектрального отклика асимметрична относительно положения максимума (следствие протяженного источника излучения);

– спектральный отклик имеет незначительную мнимую составляющую (следствие несимметричности огибающей и фазы ИФГ относительно положения нулевой разности хода).

Можно выделить следующие факторы, определяющие форму аппаратной функции Фурье-спектрометра:

1) ограничение диапазона изменения разности хода;

2) угловая чувствительность (весовая функция по отношению к предметным углам); включает в себя размеры и форму чувствительной площадки, распределение чувствительности по площадке фотоприемника, дефокусировку фотоприемника (продольную и поперечную), виньетирование в оптической системе, aberrации оптической системы;

3) остаточная разъюстировка интерферометра (зависимость взаимного бокового сдвига вершин уголкового отражателей от разности хода);

4) нестабильность скорости изменения оптической разности хода.

Первый фактор – ограничение диапазона изменения разности хода – приводит к “sinc”-образной форме аппаратной функции с шириной 1.21/2L, где L – максимальная оптическая разность хода в интерферометре. Вторым фактор – угловая чувствительность – является комплекс-

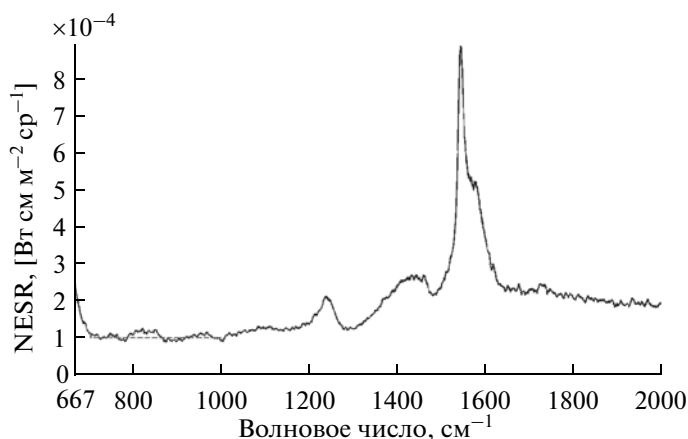


Рис. 6. Пороговая спектральная плотность яркости.

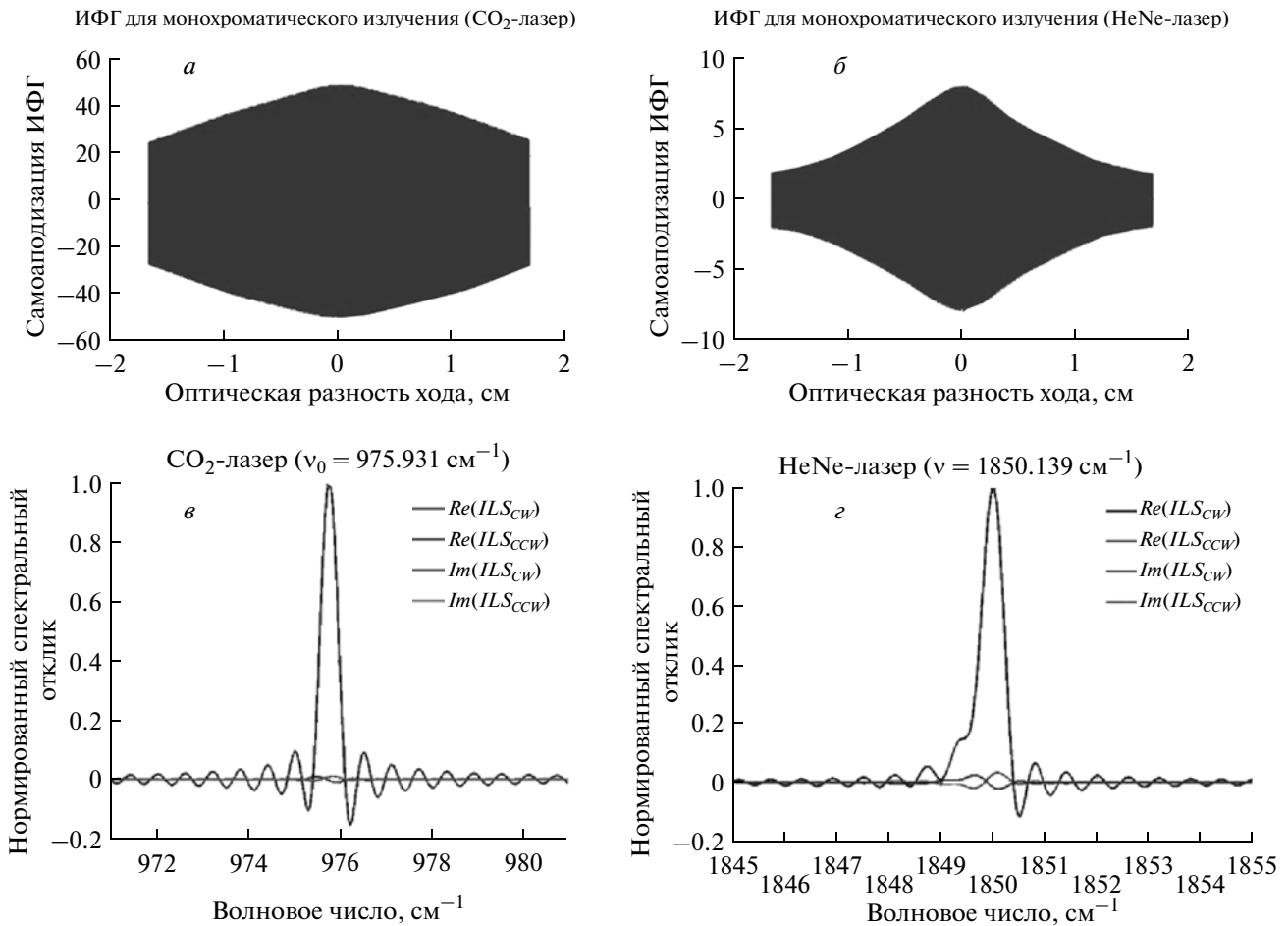


Рис. 7. Результаты измерения спектрального отклика для CO_2 и He-Ne лазеров: a, b – огибающая интерферограммы; v, z – аппаратная функция.

ным, однако может быть непосредственно измерен (см. рис. 9). Влияние четвертого фактора – нестабильности скорости изменения оптической разности хода – при малых флуктуациях скорости и согласованности задержек основного и референтного каналов является пренебрежимо малым. Поэтому процесс моделирования представляет собой определение траектории взаимного перемещения вершин уголкового отражателя, при этом можно показать, что для механизма изменения разности хода типа “двойной маятник” допустимо линейное приближение. Следует отметить, что определение данной траектории экспериментальным путем возможно только при использовании многоплощадного фотоприемника (Henault, 2009).

Результаты моделирования аппаратной функции представлены на рис. 8. Следует подчеркнуть, что благодаря полученной модели форма аппаратной функции известна во всем рабочем спектральном диапазоне, что необходимо для проведения последующей тематической обработки измеряемых спектров атмосферы. В частности, на рис. 8

внизу показана расчетная форма аппаратной функции для границ рабочего спектрального диапазона 5 и 15 мкм.

Измерение угловой чувствительности прибора проводилось при перемещении точечного источника с температурой $T = 1000$ К по двум координатам в предметной плоскости на расстоянии 10 м. Результаты измерений представлены на рис. 9. Угол, соответствующий половине чувствительности в максимуме, равен 30 мрад, что соответствует величине пиксела в надире 25 км.

Для демонстрации точностных характеристик прибора было проведено сопоставление измеренных спектров нисходящего излучения атмосферы с результатами численного моделирования. Расчет проводился методом “line-by-line” с использованием данных радиозондирования полей температуры и влажности вблизи района измерений, при этом профиль озона был выбран стандартным. Измерения проводились с 15:00 до 18:00 27 апреля 2011 г. В качестве калибровочных источников использовались бортовой модуль ка-

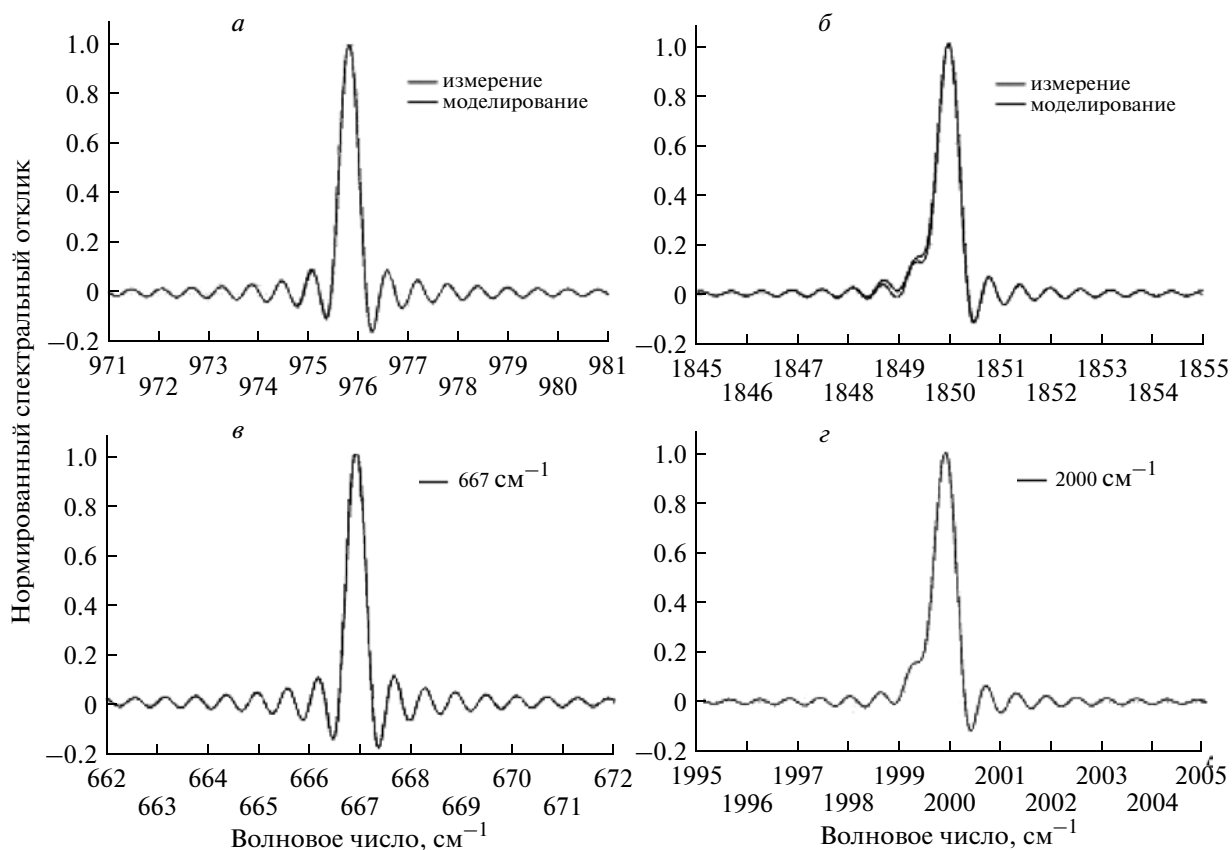


Рис. 8. Моделирование аппаратной функции ИКФС-2.

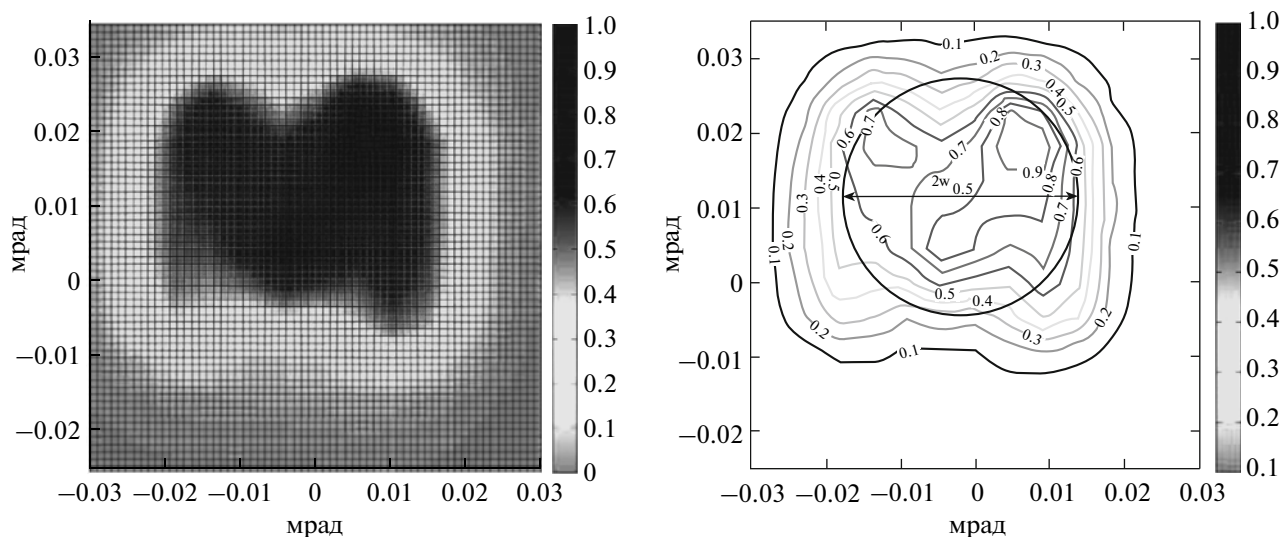


Рис. 9. Измеренное распределение угловой чувствительности ИКФС-2.

либровки при температуре 40°C и рабочая модель АЧТ при $T = 10^{\circ}\text{C}$. При калибровке учитывалось излучение и поглощение паров воды и CO_2 , содержащихся на трассе “источник излучения—входное окно прибора”. На рис. 10 представлены

результаты сравнения измеренного и моделируемого спектров в различных областях рабочего спектрального диапазона. На рис. 10а видно хорошее совпадение измеренных и рассчитанных спектров атмосферы вблизи центра полосы по-

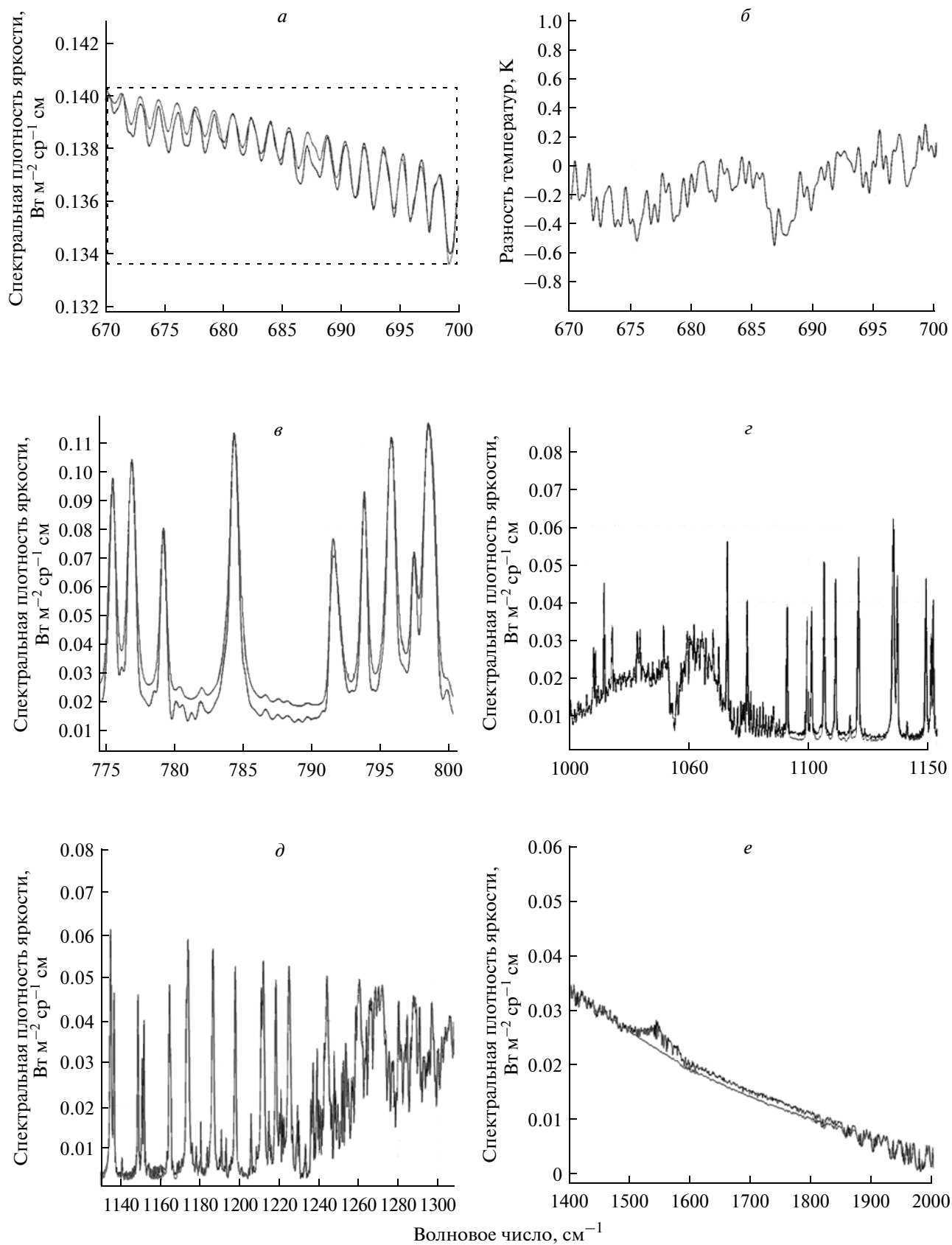


Рис. 10. Сопоставление измеренных и моделируемых спектров атмосферы.

поглощения CO_2 (667 см^{-1}). Различие яркостных температур в этой области составляет не более 0.5 К (рис. 10б). Удовлетворительное совпадение также имеет место в области полосы поглощения озона $1000\text{--}1050 \text{ см}^{-1}$ (рис. 10в). В то же время наблюдается различие сплошной составляющей в областях $750\text{--}1000 \text{ см}^{-1}$ и $1600\text{--}1850 \text{ см}^{-1}$ (рис. 10г, е). Одной из причин различия наблюдаемого и рассчитанного спектров является отсутствие данных радиозондирования непосредственно в месте проведения измерений.

ИНФРАКРАСНЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР ИКФС-3

В табл. 2 представлены технические характеристики бортовых Фурье-спектрометров ИКФС-2 и ИКФС-3, а также зарубежных аналогов CrIS и IASI (Glumb, Crain, 2003; Simeoni et al., 2004). Видно, что требования к разрабатываемому Фурье-спектрометру ИКФС-3 соответствуют уровню зарубежных аналогов. Рассмотрим подробнее усовершенствования аппаратуры ИКФС-3.

Спектральные характеристики

Выбор рабочего спектрального диапазона определяется исходя из назначения прибора и круга решаемых им задач. Следует отметить, что в ИКФС-3 по сравнению с прибором ИКФС-2 диапазон расширен как в коротковолновую ($3.6\text{--}5.0 \text{ мкм}$), так и в длинноволновую область (до 15.5 мкм). Таким образом, спектры ИКФС-3 включают полосы CO_2 на 4.3 и 15.5 мкм , играющие важную роль для температурного зондирования.

Ввиду отсутствия фотоприемника, обеспечивающего требуемые величины удельной обнаружительной способности во всем спектральном диапазоне, рабочий диапазон разбивается на три поддиапазона (LW, MW и SW), каждому из которых соответствует свой тип фотоприемника.

Спектральное разрешение ИКФС-3 по сравнению с ИКФС-2 также несколько улучшается, что является следствием увеличения диапазона изменения оптической разности хода с ± 1.7 до $\pm 2 \text{ см}$.

Спектральная точность прибора характеризуется точностью привязки измеряемых спектров к шкале волновых чисел и точностью знания формы аппаратной функции прибора. При этом абсолютная погрешность привязки для приборов данного класса, как правило, составляет 1% от спектрального разрешения, а погрешность формы аппаратной функции — не более $5\text{--}10\%$ (без учета аподизации).

Для привязки спектров к шкале волновых чисел необходимо точное знание длины волны лазера референтного канала, служащего для оцифровки интерферограмм с фиксированным шагом

по разности хода. В качестве источника излучения в референтном канале ИКФС-3 предполагается использовать полупроводниковый лазер на 1.55 мкм со стабилизацией температуры и длины волны. При этом термостабилизация осуществляется с помощью элемента Пельтье, а стабилизация длины волны лазера (на линии молекулярного поглощения газа) — с помощью кюветы, заполненной ацетиленом.

Измерение аппаратной функции проводится в ходе наземной калибровки для каждого спектрального поддиапазона в отдельности. В качестве источников излучения используются CO_2 -лазер (линия вблизи 10.3 мкм), HeNe-лазеры (линии вблизи 5.4 и 3.5 мкм). Далее на основании проведенных измерений составляется модель, позволяющая характеризовать аппаратную функцию во всем рабочем спектральном диапазоне. Стабильность формы аппаратной функции при штатной эксплуатации обеспечивается сохранностью юстировки прибора при поддержании заданного теплового режима.

Пространственные характеристики

Важным усовершенствованием аппаратуры ИКФС-3 по сравнению с прибором ИКФС-2 является уменьшение мгновенного поля зрения с 35 км до $10\text{--}15 \text{ км}$. Кроме того, требования по покрытию, определяющие ширину полосы обзора (2200 км) и шаг пространственной сетки (не более 30 км), приводят к необходимости использования многоплощадочных (пятиэлементных) фотоприемных устройств и уменьшения времени съема интерферограммы (0.2 с). Таким образом, полоса обзора ИКФС-3 состоит из 28 сканов и составляет $\pm 48.6^\circ$ с шагом 3.6° , а время сканирования полосы обзора не превышает 9 с , обеспечивая практически равномерную сетку как в поперечном направлении, так и в направлении полета спутника.

Также следует отметить наличие устройства компенсации, корректирующее смещение визирной оси вследствие движения КА при регистрации интерферограммы путем небольшого поворота зеркала сканера вокруг оси, перпендикулярной плоскости орбиты КА.

Радиометрические характеристики

Уменьшение мгновенного поля зрения и времени съема интерферограммы значительно усложняет выполнение требований по радиометрическому шуму в спектрах, заданному в терминах пороговой разности температур NEdT. Для выполнения данных требований апертуру прибора потребовалось увеличить с 50 до 80 мм .

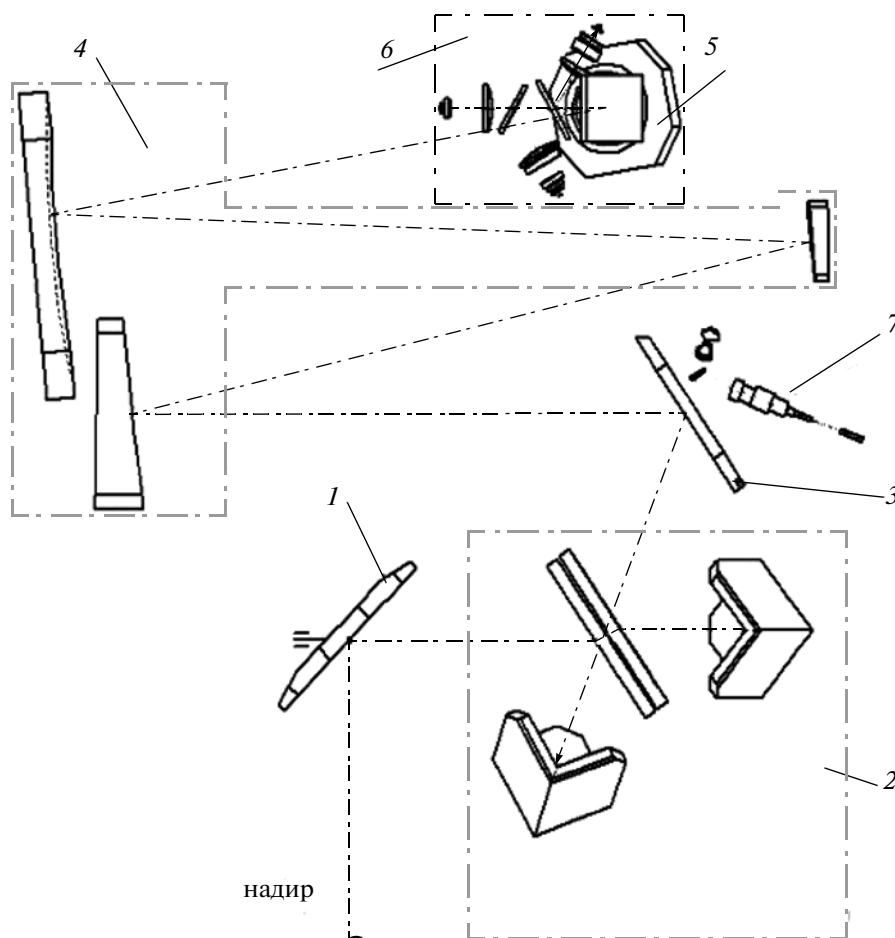


Рис. 11. Принципиальная оптическая схема ИКФС-3: 1 – зеркало сканера; 2 – блок интерферометра; 3 – зеркало компоновочное; 4 – телескоп; 5 – зеркало компоновочное; 6 – блок холодный; 7 – референтный канал.

Для радиометрической калибровки измеряемых спектров атмосферы Земли необходимо проведение измерений двух опорных источников: БЧТ и космоса. При этом циклограммой работы прибора на орбите предусматривается проведение калибровочных измерений после завершения сканирования каждой полосы обзора.

Массогабаритные характеристики и энергопотребление

Увеличение массогабаритных характеристик прибора обусловлено в первую очередь более сложной оптической схемой с необходимостью спектрального разделения на три поддиапазона, а также увеличившейся апертурой прибора.

В связи со значительным увеличением объема с передаваемой с борта информацией в ИКФС-3 предусматривается передача на Землю калиброванных спектров атмосферы (в ИКФС-2 передаются интерферограммы). Таким образом, первич-

ная обработка регистрируемых данных осуществляется на борту.

Прибор ИКФС-3 представляет собой единый моноблок. В состав Фурье-спектрометра входят блок сканера, блок интерферометра, телескоп, блок холодный, радиационный холодильник и блок электроники. Принципиальная оптическая схема прибора ИКФС-3 представлена на рис. 11.

Привод сканирующего устройства ИКФС-3 обеспечивает вращение зеркала сканера по двум взаимно перпендикулярным осям. Вращение вокруг оси X предназначено для сканирования полосы обзора и наведения на калибровочные источники. Вращение вокруг оси Y необходимо для компенсации смещения визирной оси, обусловленного движением КА по орбите, и осуществляется с помощью пьезоактуатора. В сканирующем устройстве реализована система бесконтактного питания и управления пьезоактуатором, построенная на вращающемся трансформаторе с ферритовыми сердечниками.

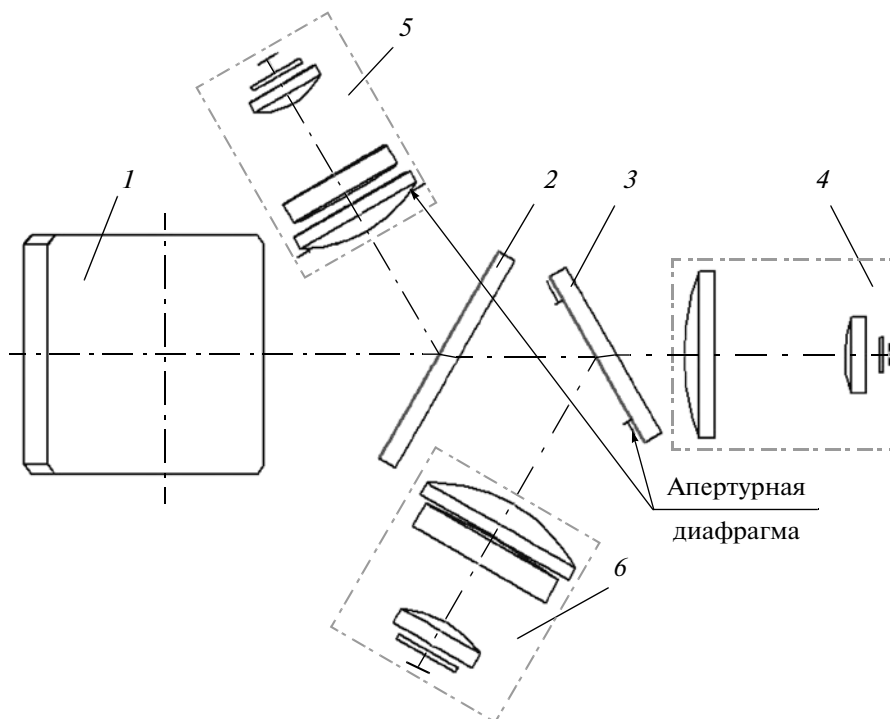


Рис. 12. Схема холодного блока ИКФС-3.

Как и в приборе ИКФС-2, в ИКФС-3 интерферометр построен по схеме “двойной маятник” с угловыми отражателями. Однако следует отметить, что для ИКФС-3 число циклов движения маятника за время работы на орбите (7 лет) при времени одного цикла 250 мс составляет примерно 1×10^9 , что значительно превышает число циклов маятника ИКФС-2. И если в ИКФС-2 ось маятника установлена на прецизионных радиально-упорных подшипниках, то в узле интерферометра ИКФС-3 используются торсионные опоры, характеризующиеся отсутствием трения, смазки и, как следствие, имеющие практически неограниченный ресурс работы при небольших угловых перемещениях (3° – 5°). В качестве привода маятника используется линейный двигатель.

Внеосевой афокальный телескоп располагается в приборе после интерферометра и предназначен для уменьшения габаритов блока холодного. Кроме этого, оптическая система телескопа осуществляет согласование положения зрачков и проецирует (в обратном ходе лучей) изображение апертурной диафрагмы, расположенной в холодном блоке (БХ), в плоскость УО. Благодаря этому удается минимизировать световые зоны как на самих УО, так и на светоделителе и зеркале сканера. Оптическая схема телескопа представляет собой трехзеркальный анастигмат, при этом все три зеркала имеют асферические поверхности.

БХ предназначен для регистрации ИК-излучения в трех спектральных поддиапазонах. На рис. 12 представлена оптическая схема БХ, которая содержит входное окно, поворотное зеркало (поз. 1), две дихроичные пластины (поз. 2, 3), апертурные диафрагмы, три линзовых объектива (поз. 4, 5, 6) и три пятиэлементных фотоприемника на разные спектральные поддиапазоны. В качестве фотоприемников коротковолнового и средневолнового диапазонов используются КРТ-фотодиоды, а для диапазона 8.3–15.5 мкм – КРТ-фоторезисторы.

Обеспечение рабочей температуры БХ (80–82 К) осуществляется радиационным холодильником. Таким образом, захлаждаются не только фотоприемные устройства, но и линзовая оптика, что необходимо с целью снижения фоновой засветки фотоприемника и уменьшения фотонного шума. БХ обеспечивает герметичную внутреннюю полость, заполняемую инертным газом, и имеет в своем составе клапаны подачи и сброса давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены экспериментально подтвержденные технические характеристики первого в России спутникового Фурье-спектрометра ИКФС-2, прошедшего полный цикл наземной отработки, предназначенный для температурно-влажностного зондирования атмосферы с борта КА “Метеор-М” № 2. Разрабатываемый в насто-

ящее время прибор ИКФС-3, предназначенный для космического комплекса четвертого поколения “Метеор-МП”, по своим характеристикам не уступает зарубежным аналогам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Десятков А.В. и др. Технологический образец бортового инфракрасного Фурье-спектрометра ИКФС-2 для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 1. С. 259–267.

Десятков А.В., Головин Ю.М., Завелевич Ф.С. и др. Калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 241–248.

Henault F., Hebert P.-J., Lecchini C., Miras D. Geometrical misalignment retrieval of the IASI interferometer // Proc. of SPIE. V. 3870. 1999. P. 159.

Glumb R., Crain D. Radiometric, spectral and ILS uncertainty of the Cross-track Infrared Sounder // ITT industries. Aerospace/Communications Division. Sep. 2003.

Simeoni D. et al. Design and development of IASI instrument // Proc of SPIE. 2004. V. 5543. P. 196–207.

Space-Borne Infrared Fourier-Transform Spectrometers for Temperature/Humidity Sounding of Earth’s Atmosphere

Yu. M. Golovin¹, F. S. Zavelevich¹, A. G. Nikulin¹, D. A. Kozlov¹, D. O. Monahov¹, I. A. Kozlov¹, S. A. Arhipov², V. A. Tselikov², A. S. Romanovsky³

¹*State Scientific Centre of Russian Federation – Federal State Unitary Enterprise Keldysh Research Centre, Moscow*

²*JSC “Krasnogorsky Zavod”, Krasnogorsk*

³*Research Institute of Informatics and Control Systems (attached to MSTU named after Bauman), Moscow*

Space-borne Fourier-transform infrared spectrometer (FTIR) collects upwelling infrared radiance data and provides very accurate data about the atmosphere, land and oceans for applications to weather predictions and climate studies. FTIR measurements allow deriving temperature and humidity profiles at troposphere with high vertical resolution, distribution of ozone and trace gases and surface temperature. At present Keldysh Research Centre is developing FTIR spectrometers IKFS for space system at Low-Earth orbit. The IKFS-2 instrument belongs to the payload of the satellite “Meteor-M2”. The IKFS-3 instrument belongs to the payload of the hydrometeorological and oceanographic Earth-observing space system “Meteor-MP”. The paper presents the functional description and specifications of the IKFS FTIR spectrometers.

Keywords: Earth remote sensing, space-borne infrared Fourier-transform spectrometer, IKFS-2, IKFS-3

КАЛИБРОВКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ АВИАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ПО СОПУТСТВУЮЩИМ НАЗЕМНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ЭТАЛОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАБЛЮДАЕМЫХ СЦЕН

© 2013 г. В. Н. Остриков, О. В. Плахотников*

Санкт-Петербургский филиал ОАО “Концерн “Вега”

*E-mail: oleg-vl@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.04.2013 г.

На значительном экспериментальном материале рассмотрены возможности реализации калибрующего пересчета исходных данных гиперспектральной авиационной съемки в коэффициенты спектральной яркости. Оцениваются ошибки внешней калибровки для разных условий наблюдений и различной аппаратуры получения данных.

Ключевые слова: внешняя калибровка, гиперспектральная съемка

DOI: 10.7868/S0205961413060067

ВВЕДЕНИЕ

Успешность тематической обработки данных гиперспектральной съемки (ГСС) в значительной степени зависит от качества реализации внешней калибровки, результатом которой является пересчет получаемых “кубов” в распределения коэффициентов спектральной яркости (КСЯ). Для этого преобразования в большинстве случаев используются методы атмосферной коррекции с определением обратной передаточной функции трассы “разрешаемый элемент поверхности-регистрирующий прибор”. Такие методы пересчета требуют в свою очередь периодического контроля реализуемой точности на основе специальных эталонов с проведением сопутствующих (синхронно или квазисинхронно с дистанционной съемкой) наземных измерений. Кроме того, для получения широкого набора характеристик различных поверхностей и объектов наблюдения, создания баз спектральных характеристик для решения задачи идентификации такие совместные измерения используются для непосредственного пересчета получаемых данных в КСЯ.

Реализация пересчета данных — обычно это отсчеты прибора в единицах спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) — даже с привлечением внешних эталонных поверхностей, контролируемых в синхронном или разнесенном по времени режиме наземных измерений, процедура не вполне однозначная. Главной причиной этого является влияние приземного (для авиационных данных) слоя атмосферы или всего

атмосферного столба (для данных космической съемки).

ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью получения экспериментальных данных и отработки методов внешней калибровки в Санкт-Петербургском филиале ОАО “Концерн “Вега” совместно с другими организациями для трех сезонов (весна, лето, осень) в течение 2011–2012 гг. было проведено несколько экспедиций на Северо-Западе по урбанизированной местности и угодьям с.-х. назначения (опытные поля Агрофизического научно-исследовательского института (ГНУ АФИ) Россельхозакадемии). В результате был получен большой набор данных ГСС (спектральных “кубов”) диапазона 0.4–1.0 мкм различной авиационной аппаратурой (трех типов, отличающихся пространственным разрешением 0.3–2 м), в различных условиях съемки (включая сплошную облачность), для различных высот (от 500 м до 3.6 км). Каждая экспедиция включала в себя проведение сопутствующих (или отсроченных) наземных измерений тестовых поверхностей искусственного (по специально расстилаемым эталонам) или естественного типа (асфальт, участки травяного покрова, злаковые культуры). Для наземных измерений использовался полевой спектрометр Field Spec (спектральное разрешение 3.5 нм, диапазон от 0.325 до 1.075 мкм) с набором аттестованных эталонных мир и различ-

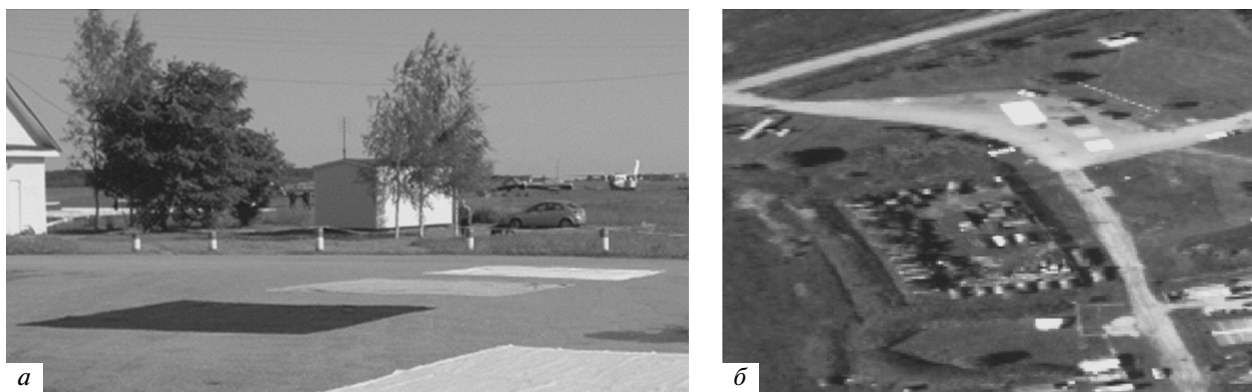


Рис. 1. *а* – Расположение тестовых мир на асфальте; *б* – фрагмент авиационной гиперспектральной съемки (синтезированный цветной кадр).

ными оптическими насадками. В ходе получения наземных данных регистрировались как собственно спектральные ходы СПЭЯ по измеряемым элементам сцен, так и их пересчитанные значения КСЯ значения. Полетные задания пилотам носителей аппаратуры формировались таким образом, что тестовые поверхности попадали в поле зрения аппаратуры почти при каждом вылете, что позволяло в большинстве случаев получать практически синхронно измеренные данные по тестовым поверхностям авиационным и наземным путем.

Внешняя калибровка спектральных кубов была реализована в соответствии с выражением

$$\tilde{\rho}_{ij} = \rho_K(L_{ij} - L_0)/(L_K - L_0), \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, I; \quad j = 1, \dots, J,$$

где $\tilde{\rho}_{ij}$ – вычисляемая оценка КСЯ текущего ij пиксела снимка; L_{ij} – СПЭЯ текущего ij пиксела снимка; L_K – СПЭЯ калибрующего эталона, полученное по снимку; L_0 – СПЭЯ смещения; ρ_K – КСЯ калибрующего эталона, измеренное ручным спектро радиометром; I, J – размеры спектральных образов “куба” в пикселах.

Для расчетов на основе выражения (1) неопределенным является величина СПЭЯ смещения L_0 , обусловленная влиянием атмосферного слоя, или, более точно, многократным рассеянием в этом слое. Определение этой величины представляется наиболее сложным вопросом решения задачи внешней калибровки данных, в большинстве случаев оно реализуется через поиск на участке наблюдаемой сцены пиксела, для которого априорно известно, что его КСЯ с достаточной степенью вероятности можно считать равным нулю (Шовенгердт, 2010). Однако как показала

практика, найти такой элемент на сцене оказывается практически невозможно. В силу этого обстоятельства возникла необходимость применить более подходящий метод оценки СПЭЯ смещения. В частности, для большинства случаев хорошей оказалась для оценки L_0 минимальная величина сигнала на каждой линии спектра, найденная по всем элементам зарегистрированного куба

$$L_0(\lambda) = \min \{L_{ij}(\lambda)\}. \quad (2)$$

Однако и такой подход не всегда был удачным, поэтому в отдельных случаях для расчета смещения принималось и другое значение, которое определялось как часть среднего спектрального сигнала на сцене

$$L_0(\lambda) = K_L \bar{L}_{ij}(\lambda). \quad (3)$$

Здесь значение коэффициента K_L , обычно лежащее в диапазоне от 0.1 до 0.25, выбиралось таким образом, чтобы вычисляемое значение КСЯ по дополнительным тестовым поверхностям (не участвующим в собственно калибровке) принимало наиболее близкое значение к измеренной характеристике наземным прибором (после приведения спектров авиационного и наземного приборов).

В соответствии с рис. 1, в ходе полетной экспедиции над территорией аэродрома “Никольское” (Гатчинский р-он Ленинградской обл.), на плоской асфальтовой площадке были расстелены четыре тестовые мира: эталонная мира (большая белая) и три дополнительные – “темная”, “серая” и “светлая”. Все тестовые поверхности измерялись ручным спектро радиометром перед авиационной съемкой и в ходе полета. Поскольку угол зрения наземного прибора не соответствует разрешению авиационного прибора, эталонные поверхности промерялись в 10–15 точках по полю тестовых поверхностей с разрешением около 0.3 м.

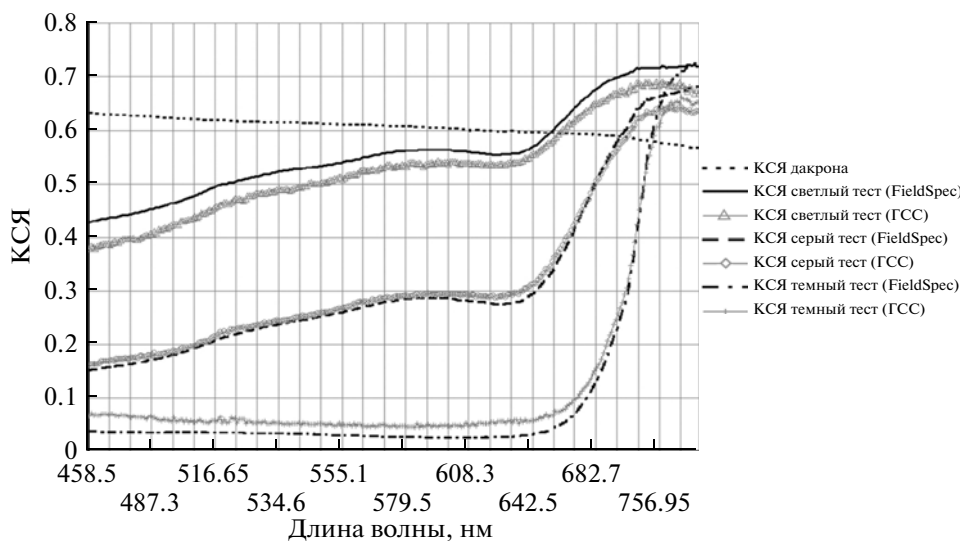


Рис. 2. КСЯ тестовых эталонов, измеренных наземным спектрометром FieldSpec, и пересчитанных в ходе калибровки данных ГСС.

Собственно калибровка полученного кадра проводилась по большому белому эталону в соответствии с выражением (1), а контроль правильности выбора смещения — по дополнительным тестовым мирам. На рис. 2 приведены КСЯ тестовых эталонов, измеренных наземным спектрометром Field Spec, и пересчитанных в ходе калибровки данных ГСС. Здесь же приведен спектральный ход калибрующего белого эталона (КСЯ дакрона), который, естественно, полностью совпадает с измеренным наземным прибором.

Приведенные данные показывают, что в указанном случае использование в качестве смещения $L_0(\lambda)$ величины, определяемой выражением (2), позволяет особенно точно воспроизвести серый тестовый эталон, в то же время КСЯ светлого и темного воспроизводятся с некоторыми ошибками. Минимальные ошибки (в пределах границ 6% от номинала) соответствуют серому тестовому образцу. Максимальные ошибки — темному образцу (относительная среднеквадратическая ошибка — около 20%). Этот факт подтверждает известные (Шовенгердт, 2010) трудности калибровки по темным эталонам и требует применения эталона, по возможности, с равномерной характеристикой КСЯ значительной величины, как это имеет место в данном случае (рис. 2 — “КСЯ дакрона”). Следует отметить особо, что в силу практической необходимости в ходе получения данных носитель аппаратуры летал с углом атаки около 10 град, что потребовало в свою очередь учета этого обстоятельства в ходе корректировки данных наземных измерений в пересчете на условия воздушной съемки. Как показали исследования этого вопроса, наличие индикатрис у дополнительных этало-

нов вносит существенные ошибки (до 15–25% в зависимости от высоты Солнца), что приводит в свою очередь к необходимости проведения специальных измерений и получения модельных аппроксимаций этих индикатрис.

По данным, описанным выше и полученным по одной сцене, калибровались результаты съемки, полученные по другой сцене в тот же день. В качестве примера на рис. 3 приведены снимки участка овсяного поля, по которому были получены данные авиационной гиперспектральной съемки. А на рис. 4 приведены спектральные ходы результатов калибровки данных ГСС (рис. 3б) и наземных измерений полевым спектрометром FieldSpec.

Спектральные ходы калибровки, в сравнении с данными наземных измерений по этому участку, показывают очень хорошее качество калибрующего пересчета данных. Здесь результаты съемки по овсу весьма точно совпадают с наземными измерениями.

Аналогичные приведенным результатам данные по калибровке снимков, полученных при сплошной облачности с высоты 500 м (с вертолетного носителя). Здесь калибровка проводилась с учетом расчета смещения на основе выражения (3). Сравнение с наземными измерениями показало очень хорошее качество калибровки — со среднеквадратической ошибкой около 8% по совокупности нескольких тестовых образцов искусственных поверхностей (асфальта, окрашенного белой краской асфальта — разметки взлетно-посадочной полосы (ВПП), трех участков травы).

Как отмечалось выше, в ходе получения данных гиперспектральной воздушной съемки исследовались возможности калибровки по искус-

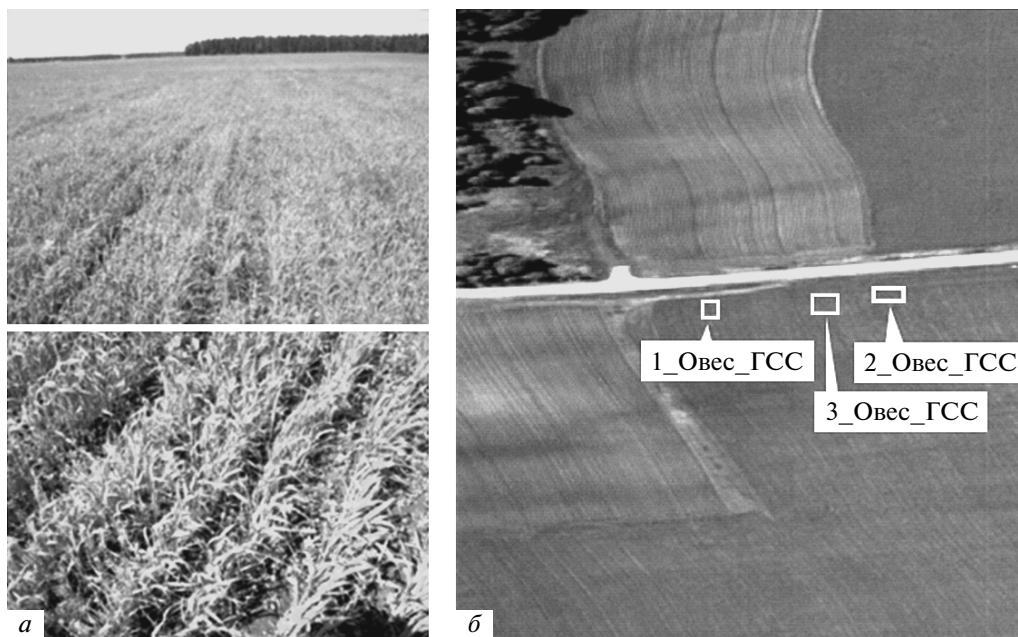


Рис. 3. *а* – Фотографии участка овсяного поля; *б* – данные авиационной ГСС данного поля.

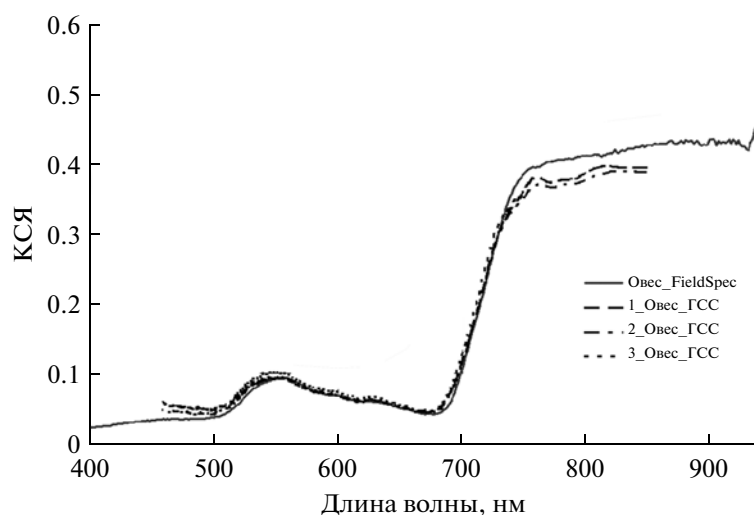


Рис. 4. Спектральные ходы результатов калибровки данных ГСС, приведенных на рис. 3б, и наземных измерений полевым спектрометром FieldSpec.

ственным поверхностям, часто присутствующим на реальных сюжетах. В качестве примера можно привести результаты калибровки данных ГСС по асфальту дороги. Здесь наземные измерения асфальта и растительности (травы) проводились на семь дней ранее собственно авиационной съемки, которая в данном случае осуществлялась с высоты полета 3600 м аппаратурой отличного по пространственному разрешению от вышерассмотренного типа. На рис. 5 приведены спектральные ходы участка злаковой культуры, измеренного назем-

ным прибором и того же участка, полученного по данным авиационной съемки в ходе калибровки.

Некоторые несовпадения, возможно, объясняются недельным интервалом между наземной и авиационной съемкой, а также ошибками калибровки по асфальту с малыми значениями КСЯ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные теоретические исследования на основе реальных данных гиперспектральной съемки по реализации внешней калибровки, получен-

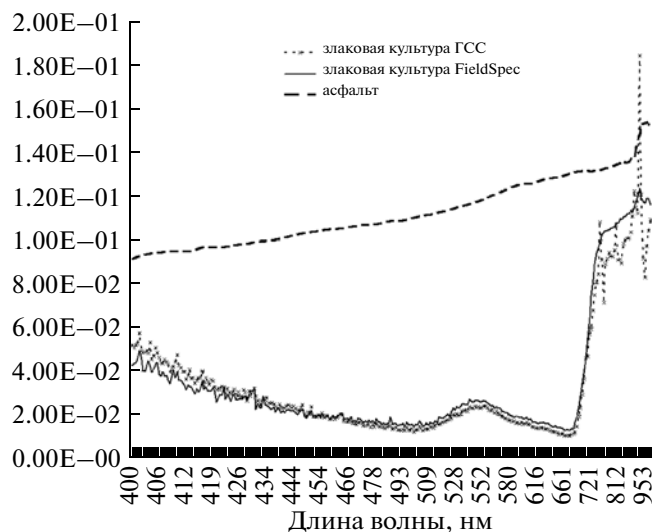


Рис. 5. Спектральные ходы участка злаковой культуры, полученного в результате калибровки гиперспектральных данных авиационной съемки по асфальту дороги, и его аналога по наземным измерениям (FieldSpec).

ные различными приборами в разных условиях наблюдения, позволяют сделать выводы о том, что использованные в работе методики синхронных измерений и методы пересчета спектральных кубов данных в значения КСЯ близки к точностям калибровки данных в пределах 10–15% по среднеквадратическому отклонению в рассматриваемом спектральном диапазоне. Полученные результаты в основном соответствуют современному научному уровню знаний, описывающему

процессы внешней калибровки спектральной аппаратуры ДЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шовенгердт Р.А.* Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 556 с.
- Sanders L.C., Raqueño R.V., Schott J.R.* Atmospheric correction algorithm for hyperspectral imagery. DOE/NV/11718-367. Oxford Univ. Press, 1997. 8 p.

Calibration of Hyperspectral Data Aircraft Shooting on Related Ground Measurements of Standard Surfaces Observed Scenes

V. N. Ostrikov, O. V. Plakhotnikov

Joint-Stock Company "Radio Engineering Corporation "Vega", St. Petersburg Branch

At a considerable experimental data considered the possibility of implementing the initial data conversion hyperspectral aircraft shooting in the reflectance. Considers different algorithms in relation to the presence and absence of co-synchronous measurements. External calibration errors are estimated for various conditions of observation and various equipment receiving data.

Keywords: external calibration, hyperspectral images

СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ (GOSAT) И НАЗЕМНЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ CO₂ ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2013 г. Н. М. Гаврилов*, Ю. М. Тимофеев

Санкт-Петербургский государственный университет

*E-mail: gavrilov@inbox.spbu.ru

Поступила в редакцию 24.11.2012 г.

Выполнено сравнение средних по столбу атмосферы отношений смеси углекислого газа, измеренных методом наземной Фурье-спектроскопии на Петергофской базе Санкт-Петербургского государственного университета (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2011 гг., с аналогичными данными, полученными японским спутником GOSAT. Сравнение показывает, что средние значения отношений смеси CO₂ по спутниковым данным версии V01.xx на -9.8 ± 3 млн⁻¹ меньше, чем соответствующие значения, полученные из наземных измерений. Для версии данных GOSAT V02.xx занижение в среднем составляет -4.7 ± 2.6 млн⁻¹. Косвенно обнаружено некоторое завышение значений X_{CO_2} , измеряемых в районе Санкт-Петербурга по сравнению с данными сети наземных станций TCCON, причины которого требуют дальнейших исследований.

Ключевые слова: углекислый газ, полное содержание, наземные измерения, Фурье-спектроскопия, спутник GOSAT, сравнение, валидация

DOI: 10.7868/S0205961413040040

ВВЕДЕНИЕ

Для лучшего понимания особенностей глобальных циклов углерода и их влияния на изменение климата необходимы регулярные измерения атмосферного CO₂. До недавнего времени большинство станций мониторинга CO₂ использовало метод забора и химического анализа проб воздуха для определения отношения смеси CO₂ вблизи поверхности земли (Convey et al., 2003) или в тропосфере с использованием самолетов. На станциях наблюдения, расположенных на удалении от активных источников и стоков CO₂, могут применяться оптические спектрометрические методы определения общего содержания CO₂ в столбе атмосферы. Эти методы используют регистрацию поглощения солнечной радиации в ИК-части спектра и измеряют среднее по столбу атмосферы отношение смеси CO₂, X_{CO_2} . В России этот метод используется с 1980 г. на научной станции Иссык-Куль учеными России и Киргизии. Подробный анализ результатов этих исследований приведен в работах (Кашин и др. 2007, 2008). В последние годы для наземных измерений содержания CO₂ в столбе атмосферы регулярно применяется Фурье-спектроскопия высокого разрешения (Yang et al., 2002; Deutscher et al., 2010). С января 2009 г. на кафедре физики атмосферы Санкт-Петербургского

государственного университета (СПбГУ) в Старом Петергофе (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) проводятся наземные измерения спектров прямого солнечного излучения в ИК-области с помощью Фурье-спектрометра высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125HR (Поберовский, 2010).

Данные наземных оптических измерений CO₂ также могут быть полезны для валидации спутниковых измерений, которые дают информацию об общем содержании CO₂ в столбе атмосферы. Начиная с 2002 г., были проведены демонстрационные измерения содержания CO₂ в столбе атмосферы с помощью прибора SCIAMACHY на спутнике ENVISAT (Barkley et al., 2006a, 2006b). В 2004 г. был запущен спутник EOS Aqua с прибором AIRS, который также позволяет определять содержания CO₂ в столбе атмосферы. Разработана международная программа запуска других приборов для глобального мониторинга пространственно-временных вариаций содержания CO₂ в столбе атмосферы. Для валидации спутниковых наблюдений парниковых газов создана специальная сеть наблюдения общего содержания CO₂ (the Total Carbon Column Observation Network, TCCON), использующая наземную Фурье-спектроскопию прямого солнечного излучения для проведения регулярных измерений общих содержаний CO₂ и

других климатообразующих газов (Wunch et al., 2011).

В январе 2009 г. был запущен спутник для наблюдения парниковых газов (Greenhouse gases Observing SATellite, GOSAT), который является совместным проектом Японского аэрокосмического агентства и Института исследований окружающей среды в Кукубе, Япония (Kuze et al., 2009). Спутник предназначен для наблюдения глобальных распределений общих содержаний CO_2 и метана (CH_4) из космоса. Средние по столбу атмосферы отношения смеси X_{CO_2} и X_{CH_4} восстанавливаются из данных наблюдений прибором TANSO-FTS (Thermal And Nearinfrared Sensor for carbon Observation Fourier Transform Spectrometer), который является Фурье-спектрометром, ориентированным на исследование углеродсодержащих газов в ИК-области спектра с борта спутника GOSAT (Yoshida et al., 2011). В работе (Morino et al., 2011) выполнены предварительная валидация значений X_{CO_2} , измеряемых спутником GOSAT, и их сравнение с данными измерений Фурье-спектрометрами на наземной сети TCCON.

В нашей статье выполнено сравнение измерений X_{CO_2} с борта спутника GOSAT с данными Фурье-спектроскопических наблюдений с земной поверхности вблизи Санкт-Петербурга в 2009–2011 гг.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Ракитин и др. (2012) представили результаты определения средних по высоте отношений смеси CO_2 , X_{CO_2} из измеренных Фурье-спектрометром высокого спектрального разрешения Bruker IFS-125HR (Поберовский, 2010) ИК-спектров для периода с апреля 2009 г. по октябрь 2011 г. на базе СПбГУ в Старом Петергофе (примерно в 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга). Для определения X_{CO_2} использовались спектральный интервал $2626.3\text{--}2627.0\text{ см}^{-1}$ и международная программа интерпретации SFIT V3.92, разработанная коллективом авторов (Rinsland et al., 1998) для сети станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). Входной информацией для SFIT V3.92 являются спектры солнечного излучения, начальные профили отношения смеси CO_2 и второстепенных газов и их априорные вариации. Априорные относительные вариации отношений смеси CO_2 задавались в нижней тропосфере в 5%, а выше – 3%. На выходе программы выдаются оценки общего содержания CO_2 (в $\text{мол}/\text{см}^2$) и случайные погрешности их определения. При определении средних по высоте отношений смеси CO_2 использовались ежедневные данные радиозондирования атмосферы на станции п. Воей-

ково. В качестве источника информации о параметрах тонкой структуры линий молекулярного поглощения использовалась спектроскопическая база данных HITRAN (2004).

При восстановлении общего содержания CO_2 в качестве “мешающих” параметров определялось содержание CH_4 и H_2O . Случайные погрешности единичного измерения содержания CO_2 не превышали 1% ($\sim 4\text{ млн}^{-1}$) по оценкам с помощью расчетов матрицы ошибок метода оптимального оценивания (реализованного в SFIT). В условиях стабильной работы аппаратуры и стабильного состояния атмосферы вариации отношения смеси CO_2 в сериях и в течение дня, как правило, не превышали 1%. Приведенные в работе (Ракитин и др., 2012) значения отношения смеси X_{CO_2} были получены по отношению к полному числу молекул (вместе с водяным паром). В связи с тем, что данные X_{CO_2} , полученные со спутника GOSAT, относятся к сухой атмосфере (без вклада водяного пара), в настоящем исследовании данные Ракитина и др. (2012) были скорректированы к сухой атмосфере с использованием результатов реанализа метеорологических данных из Европейского центра ECMWF (Dee et al., 2011) для моментов времени и координат пункта наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга.

Результаты спутниковых измерений среднего по столбу атмосферы X_{CO_2} доступны на веб-сайте проекта GOSAT Национального института исследований окружающей среды Японии (NIES, 2010). Для пользователей доступны две версии данных GOSAT: V01.xx и V02.xx, которые различаются методикой анализа спектров, измеряемых прибором TANSO-FTS. Метод анализа спектров для версии данных V01.xx подробно описан в работе (Yoshida et al., 2011). Для одновременного определения общих содержаний молекул N_{CO_2} , N_{CH_4} и N_{O_2} в столбе атмосферы используются полосы поглощения в ИК-области солнечного спектра $6180\text{--}6380$, $5900\text{--}6150$ и $12950\text{--}13200\text{ см}^{-1}$ соответственно. Измеренные спектры анализируются с использованием алгоритма GFIT (Toon et al., 1992; Wunch et al., 2011), который также используется на всех станциях наземной сети Фурье-спектрометров TCCON (Wunch et al., 2011). Из всех измерений прибором TANSO-FTS отбираются только спектры, на измерение которых не влияла облачность. Последняя контролируется прибором TANSO-CAI, измеряющим излучения в видимой, УФ- и БИК-областях спектра.

Случайные ошибки измерения X_{CO_2} оцениваются в среднем в 2 млн^{-1} , или около 0.5%, и определяются шумом прибора (основной источник ошибки), ошибками усреднения и влияния второстепенных газов (Yoshida et al., 2011). Внутри

указанных версий обработки данных спутника GOSAT выделяются подверсии, например V01.10, V01.20, V01.30, которые отличаются алгоритмами первичной обработки измеряемых Фурье-спектров (критериями определения насыщения и выбросов спектров – см. (Yoshida et al., 2011; Kuze et al., 2012). В последнее время появилась версия данных GOSAT V02.xx (с подверсиями V02.00, V02.11), которая отличается улучшенными алгоритмами первичной обработки и анализа спектров, учета облачности и аэрозольной дымки, а также усовершенствованной моделью учета метеорологической информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

Для сравнения X_{CO_2} , измеренных в районе Санкт-Петербурга с земной поверхности и с борта спутника GOSAT, были выбраны интервалы одновременных измерений в 2009–2011 гг. Для этих интервалов из базы данных Института исследований окружающей среды в Цукубе, Япония (NIES, 2012), были выбраны случаи измерения X_{CO_2} спутником GOSAT в окрестностях $\pm 3^\circ$ по широте и долготе от пункта наземных измерений. В табл. 1 перечислены временные интервалы, версии программ анализа данных и количество измерений спутником GOSAT, отобранных для анализа. Из данных наземных измерений вблизи Санкт-Петербурга для сравнения были отобраны измерения, проводившиеся в интервалы 12–15 ч локального солнечного времени, когда Солнце находилось максимально высоко над горизонтом. Также были использованы только значения, попадающие в 95%-ный доверительный интервал около среднего значения для соответствующего периода наблюдений. Данные наземных наблюдений содержания CO_2 в столбе влажной атмосферы были приведены к значениям X_{CO_2} для сухого воздуха.

На рис. 1 представлены индивидуальные значения X_{CO_2} по наземным и спутниковым измерениям, перечисленным в табл. 1. Во многих случаях даты измерений двумя методами не совпадают. Однако из рис. 1 видны систематически меньшие значения X_{CO_2} , измеренные со спутника GOSAT, по сравнению с измерениями с земной поверхности, причем значения версий данных V01.xx и V02.xx меньше наземных значений в среднем на 10 млн^{-1} и 5 млн^{-1} соответственно.

В табл. 2 приведены значения отношений смеси CO_2 , измеренных с земной поверхности, $X_{CO_2_SPB}$, и со спутника GOSAT, $X_{CO_2_GOS}$ (версии данных V01.xx), а также разностей $\Delta X_{CO_2} = X_{CO_2_GOS} - X_{CO_2_SPB}$ для совпадающих дат наземных и спутниковых измерений в течение ука-

Таблица 1. Временные интервалы и версии данных GOSAT, использованные для сравнения

Период	Версия	Число
08.04.2009–25.06.2009	V01.10	4
02.08.2009–20.09.2009	V01.20	4
12.04.2010–09.09.2010	V01.30	8
25.04.2010–12.09.2011	V01.50	7
06.06.2009–21.09.2009	V02.00	16
12.04.2010–31.07.2010	V02.00	28
03.07.2011–30.07.2011	V02.11	3

Таблица 2. Среднедневные значения отношений смеси CO_2 для совпадающих дат наземных измерений в районе Санкт-Петербурга и измерений (версия данных V01.xx) со спутника GOSAT

Дата	$X_{CO_2_SPB}$, млн $^{-1}$	$X_{CO_2_GOS}$, млн $^{-1}$	ΔX_{CO_2} , млн $^{-1}$
25.06.2009	389.4	380.1	–9.3
21.08.2009	388.8	375.1	–13.7
12.04.2010	393.2	382.8	–10.4
26.04.2010	390.7	381.6	–9.2
12.05.2010	392.2	380.2	–12.0
21.05.2010	394.7	387.7	–7.0
25.04.2011	389.3	384.2	–5.2
28.04.2011	398.5	386.9	–11.6
10.05.2011	392.0	387.3	–4.7
13.05.2011	394.4	381.8	–12.6
06.09.2011	388.4	378.1	–10.4
среднее	392.0	382.3	–9.6
медиана	392.0	381.8	–10.4
дисперсия	3.1	4.0	3.0

занных в табл. 1 периодов наблюдений в 2009–2010 гг. В табл. 3 приведены данные, аналогичные табл. 2, но для версии данных GOSAT V02.xx. В тех случаях, когда в течение дня регистрировалось несколько наземных или спутниковых значений X_{CO_2} , в табл. 2 и 3 использованы усредненные значения. Таблицы 2 и 3 показывают, что почти во всех рассмотренных случаях X_{CO_2} , измеренные с земной поверхности, больше соответствующих спутниковых значений. Средние и медианные значения ΔX_{CO_2} в табл. 3 для версии данных V02.xx существенно меньше, чем соответствующие значения в табл. 2 для версии данных V01.xx. Это соответствует более низкому расположению крестиков по сравнению с кружками на рис. 1.

Таблица 3. Среднедневные значения отношений смеси CO_2 для совпадающих дат наземных измерений в районе Санкт-Петербурга и измерений (версия данных V02.xx) со спутника GOSAT

Дата	$X_{\text{CO}_2_SPB}$, млн ⁻¹	$X_{\text{CO}_2_GOS}$, млн ⁻¹	ΔX_{CO_2} , млн ⁻¹
22.06.2009	389.6	383.5	-6.1
26.06.2009	387.6	384.5	-3.1
01.07.2009	386.8	382.8	-4.0
12.04.2010	393.2	390.7	-2.5
15.04.2010	390.1	391.7	1.5
26.04.2010	390.7	389.3	-1.4
12.05.2010	392.3	388.5	-3.8
14.05.2010	398.8	392.5	-6.3
19.05.2010	396.3	390.2	-6.1
20.05.2010	395.9	388.9	-7.0
21.05.2010	394.7	389.4	-5.3
17.06.2010	394.2	386.3	-7.9
28.06.2010	389.2	386.4	-2.8
05.07.2010	390.7	384.8	-5.9
12.07.2010	394.1	390.4	-3.7
13.07.2010	397.0	389.6	-7.4
26.07.2011	393.5	385.3	-8.2
среднее	392.6	387.9	-4.7
медиана	393.2	388.9	-5.3
дисперсия	3.4	3.0	2.6

Для увеличения объема выборки были проанализированы пары индивидуальных наземных и спутниковых значений X_{CO_2} , у которых разности дат измерений не превышали двух суток. На рис. 2

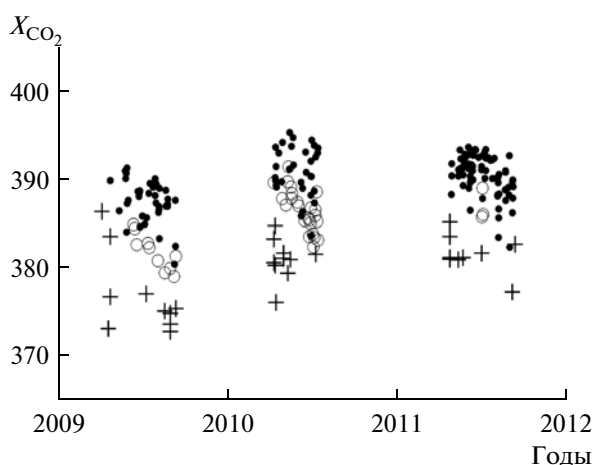


Рис. 1. Значения X_{CO_2} в млн⁻¹ по наземным измерениям в районе Санкт-Петербурга (точки) и по данным спутника GOSAT версии V01.xx (крестики) и версии V02.xx (кружки).

изображены соответствующие пары значений $X_{\text{CO}_2_SPB}$ и $X_{\text{CO}_2_GOS}$ для обеих версий данных спутника GOSAT. Сплошной линией на рис. 2 обозначены значения $X_{\text{CO}_2_SPB} = X_{\text{CO}_2_GOS}$. Видно, что почти все измеренные значения лежат ниже сплошной линии на рис. 2, т.е. $X_{\text{CO}_2_SPB} > X_{\text{CO}_2_GOS}$, причем расхождение больше для версии спутниковых данных V01.xx по сравнению с версией V02.xx. Коэффициенты корреляции между $X_{\text{CO}_2_SPB}$ и $X_{\text{CO}_2_GOS}$ на рис. 2 равны 0.65 и 0.71 для данных GOSAT V01.xx и V02.xx соответственно. Средние значения разностей $\Delta X_{\text{CO}_2} = X_{\text{CO}_2_GOS} - X_{\text{CO}_2_SPB}$ для данных, изображенных на рис. 2, приведены в табл. 4. Линии, изображенные длинным и коротким пунктиром на рис. 2, сдвинуты относительно сплошной линии на средние значения ΔX_{CO_2} из табл. 4 для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно. На рис. 3 показаны гистограммы индивидуальных значений ΔX_{CO_2} с рис. 2 для обеих версий спутниковых данных. Они имеют максимумы в районах $-(8-11)$ млн⁻¹ и $-(4-6)$ млн⁻¹ для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx, которые соответствуют указанным в табл. 2-4 средним значениям ΔX_{CO_2} .

ОБСУЖДЕНИЕ

Morino et al. (2011) выполнили сравнение данных GOSAT версии V01.xx с результатами Фурье-спектроскопических измерений X_{CO_2} в 2009–2010 гг. на девяти станциях наземной сети TCCON, находящихся в широтном поясе от 45° ю.ш. до 53° с.ш. Они обнаружили занижение спутниковых значений X_{CO_2} на $-(7-13)$ млн⁻¹ для различных станций, при среднем значении расхождения $\Delta X_{\text{CO}_2} = -8.85 \pm 4.75$ млн⁻¹. Аналогичное значение -9.08 ± 5.41 млн⁻¹ получили Tanaka et al. (2012) для разности между значениями X_{CO_2} версии данных GOSAT V01.xx и средним по высоте отношением смеси CO_2 , измеренным с самолета. Значения ΔX_{CO_2} для версии данных GOSAT V01.xx в табл. 2 и 4 в основном попадают в указанный диапазон, причем средние и медианные ΔX_{CO_2} лежат в пределах $-(9.6-10.4)$ млн⁻¹. Это означает, что значения X_{CO_2} , измеряемые с земной поверхности в районе Санкт-Петербурга, могут быть в среднем на 0.8–1.5 млн⁻¹ завышены относительно средних значений для сети станций TCCON.

Одной из причин такого завышения могут быть более высокая широта и меньший угол подъема Солнца над горизонтом для наблюдений вблизи Санкт-Петербурга (59.9° с.ш.) по сравнению с TCCON станциями, проанализированными Morino et al. (2011). Анализ наших измерений

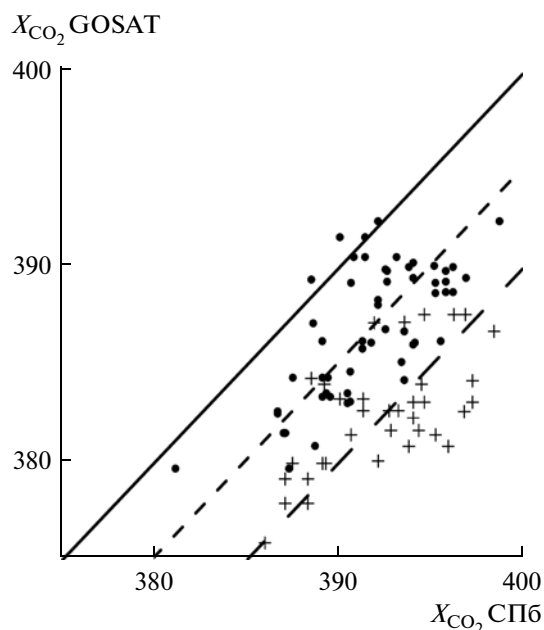


Рис. 2. Значения $X_{\text{CO}_2_SPB}$ и $X_{\text{CO}_2_GOS}$ в млн^{-1} , разности дат измерений у которых не превышали 2 сут. Сплошная линия – значения $X_{\text{CO}_2_SPB} = X_{\text{CO}_2_GOS}$, сдвиги длинного и короткого пунктира по вертикали соответствуют средним разностям ΔX_{CO_2} для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно.

X_{CO_2} в наиболее ясные дни, когда удавалось получить несколько серий измерений в течение дня, показал систематически повышенные значения X_{CO_2} в утренние и вечерние часы при низком Солнце по сравнению с серединой дня, когда Солнце поднималось на максимальные углы над горизонтом. Поэтому меньшие углы подъема Солнца над горизонтом могут приводить к некоторому завышению измеряемых значений X_{CO_2} в более высоких широтах. Другой причиной расхождения измерений X_{CO_2} в районе Санкт-Петербурга может быть другой спектральный диапазон измерений по сравнению с сетью TCCON, что требует дальнейшего анализа. Стоит также упомянуть в качестве возможной причины превышения содержания CO_2 в наземных измерениях влияние мегаполиса Санкт-Петербурга, являющегося источником антропогенного CO_2 (Kort et al., 2012).

Дисперсии индивидуальных расхождений ΔX_{CO_2} между данными GOSAT версии V01.xx и станциями сети TCCON, согласно Morino et al. (2011), для разных станций лежат в пределах 2.8–5.6 млн^{-1} при среднем значении 4.75 млн^{-1} . Это несколько больше значений дисперсий, приведенных в табл. 2 и 4 для данных GOSAT версии

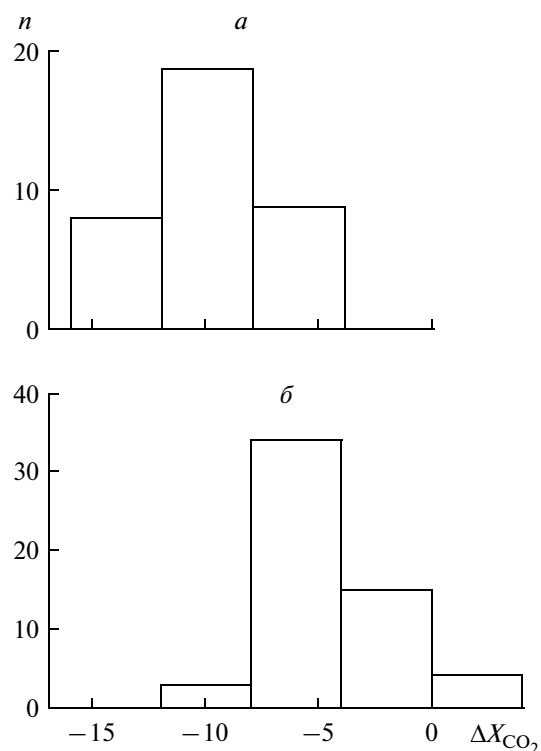


Рис. 3. Гистограммы значений $\Delta X_{\text{CO}_2} = X_{\text{CO}_2_GOS} - X_{\text{CO}_2_SPB}$ в млн^{-1} для пар измерений, представленных на рис. 2 для данных GOSAT: а – версия V01.xx; б – версия V02.xx.

V01.xx. Возможно, это является следствием исключения из нашего анализа значений X_{CO_2} , которые имели отклонения более удвоенной дисперсии от средних значений для совпадающих интервалов спутниковых и наземных измерений в разные годы.

Сравнение табл. 2 и 3, а также табл. 4 для разных версий данных GOSAT показывает, что расхождение с наземными измерениями для версии V02.xx примерно на 5 млн^{-1} меньше, чем для версии V01.xx, и составляет в среднем $-4.7 \pm 2.6 \text{ млн}^{-1}$. Имеются публикации (напр., Notholt et al., 2012), в которых упоминаются алгоритмы анализа спутниковых измерений, дающие абсолютные значения расхождений ΔX_{CO_2} между спутником GOSAT и станциями сети TCCON в 1 млн^{-1} и менее. По-видимому, в этих публикациях речь идет об исследовательских алгоритмах, которые еще не полностью внедрены в оперативную практику и результаты которых еще недоступны широкому кругу пользователей. Кроме того, указанное отсутствие систематических отличий спутниковых и наземных измерений CO_2 относится к данным, усредненным за относительно большие интервалы измерений. Анализ данных отчета Notholt et al. (2012) показывает, что на протяжении более ко-

Таблица 4. Средние характеристики для данных, изображенных на рис. 2

Данные	Оценка	$X_{\text{CO}_2\text{_SPB}}$, млн ⁻¹	$X_{\text{CO}_2\text{_GOS}}$, млн ⁻¹	ΔX_{CO_2} , млн ⁻¹
V01.xx	среднее	392.4	382.4	-10.0
	медиана	392.9	382.8	-10.0
	дисперсия	3.4	3.2	2.8
V02.xx	среднее	391.9	387.1	-4.8
	медиана	392.0	387.1	-5.5
	дисперсия	3.4	3.4	2.6

ротких интервалов (2–4 мес.) могут наблюдаться систематические отличия между наземными и спутниковыми измерениями в 3–6 млн⁻¹.

Morigino et al. (2011) показали, что значения X_{CO_2} , измеряемые спутником GOSAT обнаруживают сезонное и широтное поведение, аналогичное наблюдаемому на сети наземных станций TCCON. При этом использование версии данных GOSAT V02.xx ведет к меньшим расхождениям между спутниковыми и наземными измерениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнено сравнение средних по столбу атмосферы отношений смеси CO_2 , X_{CO_2} , измеренных методом Фурье-спектроскопии с земной поверхности на Петергофской базе СПбГУ (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2011 гг., с аналогичными данными (версии V01.xx и V02.xx.), полученными японским спутником GOSAT. Средние значения разностей ΔX_{CO_2} между спутниковыми данными версии V01.xx и измерениями с земной поверхности составляют -9.8 ± 3 млн⁻¹, что согласуется с литературными данными о сравнении данных GOSAT этой версии с сетью наземных станций TCCON и с самолетными измерениями. Среднее расхождение между данными GOSAT версии V02.xx составляет -4.7 ± 2.6 млн⁻¹, т.е. в 2 раза меньше, чем для данных версии V01.xx. Результаты сравнения косвенно показывают некоторое завышение значений X_{CO_2} , измеряемых в районе Санкт-Петербурга по сравнению с данными сети наземных станций TCCON, причины которого требуют дальнейшего исследования.

Авторы благодарны А.В. Поберовскому, Р.В. Журавлеву и В.А. Юшкову за полезные обсуждения и помощь в получении информации. Данное исследование выполнено при частичной финансовой поддержке грантов НИР СПбГУ № 11.31.547.2010 и № 11.37.28.2011, а также гранта РФФИ 12-05-00596.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Каменоградский Н.Е., Семенов В.К., Синяков В.П. Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 521–530.
- Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Семенов В.К., Синяков В.П., Упэнэк Л.Б. Структура временных вариаций углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии (Станция мониторинга “Иссык-Куль”) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 1. С. 94–103.
- Поберовский А.В. Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 1. С. 56–58.
- Ракутин А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. Вариации средних по высоте отношений смеси CO_2 вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. (в печати).
- Barkley M.P., Frieb U., Monks P.S. Measuring atmospheric CO_2 from space using Full Spectral Initiation (FSI) WFM-DOAS // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2006a. V. 6. P. 2765–2807.
- Barkley M.P., Monks P.S., Frieb U., Mittermeier R.L., Fast H., Korner S., Heimann M. Comparisons between SCIAMACHY atmospheric CO_2 retrieved using (FSI) WFM-DOAS to ground based FTIR data and the TM3 chemistry transport model // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2006b. V. 6. P. 5387–5425.
- Conway T.J., Andrews A.E., Bruhwiler L., Crotwell A., Dlugokencky E.J., Hahn M.P., Hirsch A.I., Kitzis D.R., Lang P.M., Masarie K.A., Michalak A.M., Miller J.B., Novvelli P.C., Peters W., Tans P.P., Thoning K.W., Vaughn B.H., Zhao C. Carbon cycle greenhouse gases // CMDL Report. 2003. № 27. P. 32–57. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/publications/annrpt27>.
- Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q.J.R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828. <http://data-portal.ecmwf.int>.

- Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Bryant G.W., Wennberg P.O., Toon G.C., Washenfelder R.A., Keppel-Aleks G., Wunch D., Yavin Y., Allen N.T., Blavier J.-F., Jimenez R., Daube B.C., Bright A.V., Matross D.M., Wofsy S.C., Park S.* Total column CO₂ measurements at Darwin, Australia – site description and calibration against in situ aircraft profiles // *Atmos. Meas. Tech.* 2010. V. 3. P. 947–958.
- HITRAN. Molecular spectroscopic database. 2004. <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>.
- Kuze A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring // *Appl. Optics.* 2009. V. 48. P. 6716–6733.
- Kuze A., Suto H., Shiomi K., Urabe T., Nakajima M., Yoshida J., Kawashima T., Yamamoto Y., Kataoka F., Buijs H.* Level 1 algorithms for TANSO on GOSAT: Processing and on-orbit calibrations // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 2447–2467. doi: 10.5194/amt-5-2447-2012
- Kort E.A., Frankenberg C., Miller C.E., Oda T.* Space-based observations of megacity carbon dioxide // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. № L17806. doi: 10.1029/2012GL052738.
- Morino I., Uchino O., Inoue M., Yoshida Y., Yokota T., Wennberg P.O., Toon G.C., Wunch D., Roehl C.M., Notholt J., Warneke T., Messerschmidt J., Griffith D.W.T., Deutscher N.M., Sherlock V., Connor B., Robinson J., Sussmann R., Rettinger M.* Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 1061–1076. doi: 10.5194/amt-4-1061-2011.
- NIES. Database of the GOSAT project // Courtesy JAXA/NIES/MOE. 2010. <https://data.gosat.nies.go.jp>.
- Notholt J., Blumenstock T., Brunner D., Buchmann B., Dils B., De Maziure M., Popp Ch., Sussmann R.* Product validation and algorithm selection report (PVASR) // ESA Climate Change Initiative (CCI). Final Rep. 22 August 2012. <http://www.esa-ghg-cci.org/?q=node/95>.
- Rinsland C.P., Jones N.B., Connor B.J., Logan J.A., Pougatchev N.S., Goldman A., Murcray F.J., Stephen T.M., Pine A.S., Zander R., Mahieu E., Demoulin P.* Northern and southern hemisphere ground-based infrared spectroscopic measurements of tropospheric carbon monoxide and ethane // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № D21. P. 28197–28218. doi: 10.1029/98JD02515.
- Toon G.C., Farmer C.B., Schaper P.W., Lowes L.L., Norton R.H.* Composition measurements of the 1989 Arctic winter stratosphere by airborne infrared solar absorption spectroscopy // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7939–7961. doi: 10.1029/91JD03114.
- Wunch D., Toon G., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O.* The Total Carbon Column Observing Network (TCCON) // *Philos. Trans. R. Soc. A.* 2011. V. 369. № 1943. P. 2087–2112.
- Yang Z., Toon G.C., Margolis J.S., Wennberg P.O.* Atmospheric CO₂ retrieved from ground-based near IR solar spectra // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 9. doi: 10.1029/2001GL014537.
- Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I., Yokota T.* Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectra observations by the Greenhouse gases observing satellite // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 717–734. doi: 10.5194/amt-4-717-2011.

Comparison of Satellite (GOSAT) and Ground-Based Spectroscopic Measurements of CO₂ Content near Saint-Petersburg

N. M. Gavrilov, Yu. M. Timofeev

Comparison of atmospheric column mean mole fraction of carbon dioxide measured with ground-based Fourier-transform spectroscopy at the Peterhof station of Saint-Petersburg State University (59.9° N, 29.8° E) in 2009–2011 with similar data obtained with the Japanese GOSAT satellite is performed. The comparison shows that the average CO₂ mole fractions from satellite data version V01.xx are by -9.8 ± 3 ppm less than the corresponding values obtained from ground-based measurements. For the GOSAT data version V02.xx this average decrease is -4.7 ± 2.6 ppm. Some overestimating CO₂ measured near Saint-Petersburg compared to the TCCON ground based network is indirectly detected, reasons of which require further explanation.

Keywords: carbon dioxide, total content, ground-based measurements, FTIR spectroscopy, GOSAT satellite, comparison, validation

СРАВНЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ (GOSAT) И НАЗЕМНЫХ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

© 2013 г. М. В. Макарова, Н. М. Гаврилов*, Ю. М. Тимофеев, А. В. Поберовский

Санкт-Петербургский государственный университет

*E-mail: gavrilov@pobox.spbu.ru

Поступила в редакцию 06.05.2013 г.

Проведено сравнение средних по столбу атмосферы отношений смеси метана, измеренных гиперспектральными методами наземной Фурье-спектроскопии на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2012 гг. с аналогичными данными, полученными японским спутником GOSAT. Средние значения отношения смеси метана X_{CH_4} по спутниковым данным версии V01.xx на 17–21 млрд⁻¹ меньше, чем соответствующие значения, полученные из наземных измерений при дисперсии ~13 млрд⁻¹. Для версии данных GOSAT V02.xx занижение в среднем составляет 2 млрд⁻¹, а дисперсия ~18 млрд⁻¹. Это соответствует расхождению X_{CH_4} , измеренным спутником GOSAT с данными международных сетей фурье-спектроскопических наблюдений TCCON и NDACC.

Ключевые слова: атмосферный метан, общее содержание, наземные измерения, фурье-спектроскопия, спутник GOSAT, сравнение, валидация

DOI: 10.7868/S0205961413060055

ВВЕДЕНИЕ

Метан является вторым по важности антропогенным парниковым газом. Несмотря на его низкую концентрацию в атмосфере Земли, его вклад в антропогенный парниковый эффект составляет ~15%. Для локального мониторинга метана обычно используется метод забора и лабораторного анализа проб воздуха для определения отношения смеси CH_4 вблизи земной поверхности или в тропосфере с использованием самолетов (Conway et al., 2003). Оптические спектрометрические методы измерений, основанные на регистрации ИК-спектров поглощения солнечной радиации, применяются для определения общего содержания CH_4 во всей толще атмосферы, среднего по столбу атмосферы отношения смеси метана X_{CH_4} или элементов вертикального распределения метана.

Данные наземных оптических измерений CH_4 могут быть полезны для валидации спутниковых измерений, которые также дают информацию об общем содержании CH_4 в столбе атмосферы. В этих исследованиях все большее распространение находит так называемая гиперспектральная аппаратура. Для проверки спутниковых наблюдений парниковых газов создана специальная международная сеть наземного мониторинга общего

содержания углерода в столбе атмосферы TCCON (The Total Carbon Column Observing Network), которая использует гиперспектральные фурье-спектроскопические (ФС) измерения прямого ИК-солнечного излучения для определения общего содержания CO_2 , CH_4 и других климатообразующих газов (Wunch et al., 2011). Подобные ФС измерения проводятся также на международной наземной сети мониторинга изменений состава атмосферы NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, см. <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>).

В Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) спектроскопические измерения общего содержания метана были начаты в 1991 г. (Mironenkov et al., 1996; Макарова et al., 2009). Эти измерения до 2009 г. осуществлялись с использованием солнечного ИК-спектрометра с разрешением 0.4–0.6 см⁻¹. С января 2009 г. на кафедре физики атмосферы проводятся гиперспектральные наземные ФС-измерения с помощью интерферометра Bruker IFS 125 HR, имеющего высокое спектральное разрешение. Результаты измерений атмосферных малых газовых составляющих описаны в работах (Поберовский и др., 2010; Виролайнен и др., 2011; Поляков и др., 2011; Яговкина и др., 2011).

Первые глобальные спутниковые данные о содержании полного содержания метана в столбе атмосферы были получены с использованием прибора IMG/ADEOS, который измерял уходящее тепловое излучение с высоким спектральным разрешением (Kobayashi et al., 1999). Дальнейшие исследования были проведены приборами SCIAMACHY, AIRS, IASI, TES (Sussmann et al., 2005; Razavi et al., 2009; Xiong et al., 2010; Wecht et al., 2012). Несмотря на обширные программы наблюдений, географическое распределение метана и его источники остаются недостаточно выясненными (Solomon et al., 2007). Регулярные глобальные спутниковые измерения CH_4 могут приблизить нас к решению этих проблем.

В январе 2009 г. был запущен спутник GOSAT (Global Greenhouse Gas Observation by Satellite), который является совместным проектом Японского агентства аэрокосмических исследований и Национального института исследований окружающей среды в Цукубе, Япония (Kuze et al., 2009). Спутник предназначен для космического мониторинга глобальных распределений общих содержаний CO_2 и CH_4 в столбе атмосферы и использует гиперспектральную аппаратуру. Средние по столбу отношения смеси двуокиси углерода X_{CO_2} и метана X_{CH_4} восстанавливаются из данных теплового датчика для наблюдения углерода фурье-спектрометром в близкой инфракрасной области TANSO-FTS (Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observations – Fourier Transform Spectrometer), который установлен для измерений парниковых газов на борту спутника GOSAT (Yoshida et al., 2011).

Morino et al. (2011) выполнили предварительный анализ X_{CO_2} и X_{CH_4} , полученных спутником GOSAT, сравнив их с измерениями на наземной сети фурье-спектроскопии TCCON (см. выше). Они обнаружили значительное занижение спутниковых значений по сравнению с наземными наблюдениями. Позже сопоставления X_{CO_2} и X_{CH_4} , полученных другими алгоритмами восстановления X_{CO_2} и X_{CH_4} из данных GOSAT и TCCON, дали лучшее согласие между спутниковыми и наземными измерениями (Notholt et al., 2012; Cogan et al., 2012). Поскольку эти сравнения были выполнены для широт ниже 55° с.ш., то представляет интерес совместный анализ спутниковых (GOSAT) и наземных наблюдений на более высоких широтах и использующих различные алгоритмы восстановления.

В статье Гаврилова и Тимофеева (2013) проведено сравнение гиперспектральных измерений X_{CO_2} со спутника GOSAT с наземными ФС наблюдениями. В настоящей работе мы сравниваем аналогичные данные о X_{CH_4} , полученные в 2009–2012 гг. в

окрестностях Санкт-Петербурга на широте около 60° с.ш.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Измерения спектров солнечного излучения проводятся в Старом Петергофе (59.88° с.ш., 29.82° в.д., 20 м над уровнем моря), примерно в 35 км к юго-западу от центра Санкт-Петербурга. Регистрация интерферограмм проводится в условиях безоблачного неба или при наличии достаточных для проведения регистрации спектров разрывов в облачности. Обычно измерения ведутся при разности оптического пути 180 см, что соответствует спектральному разрешению 0.005 см^{-1} . Время накопления и усреднения десяти интерферограмм, использующихся для получения одного спектра, составляет около 12 мин.

Интерпретация (определение общего содержания газов в атмосфере) высокоразрешенных спектров прямого солнечного излучения, измеренных Bruker IFS125 HR, проводилась на основе стандартного международного программного обеспечения SFIT2 v 3.92 (Pougatchev et al., 1995; Rinsland et al., 1998; Hase et al., 2004), разработанного для сети NDACC. Алгоритм SFIT2 при определении содержания газов в атмосфере использует метод статистической регуляризации с использованием итерационного метода Ньютона. В качестве источника информации о параметрах тонкой структуры линий молекулярного поглощения используется спектроскопическая база данных HITRAN-2004 (Rothman et al., 2005).

Основными входными параметрами SFIT2 являются: измеренный спектр солнечного излучения, величины разности оптического хода и апертуры прибора, зенитный угол Солнца, отношение сигнал/шум, метеорологические данные (профили температуры и давления в день измерения), априорная информация о профилях отношения смеси газов. Метеорологическая информация (давление, профиль температуры), необходимая при обработке спектров, поступает со станции радиозондирования ГГО (пос. Воейково) (см., например, Weather Web, 2013), которая находится в 50 км от Петергофа. В качестве априорных профилей концентраций газов в атмосфере были использованы профили, рассчитанные при помощи климатической модели WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) (Garcia et al., 2007) непосредственно для измерительной станции в Петергофе (соответствующие широта, долгота и высота над уровнем моря).

Для восстановления общего содержания CH_4 в столбе атмосферы используются обычные для сети NDACC спектральные интервалы в ИК-области (см., например, Sepulveda et al., 2012): 2613.7–2615.4, 2650.6–2651.3, 2835.5–2835.8 и 2903.6–

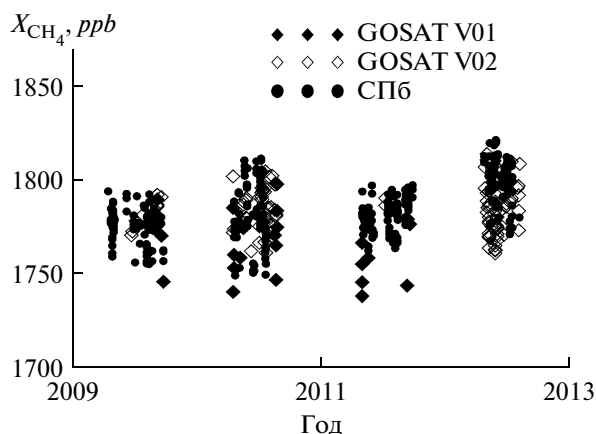


Рис. 1. Средние по столбу атмосферы отношения смеси метана (в млрд⁻¹), измеренные со спутника GOSAT (данные версий V01.xx и V02.xx) и с земной поверхности вблизи Санкт-Петербурга.

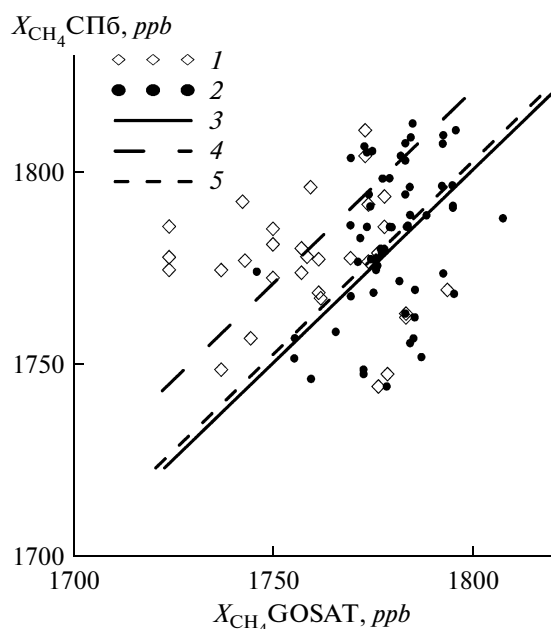


Рис. 2. Сравнение пар значений X_{CH_4} (в млрд⁻¹), измеренных вблизи Санкт-Петербурга и со спутника GOSAT версии данных V01.xx – (1) и V02.xx – (2), для которых различия между датами измерений не превышают двух дней. Линия 3 соответствует $X_{\text{CH}_4_{\text{SPб}}} = X_{\text{CH}_4_{\text{GOSAT}}}$, а линии 4 и 5 сдвинуты от линии 3 в соответствии со средними значениями δX_{CH_4} из таблицы для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно.

2904.03 см⁻¹. Среднее значение отношения сигнал/шум в указанных спектральных диапазонах после процедуры отбраковки спектров составляет ~800.

Случайные относительные погрешности единичного измерения X_{CH_4} не превышают 0.5% (по

оценкам с помощью расчетов матрицы ошибок в рамках метода статистической регуляризации, реализованного в программе SFIT2). В условиях стабильной работы аппаратуры и стабильного состояния атмосферы вариации X_{CH_4} в сериях спектров, измеренных в течение дня, обычно не превышают 1%.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЙ

Для сравнения X_{CH_4} , измеряемых вблизи Санкт-Петербурга с поверхности Земли и с борта спутника GOSAT, были выбраны интервалы одновременных измерений в 2009–2012 гг. Для этих временных интервалов из базы данных Национального института экологических исследований в Цукубе, Японии (NIES, 2012) были отобраны значения X_{CH_4} , измеренные спутником GOSAT в окрестности $\pm 3^\circ$ по широте и долготе от пункта наземных наблюдений. Наземные значения X_{CH_4} , использованные для сравнения, были измерены при наименьших зенитных углах Солнца (обычно в пределах ± 3 ч от местного полудня). При этом использовались значения, попадающие в 95% доверительный интервал около среднего значения для соответствующего периода наблюдений. Так как спутниковые значения X_{CH_4} получены для сухой атмосферы (без учета водяного пара), наземные X_{CH_4} были также скорректированы для сухой атмосферы, с использованием данных реанализа метеорологической информации европейского центра ECMWF (Dee et al., 2011).

На рис. 1 представлены индивидуальные значения X_{CH_4} по наземным и спутниковым измерениям. Во многих случаях даты проведения измерений с помощью этих методов не совпадают. Однако рис. 1 показывает систематически меньшие значения X_{CH_4} для версии данных GOSAT, V01.xx по сравнению с наземными измерениями вблизи Санкт-Петербурга. Для более детального анализа были отобраны пары индивидуальных наземных и спутниковых значений $X_{\text{CH}_4_{\text{SPб}}}$ и $X_{\text{CH}_4_{\text{GOSAT}}}$, для которых различия в датах их измерений не превышают двух дней. Рисунок 2 показывает соответствующие пары $X_{\text{CH}_4_{\text{SPб}}}$ и $X_{\text{CH}_4_{\text{GOSAT}}}$ для обеих версий спутниковых данных GOSAT. Сплошная линия на рис. 2 соответствует $X_{\text{CH}_4_{\text{SPб}}} = X_{\text{CH}_4_{\text{GOSAT}}}$. Видно, что почти все значения X_{CH_4} для данных GOSAT версии V01.xx лежат выше сплошной линии на рис. 2, т.е. $X_{\text{CH}_4_{\text{SPб}}} > X_{\text{CH}_4_{\text{GOSAT}}}$. Значения X_{CH_4} для данных GOSAT V02.xx на рис. 2 распределены более симметрично относительно сплошной линии. Коэффициенты корреляции между $X_{\text{CH}_4_{\text{SPб}}}$ и $X_{\text{CH}_4_{\text{GOSAT}}}$ на рис. 2 равны 0.65 и 0.71 для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответ-

Средние характеристики (в млрд⁻¹) для данных, показанных на рис. 2

Данные	Величина	$X_{\text{CH}_4_SPB}$	$X_{\text{CH}_4_GOS}$	δX_{CH_4}
V01.xx	Среднее	1780.2	1759.6	-20.6
	Медиана	1777.8	1759.6	-17.2
	Дисперсия	14.0	13.4	13.3
V02.xx	Среднее	1782.1	1779.9	-2.2
	Медиана	1785.5	1779.5	-1.8
	Дисперсия	18.9	10.9	18.1

ственно. В таблице приведены средние значения и дисперсии для наземных и спутниковых данных, представленных на рис. 2. Длинные и короткие штриховые линии на рис. 2 смещены по отношению к сплошной линии в соответствии с $\delta X_{\text{CH}_4} = X_{\text{CH}_4_GOS} - X_{\text{CH}_4_SPB}$ из таблицы для данных GOSAT версий V01.xx и V02.xx соответственно.

Для данных GOSAT версии V01.xx разности δX_{CH_4} в большинстве случаев отрицательны (до -59 млрд⁻¹, или ~3.3%). Соответствующие среднее и медианное $\delta X_{\text{CH}_4} \sim -(17-21)$ млрд⁻¹, а дисперсия ~13 млрд⁻¹ в таблице, т.е. значения X_{CH_4} по данным GOSAT версии V01.xx примерно на 1-1.3% ниже, чем наземные ФС-значения.

Для данных GOSAT версии V02.xx отклонения δX_{CH_4} значений GOSAT от наземных измерений имеют разные знаки в различные дни и варьируются от -26 млрд⁻¹ (1.5%) до 24 млрд⁻¹ (1.4%), что примерно в 2 раза меньше соответствующих отклонений для данных версии V01.xx (см. выше). В большинстве случаев относительные отклонения менее 1% для данных GOSAT версии V02.xx. Соответствующие средняя и медианная разности в таблице составляют $\delta X_{\text{CH}_4} = -(2.2-1.8)$ млрд⁻¹ (или около 0.1%), а дисперсия ~18 млрд⁻¹, или около 1%. При этом изменчивость (дисперсия) отношения смеси метана в таблице существенно меньше (~11 млрд⁻¹), чем для наземных измерений (~19 млрд⁻¹) для данных GOSAT версии V02.xx.

Анализ гистограммы разностей δX_{CH_4} между парами наземных и спутниковых измерений, показал, что для данных GOSAT версии V02.xx эти разности распределены почти симметрично относительно нуля, в то время как по данным GOSAT версии V01.xx они демонстрируют систематическую недооценку X_{CH_4} по сравнению с наземными ФС-измерениями.

ОБСУЖДЕНИЕ

Morino et al. (2011) провели сравнение данных GOSAT версии V01.xx и ФС-измерений X_{CH_4} в 2009-2010 гг. на девяти станциях наземной сети TCCON на широтах от 45° ю.ш. до 53° с.ш. Они обнаружили наличие систематического занижения значений X_{CH_4} спутником, которое составляет $\delta X_{\text{CH}_4} \approx -20 \pm 19$ млрд⁻¹ ($-1.2 \pm 1.1\%$). Близкие результаты были получены при исследовании отклонений между данными GOSAT версии V01.xx и самолетными измерениями в тропосфере, значения δX_{CH_4} при этом составили от -8 ± 10 млрд⁻¹ (Saitoh et al., 2012) до -39 ± 11 млрд⁻¹ (Tanaka et al., 2012). Отметим, что полученные в таблице средние и медианные значения $\delta X_{\text{CH}_4} \approx -(17-21)$ млрд⁻¹ для данных GOSAT версии V01.xx попадают в указанные диапазоны. Это может быть косвенным свидетельством того, что наземные ФС-измерения X_{CH_4} вблизи Санкт-Петербурга согласуются с измерениями отношений смеси метана в столбе атмосферы на сети TCCON.

Данные X_{CH_4} GOSAT, полученные с помощью нескольких алгоритмов восстановления в различных публикациях, были сопоставлены с наземными ФС-наблюдениями. Parker et al. (2011) провели сравнение значений X_{CH_4} , измеренных спутником GOSAT с данными наземной сети TCCON и с результатами численного моделирования. Было получено, что относительные различия индивидуальных спутниковых и наземных измерений изменяются в пределах 0.1-0.9% в зависимости от широты. Notholt et al. (2012) проанализировав различные алгоритмы восстановления метана, получили дисперсии разностей между GOSAT и наземными значениями в диапазоне от 0.8-4%. Schepers et al. (2012), при изучении влияния рассеяния света и перистых облаков на результаты ФС, получили средние различия между GOSAT и наземными X_{CH_4} в пределах от -0.3 до -0.4%. В работе Butz et al. (2011) также показано наличие систематических ошибок ~-0.3%. К сожалению, авторы упомянутых исследований не использовали

данные GOSAT версий V01.xx и V02.xx. Поэтому, трудно сделать прямое сравнение результатов нашей работы с перечисленными исследованиями.

Наш анализ отношения смеси метана по данным GOSAT версии V02.xx (см. таблицу и рис. 2) показал, что разности между спутниковыми и наземными значениями лежат в пределах 0.01–1.6% при среднем отклонении $\sim -0.1 \pm 0.9\%$. Хотя эти средние разности имеют значительные дисперсии (из-за ограниченного числа измерений), однако порядки их величин показывают, что ФС-наблюдения вблизи Санкт-Петербурга достаточно хорошо согласуются с данными спутника GOSAT. Дисперсии вариаций δX_{CH_4} , приведенные в таблице, составляют $\sim 13\text{--}18$ ppm, или $\sim 0.7\text{--}1\%$ и сравнимы с суммарными ошибками обоих типов измерений.

Отметим, что дисперсия наземных значений X_{CH_4} достаточно велика и составляет $\sim 14\text{--}19$ млрд⁻¹ (см. таблицу). Следует принять во внимание, что наши измерения проводятся в непосредственной близости от большого мегаполиса Санкт-Петербург, поэтому общая изменчивость метана там может быть выше, чем для фоновых измерений. Макарова и др. (2006) оценили, что антропогенные выбросы Санкт-Петербурга могут давать вклад до 2% в полное содержание CH_4 в столбе атмосферы.

Проведенное в данной работе сравнение наземных и спутниковых ФС-измерений отношения смеси метана X_{CH_4} не учитывает некоторые характеристики, которые могут влиять на результаты измерений и обработку данных, например, различия в усредняющих ядрах применяемых методов дистанционного зондирования (Parker et al., 2011), или неопределенности в параметрах тонкой структуры спектральных линий (Chesnokova et al., 2011). Кроме того, относительно небольшое количество солнечных дней для ФС-измерений вблизи Санкт-Петербурга требует дальнейшего накопления данных для проведения более надежных сравнений спутниковых и наземных измерений атмосферного метана.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании анализируются данные, полученные с помощью спутниковой и наземной гиперспектральной аппаратуры. Выполнены сравнения средних по столбу атмосферы отношений смеси метана X_{CH_4} , измеряемых с помощью фурье-спектрометра с борта японского спутника GOSAT (версии данных V01.xx и V02.xx) и с земной поверхности на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета (59.9° с.ш., 29.8° в.д.) в 2009–2012 гг. Средние и медианные различия между данными GOSAT версии V01.xx и наземными ФС измерениями $\delta X_{\text{CH}_4} \approx -(17\text{--}21)$ млрд⁻¹, а их дисперсии ~ 13 млрд⁻¹, что

согласуется с литературными данными по сравнениям этой версии данных GOSAT с сетью наземных ИФС-станций TCCON и с результатами анализа самолетных проб тропосферного воздуха. Средние различия для данных GOSAT версии V02.xx меньше ($\delta X_{\text{CH}_4}/X_{\text{CH}_4} \approx 0.1\%$) и свидетельствуют, что ФС-наблюдения вблизи Санкт-Петербурга могут дать приемлемое согласие с уточненными спутниковыми данными. Дисперсии значений $\delta X_{\text{CH}_4} \sim 13\text{--}18$ млрд⁻¹ ($\sim 0.7\text{--}1\%$) соответствуют суммарным ошибкам наземных и спутниковых измерений. Для проведения более надежных сравнений наземных и спутниковых измерений необходимо дальнейшее накопление данных ФС-измерений.

Данное исследование выполнено при частичной финансовой поддержке научно-исследовательских грантов 11.31.547.2010 и 11.37.28.2011 Санкт-Петербургского государственного университета, а также гранта 12-05-00596 Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Шаламянский А.М.* Наземные измерения общего содержания озона ИК-методом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 4. С. 521–532.
- Гаврилов Н.М., Тимофеев Ю.М.* Сравнения спутниковых (GOSAT) и наземных спектроскопических измерений содержания CO_2 вблизи Санкт-Петербурга // Исслед. Земли из космоса. 2013 (в печати).
- Макарова М.В., Поберовский А.В., Яговкина А.В., Кароль И.Л., Лагун В.Е., Парамонова Н.Н., Решетников А.И., Привалов В.И.* Исследование процессов формирования поля метана в атмосфере северо-западного региона российской федерации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 2. С. 237–249.
- Макарова М.В., Поберовский А.В., Вишератин К.Н., Поляков А.В.* Временная изменчивость общего содержания метана в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 774–781.
- Мироненков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Спектроскопические измерения полного содержания метана в атмосфере вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 4. С. 433–439.
- Поберовский А.В., Макарова М.В., Ракитин А.В., Ионов Д.В., Тимофеев Ю.М.* Изменчивость общих содержаний климатически активных газов по наземным спектроскопическим измерениям с высоким разрешением // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 2. С. 257–259.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Яговкина И.С.* Сезонные вариации общего содержания фтористого водорода в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 823–828.
- Яговкина И.С., Поляков А.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М.* Спектроскопические измерения общего со-

держания фреона cfc-11 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 204–207.

Butz A., Guerlet S., Hasekamp O., Schepers D., Galli A., Aben I., Frankenberg C., Hartmann J.-M., Tran H., Kuze A., Keppel-Aleks G., Toon G., Wunch D., Wennberg P., Deutscher N., Griffith D., Macatangay R., Messerschmidt J., Notholt J., Warneke T. Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. № 14. doi: 10.1029/2011GL047888.

Chesnokova T.Yu., Boudon V., Gabard T., Griбанov K.G., Firsov K., Zakharov V.I. Near-infrared radiative transfer modelling with different CH₄ spectroscopic databases to retrieve atmospheric methane total amount // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2011. V. 112. P. 2676–2682.

Cogan A.J., Boesch H., Parker R.J., Feng L., Palmer P.I., Blavier J.-F.L., Deutscher N.M., Macatangay R., Notholt J., Roehl C., Warneke T., Wunch D. Atmospheric carbon dioxide retrieved from the Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT): Comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. № D21301. doi: 10.1029/2012JD018087.

Conway T.J., Andrews A.E., Bruhwiler L., Crotwell A., Dlugokencky E.J., Hahn M. P., Hirsch A.I., Kitzis D.R., Lang P.M., Masarie K.A., Michalak A.M., Miller J.B., Novelli P.C., Peters W., Tans P.P., Thoning K.W., Vaughn I.B.H., Zhao C. Carbon cycle greenhouse gases // CMDL Report. 2003. V. 27. P. 32–57. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/publications/annrpt27>.

Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Kohler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2011. V. 137. P. 553–597. doi: 10.1002/qj.828. <http://data-portal.ecmwf.int>.

Deutscher N.M., Griffith D.W.T., Bryant G.W., Wennberg P.O., Toon G.C., Washenfelder R.A., Keppel-Aleks G., Wunch D., Yavin Y., Allen N.T., Blavier J.-F., Jimenez R., Daube B.C., Bright A.V., Matross D.M., Wofsy S.C., Park S. Total column CO₂ measurements at Darwin, Australia – site description and calibration against in situ aircraft profiles // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3. P. 947–958.

Garcia R.R., Marsh D.R., Kinnison D.E., Boville B.A., Sassi F. Simulation of secular trends in the middle atmosphere, 1950–2003 // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. № D09301. doi: 10.1029/2006JD007485.

Hase F., Hannigan J.W., Coffey M.T., Goldman A., Hopfner M., Jones N.B., Rinsland C.P., Wood S.W. Intercomparison of retrieval codes used for the analysis of high-resolution groundbased FTIR measurements // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 87. P. 25–52.

Kobayashi H., Shimota A., Kondo K., Okumura E., Kameda Y., Shimoda H., Ogawa, T. Development and evaluation of the interferometric monitor for greenhouse gases: a high-throughput Fourier-transform infrared radiometer for nadir Earth observation // Appl. Optics. 1999. V. 38. P. 6801–6807.

Kuze A., Suto H., Nakajima M., Hamazaki T. Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring // Appl. Optics. 2009. V. 48. P. 6716–6733.

Meier A. et al. Spectroscopic atlas of atmospheric micro-windows in the middle Infra-Red. (2nd revised edition). IRF Technical Report 048. Kiruna: Sweden IRF Institutet for Rymdfysik (Swedish Institute of Space Physics), 2004.

Morino I., Uchino O., Inoue M., Yoshida Y., Yokota T., Wennberg P.O., Toon G.C., Wunch D., Roehl C.M., Notholt J., Warneke T., Messerschmidt J., Griffith D.W.T., Deutscher N.M., Sherlock V., Connor B., Robinson J., Sussmann R., Rettinger M. Preliminary validation of column-averaged volume mixing ratios of carbon dioxide and methane retrieved from GOSAT short-wavelength infrared spectra // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4. P. 1061–1076. doi: 10.5194/amt-4-1061-2011.

NIES. Database of the GOSAT project. Courtesy JAXA/NIES/MOE. 2012. <https://data.gosat.nies.go.jp>.

Notholt J., Blumenstock T., Brunner D., Buchmann B., Dils B., De Mazière M., Popp Ch., Sussmann R. Product validation and algorithm selection report (PVASR) // ESA Climate Change Initiative (CCI). Final report. 22 August. 2012. <http://www.esa-ghg-cci.org/?q=node/95>.

Parker P., Boesch H., Cogan A., Fraser F., Feng L., Palmer P.I., Deutscher N., Griffith D.W.T., Notholt J., Wennberg P.O., Wunch D. Methane observations from the Greenhouse Gases Observing SATellite: Comparison to ground-based TCCON data and model calculations // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. № L15807. doi: 10.1029/2011GL047871.

Pougatchev N.S., Connor B.J., Rinsland C.P. Infrared measurements of the ozone vertical distribution above Kitt Peak // J. Geophys. Res. 1995. V. 100. P. 16689–16697.

Razavi A., Clerbaux C., Wespes C., Clarisse L., Hurtmans D., Payan S., Camy-Peyret C., Coheur P.F. Characterization of methane retrievals from the IASI space-borne sounder // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. P. 7889–7899.

Rinsland C.P., Jones N.B., Connor B.J., Logan J.A., Pougatchev N.S., Goldman A., Murcray F.J., Stephen T.M., Pine A.S., Zander R., Mahieu E., Demoulin P. Northern and southern hemisphere ground-based infrared spectroscopic measurements of tropospheric carbon monoxide and ethane // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. P. 28197–28217.

Rothman L.S., Jacquemarta D., Barbe A., Chris Benner D., Birk M., Brown L.R., Carleer M.R., Chackerian Jr.C., Chance K., Couderth L.H., Danaï V., Devic V.M., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Hartmann J.-M., Jucks K.W., Makim A.G., Mandin J.-Y., Massie S.T., Orphal J., Perrin A., Rinsland C.P., Smith M.A.H., Tennyson J., Tolchenov R.N., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanas P., Wagner G. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2005. V. 96. P. 139–204. <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/>.

Saitoh N., Touno M., Hayashida S., Imasu R., Shiomi K., Yokota T., Yoshida Y., Machida T., Matsueda H., Sawa Y. Comparisons between XCH₄ from GOSAT shortwave and thermal infrared spectra and aircraft CH₄ measurements over Guam // Sci. Online Lett. Atmos. 2012. V. 8. P. 145–149. doi: 10.2151/sola.2012-036.

Schepers D., Guerlet S., Butz A., Landgraf J., Frankenberg C., Hasekamp O., Blavier J.-F., Deutscher N.M.,

- Griffith D.W.T., Hase F., Kyro E., Morino I., Sherlock V., Sussmann R., Abenet I. Methane retrievals from Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) shortwave infrared measurements: Performance comparison of proxy and physics retrieval algorithms // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. № D10307. doi: 10.1029/2012JD017549.
- Sepulveda E., Schneider M., Hase F., Garcia O.E., Gomez-Pelaez A., Dohe S., Blumenstock T., Guerra J.C. Long-term validation of tropospheric column-averaged CH₄ mole fractions obtained by mid-infrared ground-based FTIR spectrometry // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 1425–1441.
- Solomon S. et al. The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2007.
- Sussmann R., Stremme W., Buchwitz M., de Beek R. Validation of ENVISAT/SCIAMACHY columnar methane by solar FTIR spectrometry at the Ground-Truthing Station Zugspitze // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 2419–2429.
- Sussmann R., Forster F., Rettinger M., Jones N. Strategy for high-accuracy-and-precision retrieval of atmospheric methane from the mid-infrared FTIR network // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 1943–1964.
- Tanaka T., Miyamoto Y., Morino I., Machida T., Nagahama T., Sawa Y., Matsueda H., Wunch D., Kawakami S., Uchino O. Aircraft measurements of carbon dioxide and methane for the calibration of ground-based high-resolution Fourier Transform Spectrometers and a comparison to GOSAT data measured over Tsukuba and Moshiri // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5. P. 2003–2012.
- Weather Web.* University of Wyoming, College of Engineering and Applied Science. 2013. <http://weather.uwyo.edu>.
- Wecht K.J., Jacob D.J., Wofsy S.C., Kort E.A., Worden J.R., Kulawik S.S., Henze D.K., Kopacz M., Payne V.H. Validation of TES methane with HIPPO aircraft observations: implications for inverse modeling of methane sources // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 1823–1832.
- Wunch D., Toon G., Blavier J.-F.L., Washenfelder R.A., Notholt J., Connor B.J., Griffith D.W.T., Sherlock V., Wennberg P.O. The Total Carbon Column Observing Network (TCCON) // *Philos. Trans. R. Soc.* 2011. V. A369. № 1943. P. 2087–2112.
- Xiong X., Barnett C.D., Zhuang Q., Machida T., Sweeney C., Patra P.K. Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. № D19309. doi:10.1029/2009JD013796.
- Yang Z., Toon G.C., Margolis J.S., Wennberg P.O. Atmospheric CO₂ retrieved from ground-based near IR solar spectra // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 9. doi: 10.1029/2001GL014537.
- Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N., Kikuchi N., Nobuta K., Tran H., Morino I., Yokot T. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectra observations by the Greenhouse gases observing satellite // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. P. 717–734. doi: 10.5194/amt-4-717-2011.

Comparisons of Satellite (GOSAT) and Ground-Based Fourier Spectroscopic Measurements of Methane Content near Saint-Petersburg

M. V. Makarova, N. M. Gavrilov, Yu. M. Timofeev, A. V. Poberovskii

Saint-Petersburg State University

We made comparisons of atmospheric column mean mole fractions of methane measured with hyper-spectral methods of ground-based Fourier-transform spectroscopy at the Physical Department of Saint-Petersburg State University (59.9° N, 29.8° E) in years 2009–2012 with similar data obtained with the Japanese GOSAT satellite. The average methane mole fractions X_{CH_4} from GOSAT data version V01.xx are by 17–21 ppb less than the corresponding values obtained from ground-based measurements and their standard deviation are ~13 ppb. For the GOSAT data version V02.xx these average differences are ~2 ppb and the standard deviations are ~18 ppb. This corresponds to the differences between X_{CH_4} measured with GOSAT satellite and ground based networks of Fourier spectroscopic observations TCCON and NDACC.

Keywords: CH₄, atmospheric methane, total content, ground-based measurements, FTIR spectroscopy, GOSAT satellite, comparison, validation

СИСТЕМА ОБРАБОТКИ САМОЛЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ПО ДАННЫМ ВЫСОКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

© 2013 г. В. В. Козодеров¹*, Е. В. Дмитриев², В. П. Каменцев³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт вычислительной математики РАН, Москва

³Тверской государственный университет

*E-mail: vkozod@mail.ru

Поступила в редакцию 18.12.2012 г.

Создаваемая аппаратно-программная система распознавания природно-техногенных объектов по данным самолетного гиперспектрального зондирования реализует полетные задания на выбранных маршрутах съемки и вычислительные процедуры решения возникающих прикладных задач в процессе обработки данных. Показаны основы распознавания объектов по получаемым изображениям высокого спектрального и пространственного разрешения в математических терминах множеств участков и меток, а также взаимных связей отдельных элементов разрешения (пикселей) для выбранных классов объектов. Демонстрируются особенности минимизации энергии обрабатываемой сцены как некоторой целевой функции оптимизации вычислений и регуляризации решения рассматриваемых задач как теоретической основы различения классов объектов при наличии границ между ними. Приведены примеры формирования информационных слоев регистрируемых спектров для выделенных “чистых пород” сосновых и березовых насаждений с выделением освещенных и затененных пикселей, что способствует повышению точности решения задачи распознавания объектов при обработке указанных изображений.

Ключевые слова: гиперспектральные аэрокосмические изображения, обработка данных, распознавание природно-техногенных объектов, вычислительные процедуры

DOI: 10.7868/S0205961413060043

ВВЕДЕНИЕ

Появление аппаратуры гиперспектрального аэрокосмического зондирования ознаменовало новый этап в распознавании природно-техногенных объектов с точки зрения расширения приложений методов вычислительной математики для решения возникающих прикладных задач. Информационные возможности такой аппаратуры (сотни спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной (БИК) областях) до конца не ясны, но увеличение числа соответствующих каналов должно способствовать повышению точности распознавания объектов. Преимущества систем дистанционного зондирования (ДЗ) высокого пространственного разрешения видятся их разработчикам в том, что становится возможным описать текстуру изображений – пространственное распределение освещенных и затененных элементов разрешения (пикселей). Самолетные системы могут обеспечить одновременно высокое спектральное и пространственное разрешение получаемых изображений, что создает условия для автоматизации процесса их обработки по спектральным и текстурным признакам с использованием высокопроизводительных вычислительных средств. Создаваемый аппаратно-программный комплекс вбирает в себя исследования по оценке

информационного содержания данных (учет калибровки аппаратуры, отношений “сигнал/шум” и др.) и алгоритмическое обеспечение решения задач распознавания объектов и оценки параметров, характеризующих состояние этих объектов.

Современная обработка оптических изображений высокого спектрального и пространственного разрешения немыслима без использования компьютерных средств. Возникла даже специальная дисциплина, названная “компьютерным видением” в том смысле, что отображение получаемых цифровых данных аэрокосмической съемки требует использования критериев оптимизации информационной продукции обработки этих данных (Li, 1995). Речь идет о том, что при формировании изображений всегда существуют различные неопределенности – такие, как влияние шумов аппаратуры и искажений атмосферы как рассеивающей и поглощающей среды. Несовершенство измерительных комплексов, реальные условия съемки через атмосферу, другие факторы деградации изображений служат источниками неопределенностей интерпретации регистрируемых данных. Точные или совершенные решения проблемы интерпретации данных оптического зондирования вряд ли существуют. Поэтому говорят об оптимальных решениях, предполагая многокритери-

альные правила учета влияния различных факторов в процессе принятия решений.

Одним из первых исследований по распознаванию объектов на оптических изображениях была работа (Дуда, Харт, 1976). Другой подход был связан с учетом искажений, вносимых атмосферой как помехой между приемниками излучения и объектами земной поверхности (Козодеров, 1978). Этот подход стали называть атмосферной коррекцией космических изображений и спектров (Козодеров, 1983). Он развивался в направлении разработки моделей, алгоритмов и расчетных программ обработки многоспектральных космических изображений почвенно-растительного покрова (Curran et al., 1990) с учетом влияния атмосферы (Kondratyev et al., 1992). Были реализованы методы космического землеведения – междисциплинарного направления научных исследований и технологических разработок в области исследований Земли из космоса (Козодеров и др., 1998, 2000). Были показаны ограничения используемой теории переноса излучения в системе “земная поверхность–атмосфера” (Козодеров, 2006) и создано программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных гиперспектрального зондирования (Козодеров, Дмитриев, 2010).

Одновременно развивались модели обработки данных ДЗ с акцентом на распознавание объектов (Jain, 1981). Это направление прошло путь от восстановления изображений при наличии шумов (Geman, Geman, 1984) через классификацию многоспектральных изображений высокого пространственного разрешения (Olsen et al., 2002) до современных представлений о контекстуальном распознавании объектов с учетом контуров их границ как нечетких (fuzzy) множеств (Tso, Olsen, 2005). Эти два направления исследований (модели формирования уходящего излучения, регистрируемого аппаратурой ДЗ, и модели описания многомерного признакового пространства спектральных данных вместе с выбором информационных мер близости точек этого пространства) объединились, символизируя единство разных уровней обработки данных. Более низкий уровень характеризует математический аппарат анализа регулярных структур объектов земной поверхности при наличии шумов, более высокий уровень соответствует смысловому группированию признаков и регуляризации обратных задач восстановления параметров этих объектов.

К настоящему времени сформировалась область междисциплинарных исследований, связанных с оптимизацией обработки пространственных изображений в таких областях, как восстановление и реконструкция изображений (Hung et al., 1991), стерео, движение и оптический поток (смаз изображений) (Ullman, 1979), анализ текстуры (Cross, Jain, 1983), обнаружение реальных и ложных контуров границ объектов (Tan et al., 1992), смысловое группирование объектов (Herault, Nogaud, 1993), распознавание групп объектов

(Friedland, Rosenfeld, 1992). Во всех этих примерах решение проблемы видения позиционируется как нахождение оптимума некоторой целевой функции обработки изображений. Оптимизация достигается определенной трансформацией изображений, которая формулируется в терминах вероятностных характеристик, таких, как правдоподобие (Haralik, Shapiro, 1992), операторов типа производных от нормальных (гауссовских) распределений. Вывод этих операторов основан на принципах регуляризации решений, когда минимизируется, например, функция энергии наблюдаемой сцены (Poggio et al., 1985).

Цель настоящей публикации – рассмотрение общего подхода к распознаванию природно-техногенных объектов с учетом ранее проведенных исследований по обработке гиперспектральных самолетных изображений (ГСИ) (Kozoderov, Dmitriev, 2011) на основе спектральных признаков распознавания лесных экосистем разного породного состава (Козодеров, Дмитриев, 2012). Аппаратная часть создаваемой системы обработки данных гиперспектрального зондирования реализуется на примере летных испытаний аппаратуры, разработанной НПО “Лептон”. Эта часть включает в себя сбор и систематизацию получаемых данных самолетного зондирования вместе с данными наземных обследований выбранной территории (Козодеров и др., 2012). Программная часть создаваемой системы состоит в отработке алгоритмического обеспечения обработки систематизированных данных ДЗ и наземных обследований.

При этом в дополнение к прежним результатам используются современные представления о том, что высокое пространственное разрешение обрабатываемых изображений требует понимания контекстуальной информации для выбранных классов объектов. Контекст характеризуется воздействием соседних пикселей для заданного класса объектов. Например, объект “лесная растительность определенного породного состава” относится к одному классу до тех пор, пока не появится граница с другим объектом. Свечение или подсвечка отдельных элементов разрешения заданного класса на обрабатываемом изображении может зависеть от специфической ориентации фитоэлементов, формирующих соответствующие пиксели (за счет освещенных и затененных элементов, возможного дрожания отдельных листьев при воздействии ветра, их увлажнение, отличающееся от соседних элементов). Это типичные условия формирования ГСИ при их пространственном разрешении около 1 м и при числе спектральных каналов около 200. С точки зрения рассмотрения выбранного класса объектов указанные пиксели формируют шумы, подлежащие сглаживанию для повышения точности распознавания. Соответственно учет контекста (влияния соседних элементов в пределах заданного класса объектов) способствует улучшению распознавания объектов. Простейший способ учета контекста –

голосование большинства о принадлежности объекта к конкретному классу в пределах “окна” определенных размеров, обычно применяется после попиксельной классификации объектов по спектральным признакам. Более изящный способ — применение Марковских случайных полей для определения влияния соседних пикселей при получении оценок априорной вероятности соответствующих классов объектов на обрабатываемом изображении (Bolton, Gader, 2009).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В приложениях теории видения рассматриваются участки (sites, множество S ; это не обязательно множество всех пикселей изображения, а например, точка или целая область в евклидовом пространстве) и метки классов (labels, множество L ; “расцветка” помеченных пикселей). Отдельная метка — это событие, которое может произойти на выбранном участке. Множество $f = \{f_1, \dots, f_m\}$ дает помеченные участки на множестве S в терминах меток на множестве L . Говорят о дискретном или непрерывном отображении (mapping) множества участков на множестве меток

$$f: S \rightarrow L.$$

В некоторых случаях допустимые метки могут не быть общими для всех тестовых участков. Возникает проблема соответствия (matching) характерных признаков (features) исследуемым объектам. Этими признаками могут быть точки, линии и “регионы” (замкнутые области). Поэтому и возникает проблема соответствия одного и того же типа объектов на обрабатываемом изображении тем же типам модельных признаков.

В математических терминах регулярности и непрерывности проблема меток (labeling problem) при обработке аэрокосмических изображений обычно рассматривается в виде следующих четырех характерных примеров:

- 1) регулярные участки с непрерывными метками;
- 2) регулярные участки с дискретными метками;
- 3) нерегулярные участки с дискретными метками;
- 4) нерегулярные участки с непрерывными метками.

Пример 1 характеризует вычислительные процедуры восстановления или сглаживания отдельного изображения при его искажениях за счет шума или других эффектов, когда множество S соответствует всем пикселям изображения, а множество L задано на конкретном интервале непрерывного изменения градиентной яркости пикселей.

Пример 2 относится к многоспектральным изображениям, когда также следует построить набор “правильных” изображений по искаженным входным сигналам этих изображений. Отличие здесь от предшествующего примера — в наличии только дискретных меток. В частности, процедура так называемой сегментации, широко используемая в технологиях географических информационных систем (ГИС) при обработке изображе-

ний для отдельных их частей (регионов), также относится к примеру 2. Все пиксели изображения в пределах каждого такого региона, которые могут быть разными по тону, текстуре и т.д., характеризуются одной меткой (помечаются, например, одним и тем же цветом). Исходным предположением во всех случаях примера 2 является то, что регистрируемый сигнал считается непрерывным, но сюда же относится и проблема обнаружения резких перепадов яркости или разрывов (edges) при существенном различии двух соседних пикселей на изображении.

Смысловое группирование (perceptual grouping) происходит в случае примера 3. Участки соответствуют здесь первоначально сегментированным признакам (точки, линии, регионы), которые нерегулярно распределены. Такие фрагментарные признаки могут быть осознанно организованы в другие признаки, между каждой парой которых назначается метка “связано—отсутствие связи”. Упомянутая выше проблема соответствия (matching) также относится к примеру 3.

Оценка положения из множества соответствий формулируется в примере 4. Участок означает заданное соответствие, а метка представляет собой допустимую трансформацию (ортогональное, аффинное или другое преобразование).

Категория соседей и связей между соседними пикселями (замыканий, cliques) характеризует заданный класс объектов в дополнение к указанным участкам и меткам. Пара множеств участков S и соседей N символически записывается как граф: $(S, M) \sim G$, когда множество таких участков содержит узлы (nodes) и связи (links) для соседних элементов. Для такого графа вводится условие замыкания c (clique) как подмножество участков на множестве S . Это условие может относиться к отдельному участку $c = \{i\}$, к паре участков $c = \{i, i'\}$ и т.д. Тип замыкания для графа (S, M) на регулярной решетке определяется его размером, формой и ориентацией. Рассматривается система соседства первого порядка и более высоких порядков с разными уровнями замыкания. Для нерегулярных участков система замыканий уже не имеет фиксированной формы и носит более усложненный характер.

В соответствии с работой (Козодеров, 2012) контекстуальное распознавание выбранных классов объектов сводится к использованию понятия соседних элементов при рассмотрении известного из статистической физики вероятностного распределения Гиббса для набора случайных переменных $f \in F$

$$P(f) = \exp[-U(f)/T]/Z,$$

где

$$U(f) = \sum_{c \in C} V_c(f)$$

— функция энергии, равна сумме потенциалов замыкания $V_c(f)$ на множестве C ;

$$Z = \sum_{f \in F} \exp[-U(f)/T]$$

– константа нормализации, называемая функцией разделения; T – постоянная величина (температура, здесь и далее равна 1).

Отметим, что в статистической физике совместное распределение $P(f)$ есть вероятность появления конкретной конфигурации помеченного “образа” объекта f : более вероятные конфигурации – те, которые имеют более низкие энергии. Температура T контролирует резкость распределения: при высокой температуре все конфигурации стремятся к равномерному распределению; вблизи нулевой температуры распределение концентрируется вблизи глобального минимума энергии. Контекст определяется локально в терминах условных вероятностей

$$P(f_i | \{f_{i'}\}),$$

где $\{f_{i'}\}$ означает множество меток на других участках $i' \neq i$. При независимости меток друг от друга (отсутствие контекста) совместное распределение выражается через произведение локальных вероятностей:

$$P(f) = \prod_{i \in S} P(f_i).$$

Только в этом случае условная вероятность приравнивается к общей вероятности:

$$P(f_i | \{f_{i'}\}) = P(f_i).$$

При наличии контекста метки становятся взаимно зависимыми, и теория Марковских случайных процессов (МСП) обеспечивает основу решения возникающих задач.

Если обозначить через $d = \{d_1, \dots, d_n\}$ обрабатываемое изображение, состоящее из n пикселей как случайных полей, и через $f = \{f_1, \dots, f_n\}$ понимание того, к какому классу объектов f_i принадлежит каждый пиксел i , то известная Байесовская парадигма (Besag, Green, 1993) увязывает следующие условные вероятности (в общем случае f и d – вектор-функции от аргументов x – пикселей изображения):

$$P(f|d)P(d) = P(d|f)P(f).$$

Типичным для такой классификации объектов является решение, основанное на нахождении максимума апостериорной вероятности

$$f^* = \arg \max_f [P(d|f)P(f)].$$

Условная вероятность $P(d|f)$ обычно моделируется в терминах Гауссовского распределения метода максимального правдоподобия, а априорная вероятность $P(f)$ – с помощью Марковских случайных полей (МСП) с учетом влияния соседних пикселей.

Модель МСП строится исходя из следующего выражения для априорной вероятности,

$$P(f) = P(f_i | f_{S - \{i\}}) = P(f_i | f_{N_i}),$$

где f_{N_i} обозначает все локальные соседние пиксели относительно пикселя i ; $S - \{i\}$ – разностное множество всех пикселей, за исключением i .

При такой постановке задачи поиск минимума функции энергии $E(f|d)$ обрабатываемой сцены на изображении сводится к определенным предположениям относительно решения f при наличии наблюдений d и возможном наличии параметров θ в соответствующем распределении, так что

$$f^* = \arg \min_f E(f|d, \theta).$$

Производные модельной функции $f(x)$ яркости объектов на одноканальном изображении или спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) на ГСИ характеризуют априорные предположения относительно аналитических свойств этой функции. Если она постоянна для всех пикселей заданного класса объектов $f(x) = a_0$ (говорят о плоской поверхности), т.е. производная $f'(x) = 0$, то имеем дело с априорной энергией однородной струны (в двумерном случае мембраны)

$$U(f) = \int [f'(x)]^2 dx.$$

Энергия имеет равный нулю минимум для такой упрощенной модели или положительна в противном случае. Как нетрудно видеть, в дискретном случае такой двухточечной системы содействия энергия равна

$$U(f) = \sum_i [f_i - f_{i-1}]^2.$$

При возможном априорном предположении о постоянстве градиента яркостей для изображения или отдельных его сегментов $f(x) = a_0 + a_1 x$, $f''(x) = 0$ можно получить другое выражение для энергии

$$U(f) = \int [f''(x)]^2 dx.$$

Возможно также априорное предположение о постоянстве кривизны, соответствующей поверхности $f'''(x) = 0$, $U(f) = \int [f'''(x)]^2 dx$ и т.д. Порядок производной определяет число соединяемых участков (например, при $n = 1$ сглаживается только пара участков).

Если для каждого пикселя i наблюдение есть “истина” плюс независимый гауссовский шум $d_i = f_i + \varepsilon_i$, где ε_i характеризуется средним значением яркости выбранного класса объектов и среднеквадратическим отклонением σ_i^2 , то для известной плотности распределения

$$p(d|f) = \left[\prod_{i=1}^m (2\pi\sigma_i^2)^{-1/2} \right] \exp[-U(d|f)]$$

энергия правдоподобия равна

$$U(d|f) = \sum_{i=1}^m (f_i - d_i)^2 / (2\sigma_i^2),$$

а апостериорная энергия для такой упрощенной модели плоской поверхности

$$\begin{aligned} E(f) &\equiv U(f|d) = U(d|f) + U(f) = \\ &= \sum_{i=1}^m (f_i - d_i)^2 / (2\sigma_i^2) + \sum_{i=1}^m (f_i - f_{i-1})^2. \end{aligned}$$

В общем случае регуляризованное решение, которое переводит некорректно поставленную задачу (решение может быть неединственным) в

корректно поставленную задачу, получается путем минимизации энергии следующего типа:

$$E(f) = \sum_{i \in A} [f(x_i) - d(x_i)]^2 + \lambda \int_a^b [f^{(n)}(x)]^2 dx,$$

где A – множество индексов выборочных данных, локализация которых дается точками x_i , $\lambda \geq 0$ – весовой фактор при рассмотрении интеграла от квадрата производной указанной функции на интервале $[a, b]$, $n \geq 1$ – порядок производной. Первое слагаемое в правой части характеризует меру близости искомого решения и исходных данных обрабатываемого изображения. Второе слагаемое – собственно регуляризатор, который накладывает априори ограничение на решение по сглаживанию используемых при этом функций. Минимум функции $E(f)$ может достигаться не одновременно для записанных двух слагаемых правой части, параметр λ согласовывает априорные предположения и функцию правдоподобия. При этом достигаемая в процессе минимизации энергии оптимизация вычислительных процедур соответствует правдоподобию измерительных данных и такой аналитической функции преобразования изображений, которая регуляризирует некорректную задачу на основе априорных предположений о свойствах этой функции и ее производных.

Выражение для апостериорной энергии в виде

$$E(f) = \sum_{i \in S} (f_i - d_i)^2 + \lambda \sum_{i \in S} \sum_{i' \in N_i} g(f_i - f_{i'}),$$

где на производную дополнительно введенной функции g накладывается ограничение

$$\lim_{\eta \rightarrow \infty} |g'(\eta)| = \text{const} < \infty,$$

приводит к прекращению сглаживания пикселей на границах объектов и маркировке этих границ. Дальнейшее усложнение гауссовской модели

$$d_i = \varphi(f_i) + \varepsilon_i,$$

где регистрируемые данные d_i зависят уже через функцию φ от модельных данных f_i , и потенциала правдоподобия до

$$V(d_i|f_i) = [\varphi(f_i) - d_i]^2 / (2\sigma_i^2),$$

позволяет строить модели текстур и решать задачи их распознавания.

В итоге создаваемая аппаратно-программная система обработки данных высокого спектрального и пространственного разрешения реализует вычислительные процедуры распознавания объектов в два этапа. На первом этапе производится оконтуривание “объектов интереса”, задание априорной вероятности встречаемости классов и использование метода максимального правдоподобия для нахождения вероятности ошибки распознавания. На втором этапе для каждого пикселя уточняются значения априорной вероятности, осуществляется нахождение границ выделенных классов с регуляризацией получаемых решений и возможным сглаживанием пикселей внутри классов и проводится

распознавание текстур этих классов объектов. Объединение этих этапов способствует повышению точности решения задачи распознавания объектов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Следует отметить, что перспективы развития приложений данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования не только в создании соответствующей аппаратуры, наземных комплексов приема и обработки данных, но и в создании нового программно-алгоритмического обеспечения современных интеллектуальных систем извлечения полезной информации из исходных данных (data mining). Существует определенная иллюзия, что можно использовать готовое программное обеспечение, поставляемое зарубежными фирмами: получаемые информационные продукты приспособлены исключительно к их же системам дистанционного зондирования, для другой аппаратуры (по пространственному и спектральному разрешению, отношению “сигнал/шум”, условиям регистрации данных и т.п.) эти продукты могут быть совсем иными.

Изложенная постановка задачи распознавания объектов позволяет проводить обработку получаемых ГСИ на основе создаваемого оригинального программного обеспечения (Козодеров и др., 2013). В процессе его реализации были учтены все необходимые этапы лабораторных предполетных и летных испытаний аппаратной системы гиперспектрального зондирования на базе НПО “Лептон”. Распознавание по спектральным признакам основывается на вычислительных процедурах разделения заданных априори классов в многомерном признаковом пространстве. Как сказано во введении, для изображений высокого пространственного разрешения требуется также контекстуальное распознавание текстур. В частности, при массовой обработке “свечение” отдельных пикселей заданного класса может восприниматься как шум, учет контекста в этом случае приводит к повышению общей точности распознавания, но отдельно стоит задача обнаружения таких специфических объектов. Аналогично «всплески» в спектральном ходе отдельных пикселей (каждый спектр пикселя формируется с помощью весовых функций составных элементов соответствующих объектов – end-members) относительно окружающего фона могут использоваться для обнаружения таких объектов по спектральным признакам с учетом отношений “сигнал/шум” аппаратуры.

Другое замечание касается того, что в зарубежных открытых публикациях по аэрокосмической гиперспектрометрии идут по пути нахождения некоторых выбранных комбинаций спектральных каналов, как и при обработке данных многоспектрального зондирования. Несмотря на признание более широких возможностей данных гиперспектральной съемки, в реальности при обработке данных организуется поиск некоторых комбинаций

каналов, относящихся к полосам поглощения хлорофилла, другим соотношениям каналов. При этом учитываются далеко не все спектральные каналы, и недооценивается роль методов вычислительной математики, позволяющих проводить оптимизацию каналов на новом уровне. Огромные потоки данных неизбежно ставят проблему их обработки на современных высокопроизводительных многопроцессорных системах.

После этих замечаний рассмотрим некоторые примеры применения изложенных здесь новых подходов к обработке ГСИ с акцентом на ДЗ лесных экосистем разного породного состава и возраста.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Примеры оптимизации каналов гиперспектрального самолетного зондирования и распознавания объектов по спектральным признакам на выбранном тестовом полигоне показаны в работе (Дмитриев, 2013). Здесь приведем примеры выделения информационных слоев регистрируемых гиперспектральной камерой освещенных и затененных фитоэлементов для “чистых выделов” определенного породного состава и возраста.

Рисунок 1 (см. на цветн. вклейках) иллюстрирует возможности объединения отдельных каналов используемой гиперспектральной камеры разработки НПО “Лептон”, г. Зеленоград, что необходимо для оптимизации всего набора спектральных каналов. Оптимизация необходима для понимания реальной информативности используемых каналов. На RGB-синтезированном изображении (рис. 1а) можно видеть слева окраину г. Тверь, справа р. Волга и структуру растительного покрова на противоположном ее берегу. Чисто шумовой канал (рис. 1б) характеризует атмосферные условия в момент съемки. Канал 4 (рис. 1в) позволяет различить очертания городской застройки. Канал 50 (рис. 1г) позволяет видеть увеличение контраста на изображении. Объединение каналов 4–9 (рис. 1д) способствует различению водной территории, что становится еще более заметным при объединении каналов 4–17 с общим спектральным разрешением 4.83 нм (рис. 1е). Наконец, объединение каналов 4–50 с разрешением 19.13 нм (рис. 1ж) еще лучше разрешает пространственную структуру наблюдаемых объектов. Отметим, что оптимизация каналов необходима для автоматизированной обработки данных и не всегда связана с улучшением визуальных свойств обрабатываемого изображения.

При объединении каналов отношение “сигнал/шум” аппаратуры должно возрастать. Однако при осреднении достаточно большого числа каналов сигнал может оказаться искаженным. Дополнительное исследование среднего спектра сцены и доверительных интервалов сигнала и шума показало, что возможно объединение каналов вплоть до 30 нм без существенного уменьшения точности распознавания наблюдаемых объектов. При объединении спектральных каналов с разрешением до 100 нм уже теряется информация, пригодная для

проведения тонкой классификации (например, возраста древостоев).

В работе (Дмитриев, 2013) проиллюстрированы параметры ансамблей СПЭЯ выбранных однородных древостоев (в основном, сосняков и березняков) тестовой территории 4 × 3 км. На этой территории выбрано около 50000 самолетных спектров, относящихся к “чистым выделам”, т.е. участкам приблизительно одного породного состава. Остановимся подробнее на распределении СПЭЯ этих сосняков и березняков разного возраста.

Текстура лесного полога (перемежающиеся освещенные и затененные участки крон, а также межкрупные просветы) формируется в виде пространственного распределения регистрируемых пикселей в пределах указанных выделов. Значения СПЭЯ освещенных участков, для которых аппаратура обеспечивает достаточно высокие значения отношения “сигнал/шум”, определяются в основном оптическими свойствами кроны, текущими атмосферными условиями и высотой Солнца. При более низких значениях указанного отношения и увеличении шумовой составляющей для затененных участков кроны формирование СПЭЯ происходит за счет многократного рассеяния света внутри кроны и спектральных свойств подстилающей поверхности. Для полученных обучающих выборок исходных спектров и спектров, нормированных на их интегральные значения, было произведено разделение пикселей освещенных и затененных участков кроны на определенное количество градаций по интегральной яркости. Оказалось, что по полученным ансамблям спектров можно сформировать для каждой породы и каждого возраста, по крайней мере, три наиболее информативных слоя нормированных СПЭЯ.

На рис. 2 (на цветн. вклейках) представлено распределение нормированных значений СПЭЯ в зависимости от длины волны и возраста преимущественно сосновых (рис. 2а) и березовых (рис. 2б) древостоев. Видно, что для всех возрастов информативный слой, соответствующий пикселям с полностью затененной частью кроны, более выражен в видимом диапазоне и в каналах с центральной длиной волны более 920 нм; для каналов 710 нм и 920 нм наиболее выражен слой освещенной части полога; переходный слой просматривается вблизи длины волны 910 нм. Видно также, что взаимное расположение информационных слоев для сосновых и березовых насаждений близко между собой. Расстояние между слоями определяет информативность спектральных каналов при восстановлении проекционных характеристик соответствующих классов объектов. При слиянии этих информационных слоев каналы будут нечувствительны к изменению плотности полога и сомкнутости крон.

На рис. 3 (на цветн. вклейках) показаны отклонения нормированных значений СПЭЯ от среднего спектра по возрасту для сосновых (рис. 3а) и березовых (рис. 3б) насаждений. Из данных рис. 3а

Рис. 2. Информационные слои нормированных спектров, формируемых пологом: *a* – сосновых и *b* – березовых древостоев различного возраста: синий цвет – затененная часть полога, красный – полностью освещенная часть полога, зеленый – переходная область (пиксел формируется наполовину освещенной и затененной частью полога).

Рис. 3. Отклонение нормированных значений СПЭЯ от среднего спектра по возрасту для пикселей, соответствующих полностью освещенной части пологам: *a* – соснового и *b* – березового.

Рис. 4. Поканальные зависимости нормированных значений СПЭЯ полностью освещенной части пологам: *a* – соснового и *b* – березового. Цвета соответствуют центральным длинам волн спектральных каналов (черный цвет соответствует БИК-диапазону). Слева – все спектры, справа – каналы видимой области спектра.

можно наблюдать, что практически во всех каналах видимого диапазона (вплоть до длины волны 740 нм) имеет место достаточно гладкое возрастание иллюстрируемых величин вплоть до возраста 80 лет (периода спелости). Далее с увеличением возраста эта тенденция выражено меньше, но относительная гладкость зависимости сохраняется. В то же время для ближней ИК-области характерны достаточно сильные колебания, особенно вблизи полос поглощения кислорода (760 нм) и водяного пара (820 нм и др.).

Из данных рис. 3*b* видно возрастание иллюстрируемых величин при движении от молодого возраста древостоев до возраста в 60–70 лет и их стабилизация для спелых древостоев в видимом диапазоне. В ближнем ИК-диапазоне изменения менее значительные, но заметен всплеск вблизи длины волны 710 нм для возраста 50–70 лет.

Данные рис. 4 (на цветн. вклейках) демонстрируют отмеченные на рис. 2 и рис. 3 особенности формирования нормированных спектров. Из данных рис. 4*a* можно видеть, что иллюстрируемые значения СПЭЯ в каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазона имеют различное поведение. В видимой области спектра заметны колебания кривых с периодом около 40 лет, в ближней инфракрасной области эти возрастные колебания более резкие. Имеется необходимость выяснения причин таких колебаний. Иной характер носят кривые рис. 4*b*. Здесь нет таких ярко выраженных колебаний иллюстрируемых кривых, которые носят более монотонный характер в зависимости от возраста древостоев. Эти особенности отличают поведение рассматриваемых спектров для хвойных и лиственных пород в зависимости от возраста древостоев и требуют согласования полученных результатов со специалистами-лесниками.

В заключение можно отметить, что используемые в лесохозяйственной практике категории бонитета лесных насаждений (качества древесины) основаны на информации об их возрасте и высоте древостоев. Как видим, данные гиперспектрального зондирования позволяют увязать выбранные классы породного состава древостоев с их возрастом. Дополнительная установка лидара (лазерного локатора) на ту же гиро-стабилизированную платформу самолетного носителя, на которую установлен гиперспектрометр, будет способствовать повышению точности решаемых прикладных задач оценки состояния лесных экосистем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное внимание при описании создаваемой аппаратно-программной системы обработки данных самолетного гиперспектрального зондирования уделено использованию получаемой информационной продукции для решения региональных прикладных задач. Описан общий подход к распознаванию ГСИ, который объединяет задачу нахождения максимума апостериорной вероятности с максимальным правдоподобием модельных функций распределения и обрабатываемых данных. Показаны характерные особенности формирования информационных слоев регистрируемых спектральных плотностей энергетической яркости от возраста древостоев для освещенных и затененных фитоэлементов хвойных и лиственных пород. Перспективы приложений разработанной системы обработки данных гиперспектрального зондирования – в оптимизации числа каналов для распознавания природно-техногенных объектов с обоснованной точностью при выделении контуров этих объектов и описанию их текстур.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 гг. и грантов РФФИ 11-07-00382, 11-07-12006-офи_м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дмитриев Е.В.* Классификация лесного покрова Тверской области на основе гиперспектральных аэроизображений // Исслед. Земли из космоса. 2013 (в печати).
- Дуда Р., Харт П.* Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 509 с.
- Козодеров В.В.* Оценка искажающего влияния атмосферы при дешифрировании природных образований из космоса // Аэрокосмические исследования Земли. Обработка видеоинформации с использованием ЭВМ. М.: Наука, 1978. С. 24–35.
- Козодеров В.В.* Атмосферная коррекция видеоизображений // Исслед. Земли из космоса. 1983. № 2. С. 65–75.
- Козодеров В.В.* Особенности реализации моделей оценки фитомассы растительности по наблюдениям из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 79–88.
- Козодеров В.В.* Применение данных оптического дистанционного зондирования для изучения природно-климатических процессов // Климат и природа. 2012. Т. 2. № 3. С. 3–16.
- Козодеров В.В.* Вычислительная система обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Сб. тез. научно-техн. конф. “Гиперспек-

- тральные приборы и технологии". ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева", 2013. С. 101–102.
- Козодеров В.В., Дмитриев Е.В.* Аэрокосмическое зондирование почвенно-растительного покрова: модели, алгоритмическое и программное обеспечение, наземная валидация // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 1. С. 69–86.
- Козодеров В.В., Дмитриев Е.В.* Дистанционное зондирование лесного покрова: инновационный подход // Лесной вестник. М: МГУЛ, 2012. Т. 1. № 84. С. 19–33.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персев И.В., Щербаков М.В.* Обработка данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 3–11.
- Козодеров В.В., Косолапов В.С., Садовничий В.А., Тимошин О.А., Тищенко А.П., Ушакова Л.А., Ушаков С.А.* Космическое земледование: информационно-математические основы / Под ред. В.А. Садовничего. М.: МГУ, 1998. 576 с.
- Козодеров В.В., Садовничий В.А., Ушакова Л.А., Ушаков С.А.* Космическое земледование: диалог природы и общества. Устойчивое развитие / Под ред. В.А. Садовничего. М.: МГУ, 2000. 640 с.
- Besag J., Green P.J.* Spatial statistics and bayesian computation // J. Royal Stat. Soc. Ser. B. 1993. V. 55. № 1. P. 25–37.
- Bolton J., Gader P.* Random set framework for context-based classification with hyperspectral imagery // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2009. V. 47. № 11. P. 3810–3821.
- Cross G.C., Jain A.K.* Markov random field texture models // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1983. V. 5. № 1. P. 25–39.
- Curran P.J., Foody G.M., Kondratyev K.Ya., Kozoderov V.V., Fedchenko P.P.* Remote sensing of soils and vegetation in the USSR. L.: Taylor and Francis, 1990. 203 p.
- Friedland N.S., Rosenfeld A.* Compact object recognition using energy-function based optimization // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1992. V. 14. P. 770–777.
- Geman S., Geman D.* Stochastic relaxation Gibbs distributions and the Bayesian restoration of the image // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1984. V. 6. № 6. P. 721–741.
- Haralick R.M., Joo H., Lee C., Zhuang X., Vaidya V., Kim M.* Pose estimation from corresponding point data // IEEE Trans. Sys., Man and Cybern. 1989. V. 19. P. 1426–1446.
- Herault L., Horaud R.* Figure-ground discrimination: A combinatorial optimization approach // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1993. V. 15. P. 899–914.
- Hung Y.P., Cooper D.B., Cernuschi-Frias B.* Asymptotic Bayesian surface estimation using an image sequence // Int. J. Comp. Vis. 1991. V. 6. № 2. P. 105–132.
- Jain A.K.* Advances in mathematical models in image processing // Proc. IEEE. 1981. № 69. P. 502–528.
- Kondratyev K.Ya., Kozoderov V.V., Smokty O.I.* Remote sensing of the Earth from space: atmospheric correction. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 478 p.
- Kozoderov V.V., Dmitriev E.V.* Remote sensing of soils and vegetation: pattern recognition and forest stand structure assessment // Int. J. Rem. Sens. 2011. V. 32. № 3. P. 5699–5717.
- Li S.Z.* Markov random field modeling in computer vision. N.Y.–B.–Heidelberg–Tokyo: Springer-Verlag, 1995, 350 p.
- Olsen R.C., Garner J., Dyke E.V.* Terrain classification in urban wetlands with high-spatial resolution multi-spectral imagery // Proc. SPIE. 2002. V. 4881. P. 686–691.
- Poggio T., Torre V., Koch C.* Computational vision and regularization theory // Nature. 1985. V. 317. P. 314–319.
- Tan H.L., Gelfand S.B., Delp E.* A cost minimization approach to edge detection using simulated annealing // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 1992. V. 14. P. 3–18.
- Tso B., Olsen R.C.* A contextual classification scheme based on MRF model with improved parameter estimation and multiscale fuzzy line process // Rem. Sens. Env. 2005. V. 97. P. 127–136.
- Ullman S.* Relaxation and constraint optimization by local process // Comp. Graph. Image Proc. 1979. V. 10. P. 115–195.

A System of Airborne Remote Sensing Data Processing of High Spectral and Spatial Resolution

V. V. Kozoderov¹, E. V. Dmitriev², V. P. Kamentsev³

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

² Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow

³ Tver State University, Tver

The created apparatus and programmatic system of natural and anthropogenic objects pattern recognition based on airborne hyperspectral remote sensing data realizes the flight tasks on selected routes of survey and computational procedures to solve the emerging applied problems in the data processing procedures. Bases have been revealed of the objects recognition using the processed images of high spectral and spatial resolution in mathematical terms of site and label sets as well as interconnected cliques of separate pixels for the selected object classes. Characteristic features are demonstrated of the energy minimization for a scene under processing as an objective function of optimization of the relevant calculations as well as the solution regularization as a theoretical background of the object class separability having into account the boundaries between the classes. Examples are shown of the information layers selection for the registered spectra related to "the pure species" of the coniferous and birch forests while separating illuminated and shaded pixels. These findings foster the enhancement of the pattern recognition accuracy in the imagery processing procedures.

Keywords: airborne hyperspectral images, data processing, recognition of natural and anthropogenic objects, computational procedures

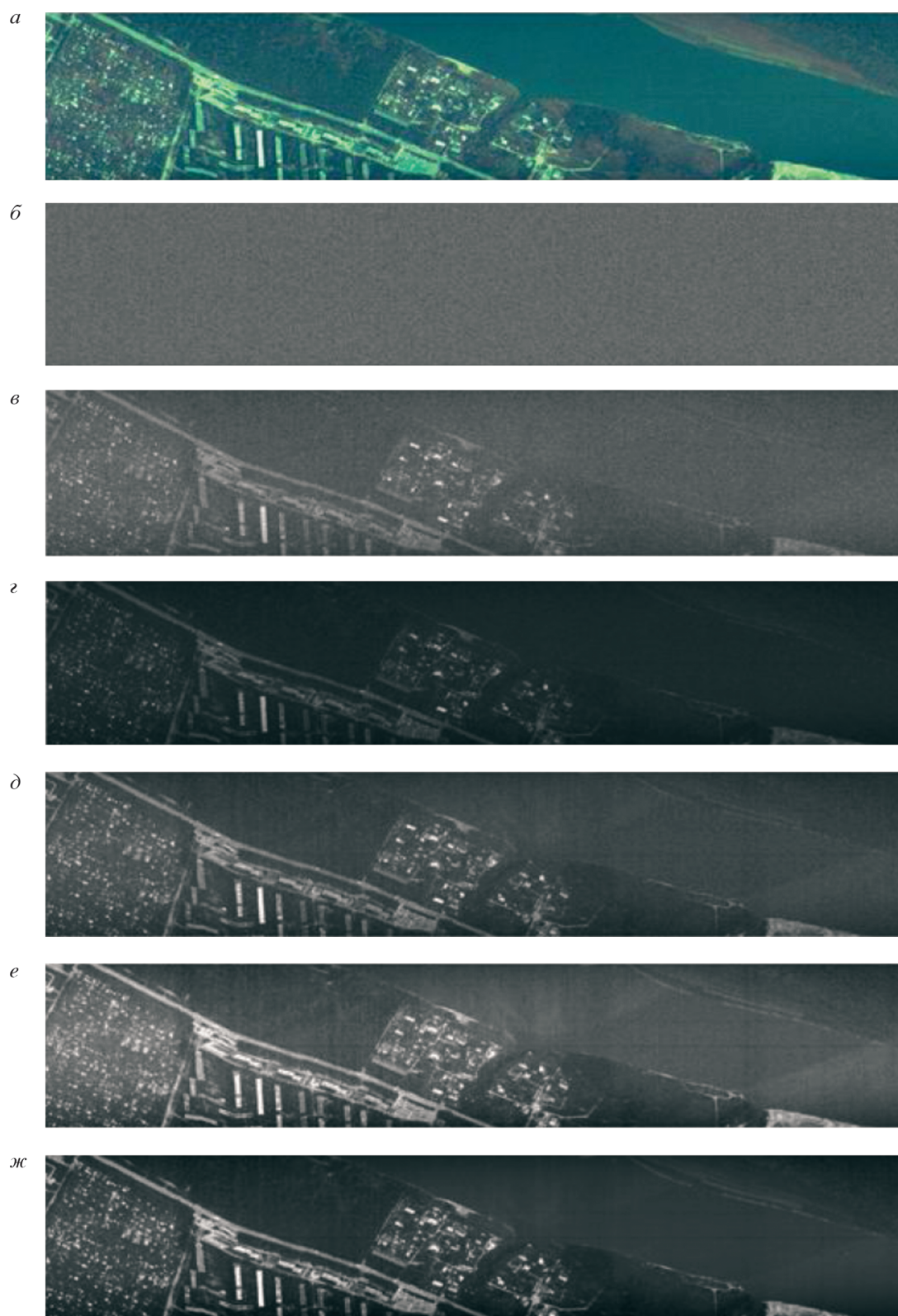
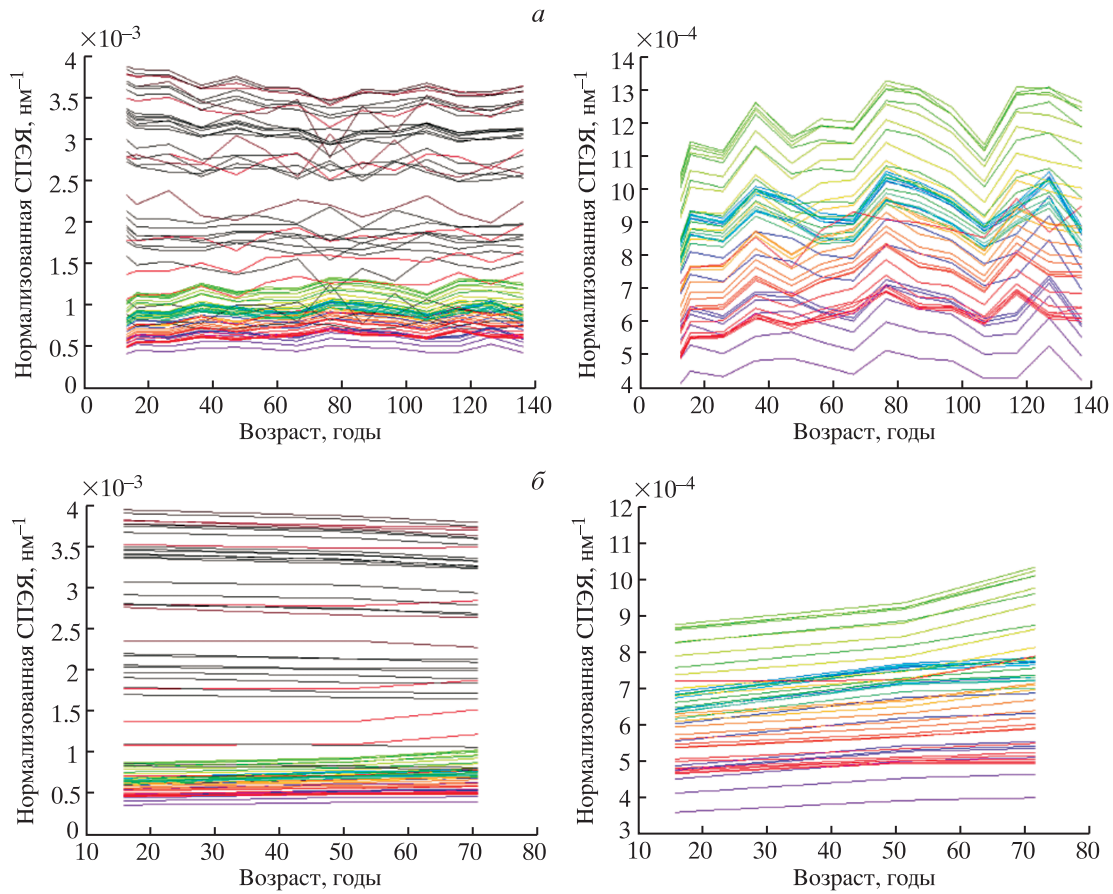
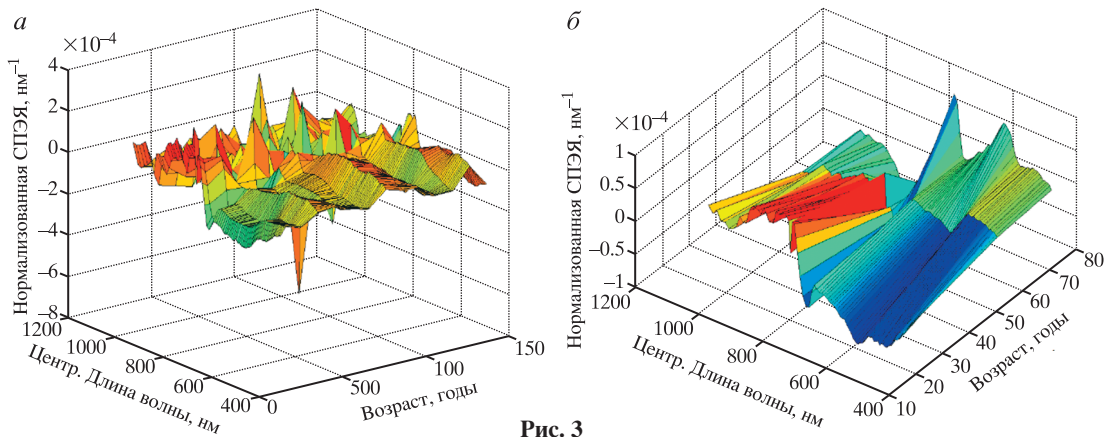
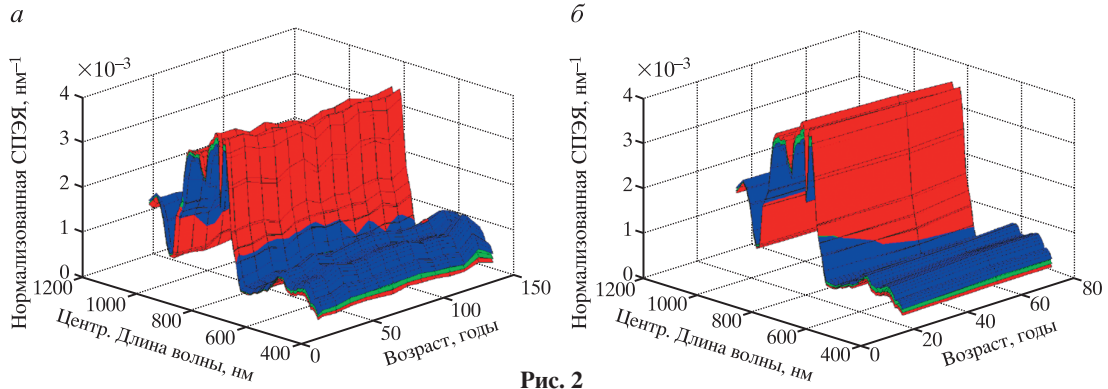


Рис. 1. Пример ГСИ территории вблизи г. Тверь: *а* – RGB-синтезированное изображение; *б* – шумовой канал 1 (400 нм); *в* – канал 4, центральная длина волны (ц.д.в.) 401.79 нм; *г* – канал 50, ц.д.в. 420.92 нм; *д* – объединение каналов 4–9, общее разрешение (о.р.) 1.81 нм; *е* – объединение каналов 4–17, о.р. 4.83 нм; *ж* – объединение каналов 4–50, о.р. 19.13 нм.





АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ САМОЛЕТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2013 г. В. В. Козодеров^{1*}, В. Д. Егоров²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт вычислительной математики РАН, Москва

*E-mail: vkozod@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2013 г.

Предлагается автоматизированная система разделения спектральных плотностей энергетической яркости, регистрируемых аппаратурой гиперспектрального самолетного зондирования, на основе рассмотрения средних спектров и их внутриклассовой изменчивости с разделением пикселей, относящихся к освещенным и затененным элементам кроны деревьев разного породного состава и возраста. В качестве априорных сведений используются картосхемы наземной лесотаксации для выбранной территории самолетного зондирования. Система в автоматизированном режиме на основе выделенных контуров объектов на обрабатываемом изображении формирует базу данных выбранных классов объектов. Демонстрируются возможности различимости этих классов на основе величин смещения спектров при переходе от полосы поглощения хлорофилла к максимуму спектральной отражательной способности растительности.

Ключевые слова: обработка гиперспектральных изображений, распознавание объектов, характерные признаки растительности

DOI: 10.7868/S0205961413060031

ВВЕДЕНИЕ

Основу приложений методов аэрокосмической гиперспектрометрии составляет построение разных типов классификаторов (вычислительных процедур) для распознавания природно-техногенных объектов оценки содержания хлорофилла (основного пигмента листы/хвои) по гиперспектральным изображениям (ГСИ). Качество классификатора зависит как от размера обучающей выборки, так и ценности используемых выборочных данных. Неизбежно возникает задача оптимизации свойств классификатора, т.е. максимизации возможности его применения для обучающего набора данных, который не всегда применим для тестового набора данных, а также его способности к генерализации, т.е. возможным приложениям классификатора для тестовых образов, которые изначально не закладывались на стадии обучения.

Исследования последних лет показали, что данные гиперспектрального аэрокосмического зондирования способствуют улучшению точности распознавания разных типов растительных покровов. От многоканальных приборов, которые позволяют получать изображения земной поверхности на ограниченном числе каналов (обычно не превышающем десяти) в видимой области спектра солнечного излучения и ближнем ИК-диапазоне (БИК), ин-

терес исследовательского сообщества смещается в сторону использования гиперспектральных приборов. Такие системы дистанционного зондирования (ДЗ) содержат до нескольких сот спектральных каналов, ширина которых не превышает нескольких нанометров (в отдельных случаях это может быть 10–20 нм).

Первые приложения данных самолетной гиперспектрометрии носили в значительной степени экологический характер, открывая новые возможности мониторинга загрязнений природной среды от воздействия добычи полезных ископаемых (Collins et al., 1983). Одной из первых специализированных систем дистанционной гиперспектрометрии считается аппаратура Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer – AVIRIS (самолетный спектрометр, дающий изображения в видимой и ИК-областях) (Vane, Goetz, 1988). Аппаратура обеспечивала получение данных синхронно в сотнях спектральных каналов в области длин волн 0.4–2.5 мкм с шириной каждого канала в 10 нм и выше. При таком разрешении в регистрируемых данных проявляются отдельные линии и полосы поглощения солнечного излучения атмосферными газами и другими соединениями: кислородом, озоном, водяным паром и др. Было показано, что полосы поглощения основных при-

родных минералов в горных породах и почвах расположены в области длин волн более 1 мкм. Коротковолновые спектральные каналы полезны с точки зрения оценки состояния растительности.

Отметим следующие научные и прикладные задачи, решаемые с помощью данных гиперспектрального зондирования: улучшение информационного содержания спектральных данных в процессе обнаружения стрессового состояния растительности (Carter, 1998); идентификация малых различий в проективном покрытии вегетирующей растительности (McGwire et al., 1999); изучение биохимических характеристик, таких как содержание азота в растениях (Cogan et al., 1997); различение разных типов растительного покрова (Janetos, Justice, 2000); вариации влажности посевов (Penuelas et al., 1995); определение концентрации пигментов листьев растений (Blackburn, Steele, 1999); моделирование количественных характеристик урожайности с.-х. культур (Thenkabail, 2002); улучшение обнаружения изменений в разреженной растительности (Lyon et al., 1998).

Основная проблема развития возникающих приложений – отсутствие реальных обоснований того, какие объекты можно распознать по данным аэрофотосъемки и по данным многоспектрального и гиперспектрального зондирования в сравнении с теми возможностями, которые реализуются с помощью опытного специалиста-дешифровщика. Роль такого специалиста резко уменьшается при использовании всей совокупности данных сотен каналов гиперспектрального зондирования. Преимущества данных гиперспектрального зондирования над двумя другими упомянутыми типами аэро- и космической съемки – в доказательстве повышения точности распознавания объектов. Кроме того, в прежних приложениях данных ДЗ далеко не всегда требовалась обработка данных в реальном масштабе времени. В новых приложениях возрастает роль автоматизированных систем распознавания объектов по данным гиперспектрального зондирования. В работе (Chang et al., 2001) демонстрируется начальный этап использования параллельных вычислительных алгоритмов распознавания объектов для повышения эффективности обработки ГСИ. Использовались данные аппаратуры AVIRIS и 210-канальной аппаратуры, названной “Экспериментальная аппаратура по сбору цифровых гиперспектральных изображений” (Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment – HYDICE), разработки Военно-морской исследовательской лаборатории (Naval Research Laboratory – NRL) США.

Значительная часть исследований разных видов растительности по данным самолетной гиперспектрометрии традиционно сосредоточена в спектральной области 400–1000 нм. Активно участвуют в создании таких приборов и отече-

ственные разработчики. На протяжении последних лет к опытной эксплуатации гиперспектральной аппаратуры производства НПО “Лептон”, г. Зеленоград, причастны авторы данной статьи. Это гиперспектральные камеры (ГСК), позволяющие получать цифровые попиксельные изображения при установке на самолетные платформы с разрешением не хуже, чем 2–3 м на пиксел изображения с высоты полета самолета в 1–2 км над поверхностью.

В работе (Козодеров, Егоров, 2011) предлагается создание базы данных самолетного гиперспектрального зондирования на основе группирования спектров по величине смещения по длине волны области перехода от основной полосы поглощения солнечного излучения хлорофиллом к максимуму спектральной отражательной способности растительности. В работе (Козодеров и др., 2012) показаны особенности приложений данных гиперспектрального самолетного зондирования для решения задач распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров, характеризующих состояние лесной растительности.

Настоящая публикация посвящена демонстрации результатов автоматизации обработки данных гиперспектральной аппаратуры, содержащей около 290 спектральных каналов, которая устанавливалась на самолетную гиостабилизированную платформу во время летной кампании 2011 г. и позволяла получать изображения зондируемой поверхности. Изображения представляют собой матрицы размером примерно 500 × 10000 пикселей, где 500 – это ширина трека, а 10000 – длина трека, которая определяется включением и выключением гиперспектральной камеры на борту самолета. Параллельно включенный GPS-навигатор дает информацию о начале и конце записи трека с привязкой по широте и долготе местности с точностью до секунды. Около двух десятков таких записанных треков (это несколько десятков гигабайт упакованной информации) используются для предлагаемой автоматизации обработки получаемых ГСИ.

Иллюстрируемые примеры относятся к тестовой территории Тверской обл. С точки зрения географической привязки данных гиперспектральной дистанционной съемки, район интересен тем, что для него существуют достаточно детальные лесотаксационные карты местности, на которых отображен породный состав лесной растительности. Карты эти были построены по данным наземных обследований в форме отдельных кварталов и выделов внутри этих кварталов.

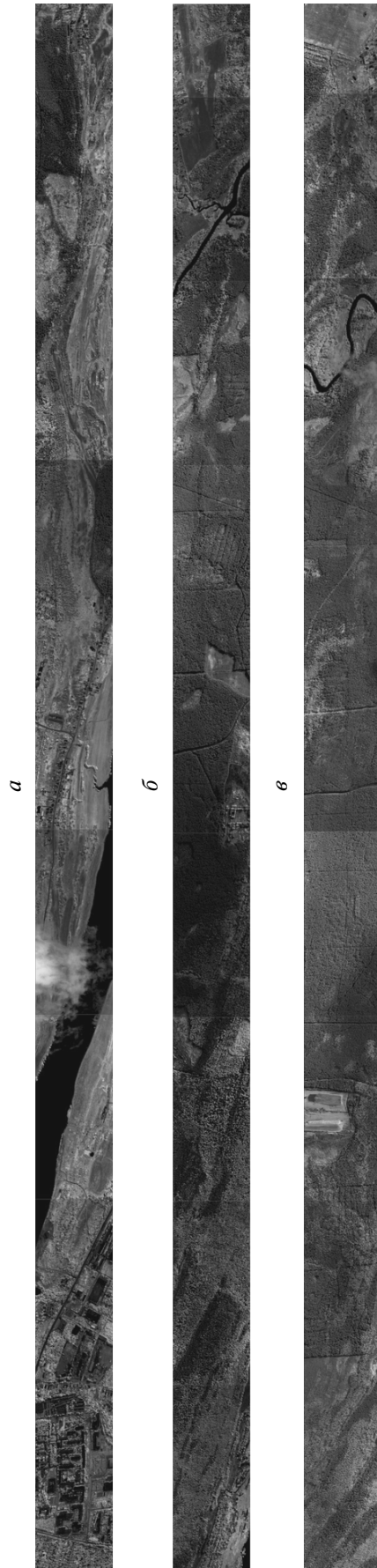


Рис. 1. Изображение трех самолетных треков на канале 278 (длина волны 908.5 нм), полученных 12 августа 2011 г. в три разных момента времени: *а* — 11 ч 04 мин 17 с; *б* — 11 ч 46 мин 25 с; *в* — 11 ч 59 мин 25 с.

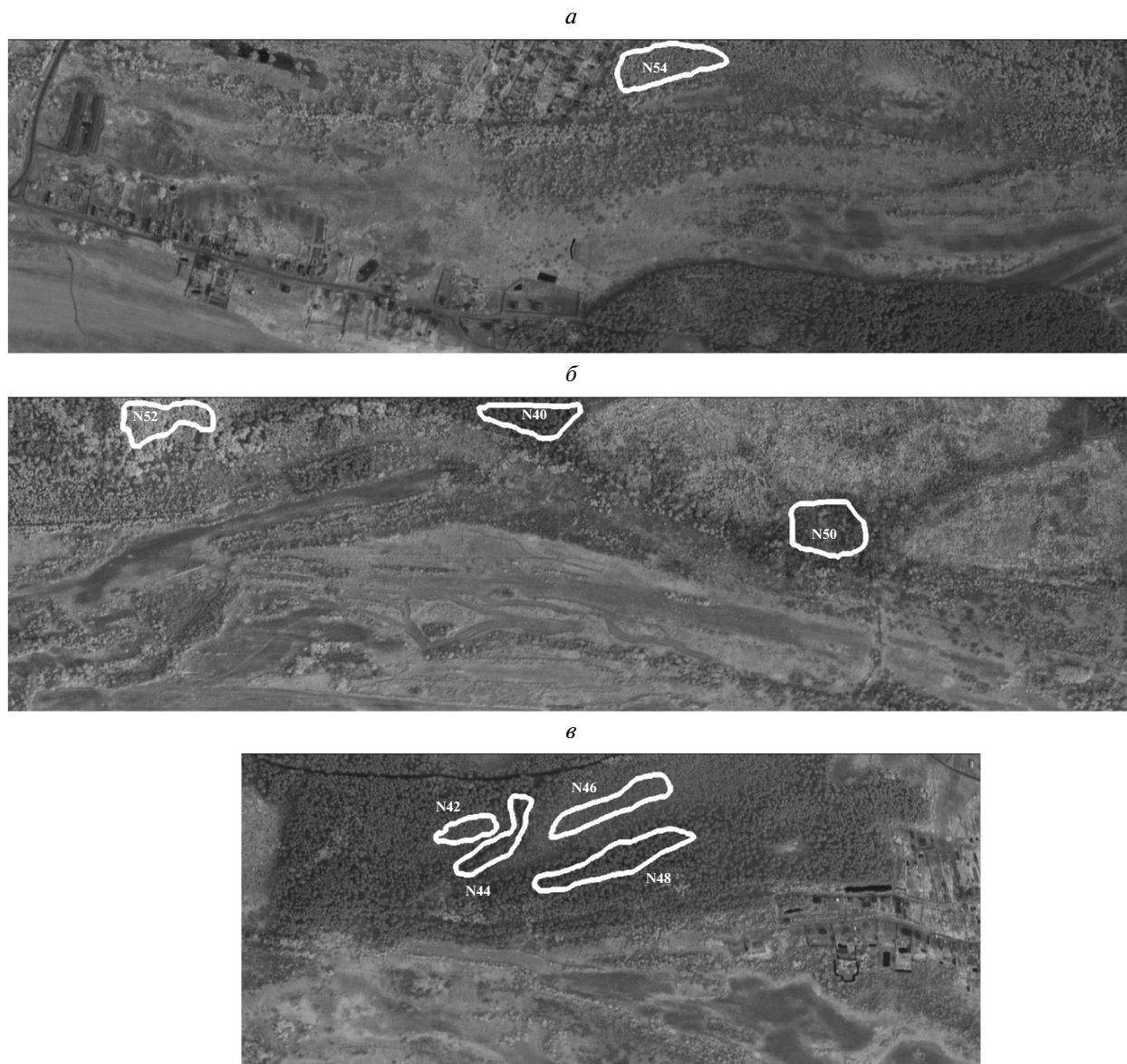


Рис. 2. Фрагменты правой части рис. 1а и контуры участков, выделенных по данным наземной лесотаксации: а – участок № 54, соответствует преобладающим березнякам; б – участки № 52, 40, 50 – соответствуют преобладающим березнякам, соснякам, ельникам; в – участки № 42, 44, 46, 48 – соответствуют преобладающим соснякам разного возраста.

ОСОБЕННОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ

Возможности распознавания природно-техногенных объектов по спектральным признакам основаны на различиях регистрируемых спектральных плотностей энергетической яркости (СПЭЯ) в указанном диапазоне длин волн. Такие объекты, как водные поверхности, открытые почвы, проселочные и шоссейные дороги, разные типы растительности уверенно распознаются разработанными методами. Значительно сложнее различить по спектральному характеру разные типы

лесной растительности. Несмотря на то, что известные кривые спектрального хода, соответствующие разным породам деревьев, различаются между собой (Козодеров, Кондранин, 2008), при самолетной съемке с разрешением 1–3 м на пиксел все спектры (в пределах самолетного трека может содержаться до 5 и более млн спектров) на первый взгляд выглядят весьма похоже. Обработка такого числа спектров традиционными методами представляется весьма проблематичной и затратной по времени. Цель исследований авторов данной публикации – создание эффективной автоматизированной системы обработки данных

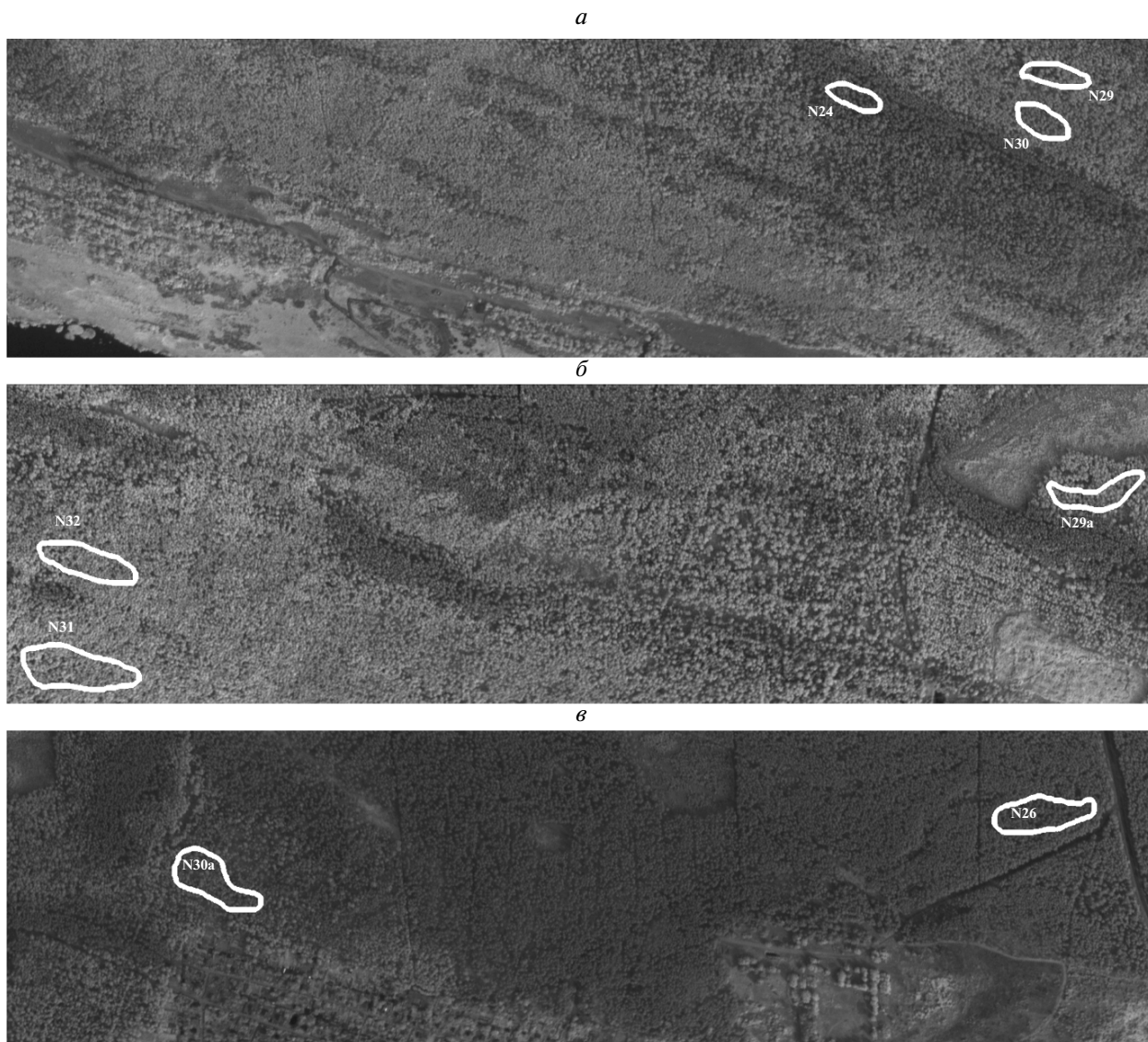


Рис. 3. Фрагменты рис. 1б и контуры участков, выделенных по данным наземной лесотаксации: *а* – участок № 24 с преобладающими сосняками, № 29, 30 – с преобладающими березняками разного возраста; *б* – участки № 29а, 31, 32 с преобладающими березняками разного возраста; *в* – участки № 26, 30а с преобладающими сосняками и березняками; *г* – участок № 33 с преобладающими сосняками; *д* – участки № 25, 34 с преобладающими сосняками разного возраста, № 27, 28 – с преобладающими ельниками, № 35 – с преобладающими березняками.

гиперспектральной съемки, в которой по нажатию кнопки можно было бы обработать спектры с целого участка территории в реальном масштабе времени на обычном современном персональном компьютере.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Результаты функционирования разработанной системы обработки данных гиперспектрального самолетного зондирования иллюстрируются ниже

на примерах трех самолетных треков. Каждый из треков разбит на фрагменты размером примерно в 1 Гбайт, так что трек представляет шесть фрагментов. Это позволяет максимально эффективно использовать память обычного 32-битного (разрядного) персонального компьютера. Если планировать работу так, что обрабатывать спектры с участков лишь одного фрагмента, а после завершения переходить к следующему фрагменту, то скорость работы системы будет максимальна.

Входные данные для системы представляют собой файл из строк (может быть даже текстовым), каждая строка, задающая один спектр, – это несколько чисел, первое число – идентификатор

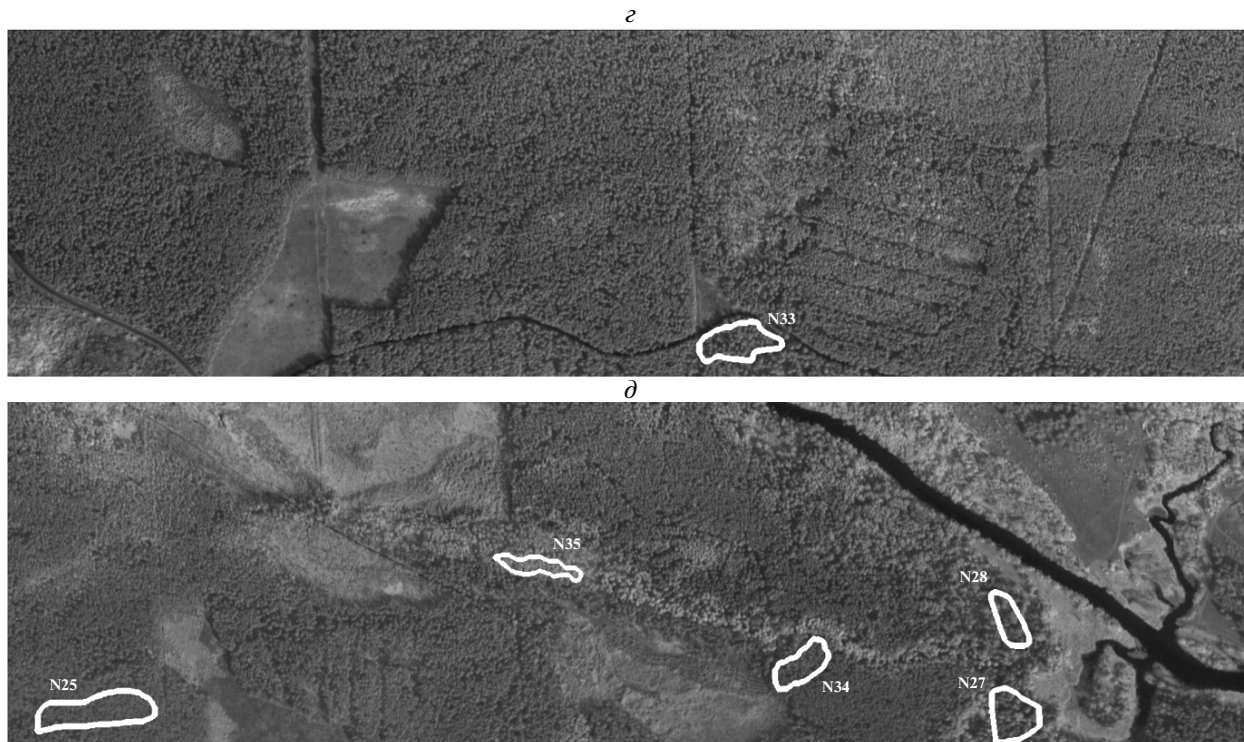


Рис. 3. Окончание.

продолжения счета спектров (если не ноль — переход к следующему спектру — строке входного файла, если ноль — завершение считывания). Система работает так, что не требуется указывать число спектров для обработки, нужно лишь помнить, что одновременно может быть обработано до ста тысяч спектров. Далее в строке задаются числа, определяющие номер трека (1–3), номер фрагмента в треке (1–6) и координаты пиксела во фрагменте (до 500 поперек трека и до целого числа, характеризующего максимальную длину фрагмента). Можно сменить направление считывания изображения вдоль и поперек трека — это определяется отдельным текстовым файлом, где задаются соответственно +1 или -1.

В систему включены некоторые другие сервисные функции, которые кажутся существенными при длительной работе с большими массивами данных. Так, созданы оригинальные программные средства, которые позволяют при очерчивании контура на цифровом изображении участка местности (специальном шаблоне), аналогичном изображению участка трека, считывать координаты всех пикселей либо по периметру контура, либо во внутренней части этого контура. Это позволяет автоматизировать процесс создания файла входных данных для системы обработки спектров. Система ориентирована на вычисление средних значений и дисперсий групп спектров, а также ряда других параметров, таких как смещения каждого спектра или средние смещения групп спектров

по длине волны, которые были использованы авторами при отладке схем распознавания типов подстилающей поверхности. Эта часть созданной автоматизированной системы обработки гиперспектральных данных предполагает постоянное обновление в дальнейшем, если потребуются включать новые критерии распознавания или менять схемы расчета параметров, соответствующих этим критериям.

В автоматическом режиме возможен как цифровой (т.е. ведется запись и исходных спектров, и их средних значений и дисперсий), так и графический вывод посчитанных системой результатов обработки спектров. Для графического вывода используется та же основа, которая применена и при оцифровке координат пикселей с заданного контура цифрового изображения. Эта графическая программная основа постоянно развивается одним из авторов, и была применена ранее при визуализации результатов обработки многоканальных спутниковых данных и далее переработана для использования при обработке данных гиперспектральной съемки (Kozoderov, Egorov, 2011).

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРАБОТАННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Здесь приводятся примеры обработки около 40 участков самолетных треков гиперспектральной самолетной съемки, проведенной в августе

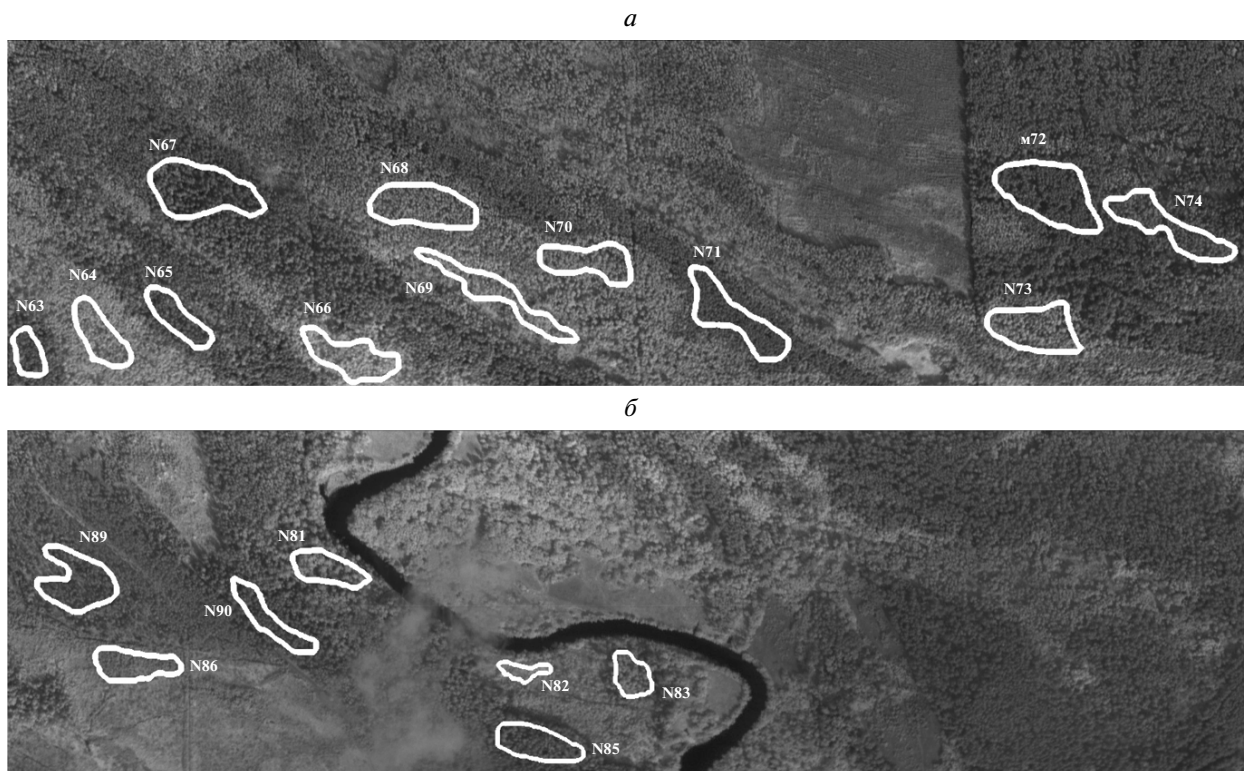


Рис. 4. Фрагменты рис. 1*в* и контуры участков, выделенных по данным наземной лесотаксации: *а* – участки № 63, 65, 67, 71, 72 – соответствуют преобладающим соснякам разного возраста и № 64, 66, 68, 69, 70, 73, 74 – преобладающим березнякам разного возраста; *б* – участки № 85, 86, 89, 90 – соответствуют преобладающим соснякам разного возраста и № 81, 82, 83 – преобладающим березнякам разного возраста.

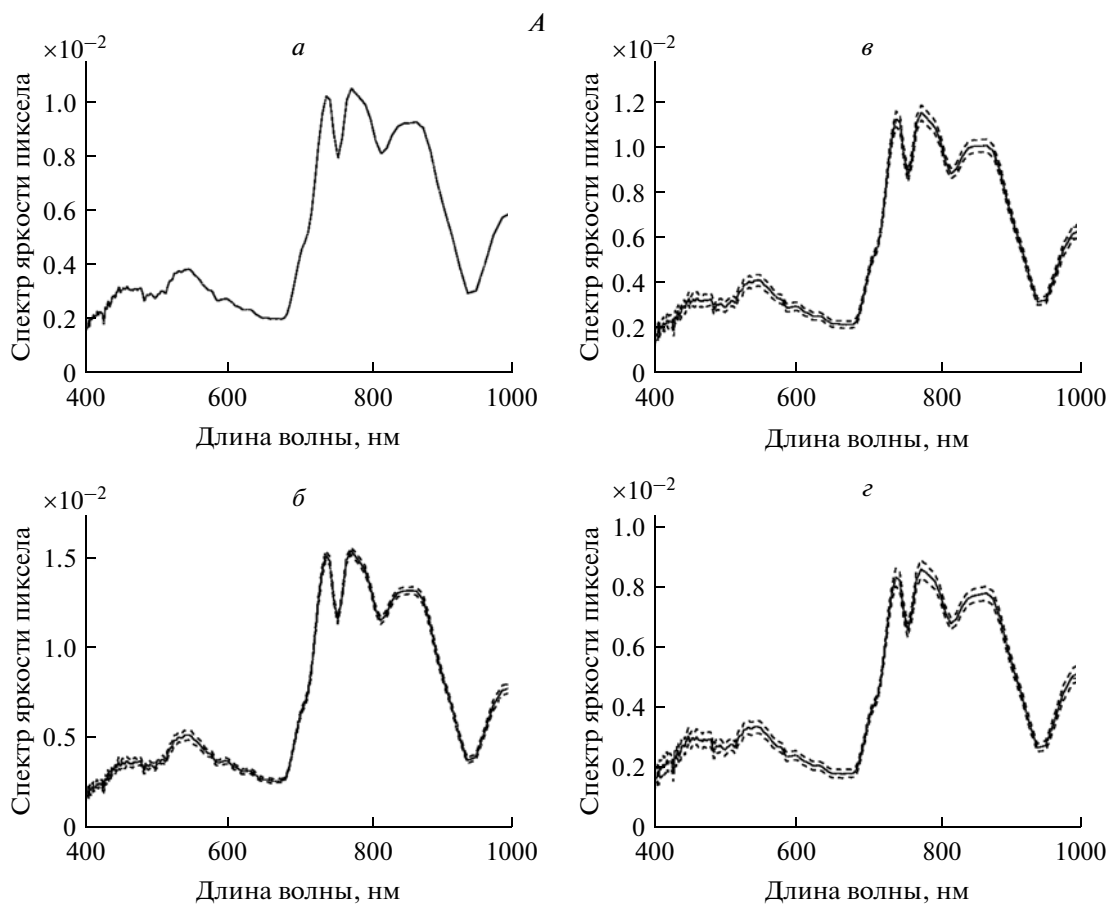
2011 г. Каждый участок содержит примерно от двух до десяти тысяч спектров, так что суммарное число обработанных спектров составляет примерно триста тысяч спектров. Участки для обработки были выбраны преимущественно с преобладанием на них сосновой, еловой и березовой лесной растительности. Участки привязаны к имеющимся данным наземной лесотаксации.

На рис. 1 приведены примеры самолетных треков за три разные момента времени съемки на дату 12 августа 2011 г. на канале 278 (длина волны 908.5 нм) гиперспектрометра: 11 ч 04 мин 17 с (рис. 1*а*), 11 ч 46 мин 25 с (рис. 1*б*) и 11 ч 59 мин 25 с (рис. 1*в*) соответственно. Характерные ориентиры представлены р. Волга: слева относительно центра на рис. 1*а* и в самом левом углу на рис. 1*б*.

Данные самолетных треков (рис. 1) были наложены на картосхемы наземной лесотаксации. Контуры соответствующих выделов преобладающих пород лесотаксации разного возрастного состава можно очертить также на данных рис. 1. Оконтуренные участки этих выделов представлены на рис. 2–рис. 4. Нумерация участков идет от 2 до 99, а в некоторых случаях и с буквенными индексами, поскольку всего было рассмотрено более 100 участков и из них отобрано около 40.

Фрагменты первого из указанных треков (рис. 1*а*) с выделенными контурами лесной растительности разного породного состава и возраста, известными из данных наземной лесотаксации, представлены на рис. 2*а, б, в* соответственно. На рис. 2*а* выделен контур преобладающих березняков. Три выделенных контура на рис. 2*б* относятся к преобладающим березнякам, соснякам и ельникам, соответственно. Контуры рис. 2*в* соответствуют соснякам разного возраста. Аналогичным образом на рис. 3*а–д* представлены фрагменты изображения рис. 1*б* с преобладающей на них лесной растительностью разного породного состава и возраста в пределах выделенных контуров точно так же, как на рис. 4*а, б* – фрагменты изображения рис. 1*в* (пояснения – в подрисуночных подписях).

Цель обработки групп спектров, соответствующих разным типам лесной растительности (сосна, ель, береза), – выработать критерий (или критерии), позволяющие отличать группы спектров, соответствующих заранее известным и разным при этом типам лесной растительности. За основу здесь выбран критерий по типу смещения спектра на длинах волн 670–780 нм (Козодеров, Егоров, 2011). По сравнению с использованным ранее расчетом величины смещения, теперь применен



1	2	3
<i>а</i>	7324	99.98
<i>б</i>	52	137.0
<i>в</i>	4508	108.2
<i>г</i>	2764	85.9

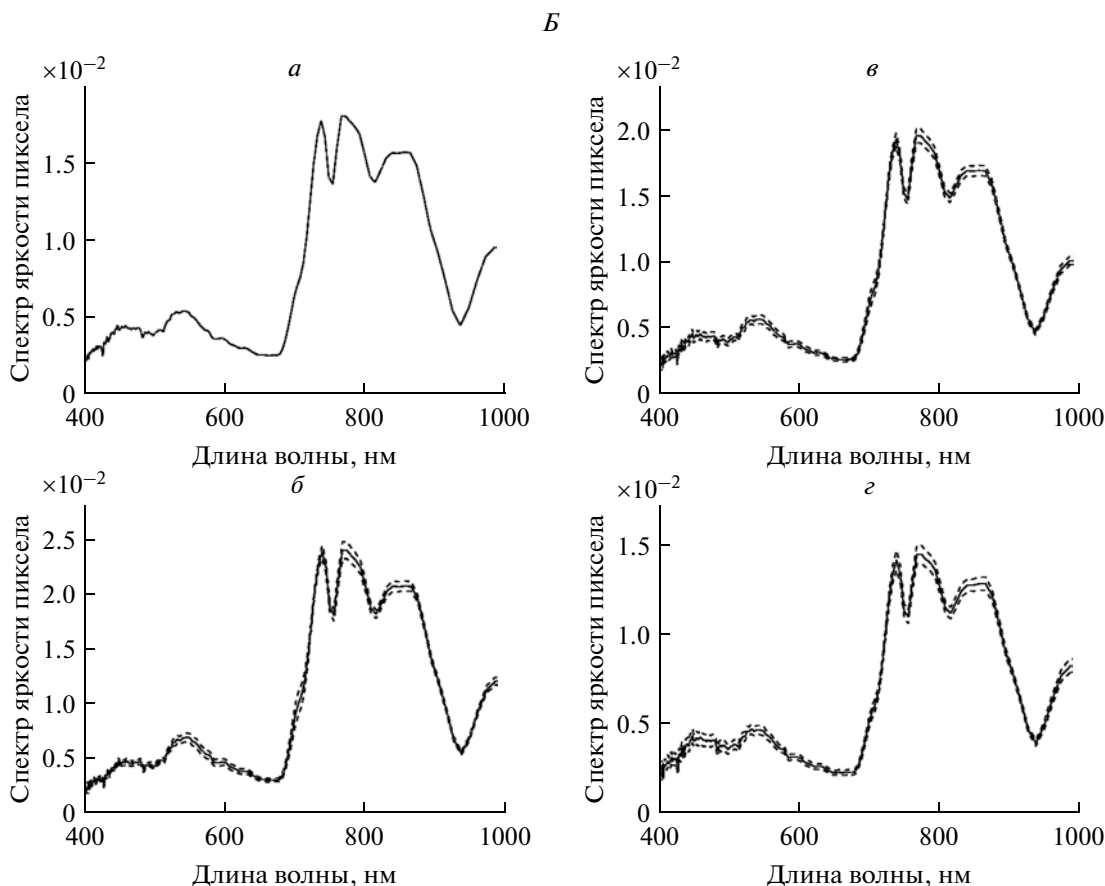
Рис. 5. Средние значения спектральной плотности энергетической яркости в единицах Вт/(см² мкм стер) для: *а* – всего выбранного участка, а также эти же значения вместе со среднеквадратическими отклонениями (пунктир) для ансамблей градаций: *б* – 80–100%, *в* – 40–80%, *г* – 0–40% относительно их максимальных значений. Три столбца прилагаемых таблиц характеризуют: 1 – иллюстрируемые примеры спектров (*а–г*); 2 – общее число пикселей в пределах выделенных контуров; 3 – интегральные значения спектров. Соответствие участков: *А* – № 25 (сосняк); *Б* – № 86 (сосняк); *В* – № 27 (ельник); *Г* – № 28 (ельник); *Д* – № 35 (березняк); *Е* – № 66 (березняк); *Ж* – № 82 (березняк).

вновь созданный обобщенный параметр смещения, который можно рассчитывать не обязательно на интервале 670–780 нм, но и на более широком спектральном диапазоне вплоть до (400–1000 нм), хотя практика показывает, что лучше не использовать точки спектра левее 450 нм. Параметр смещения теперь рассчитывается с использованием некоторой весовой функции, так что можно увеличить или уменьшить вклад в величину смещения участков спектра на малых или больших длинах волн (в пределах 400–1000 нм). В процессе обработки выше указанных участков трех самолетных треков варьировались парамет-

ры расчета смещения спектров, а также ширина диапазонов интегральных яркостей, на которые разбивались группы спектров с каждого участка.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленные на рис. 2–4 контуры выделенных объектов должны служить для обучения используемого классификатора (вычислительной процедуры) по соответствующей тестовой выборке. Процесс обучения состоит в нахождении коэффициентов связи между регистрируемыми значениями СПЭЯ и априорными сведениями о



	1	2	3
<i>а</i>		4874	160.56
<i>б</i>		86	208.5
<i>в</i>		3244	171.5
<i>г</i>		1544	135.0

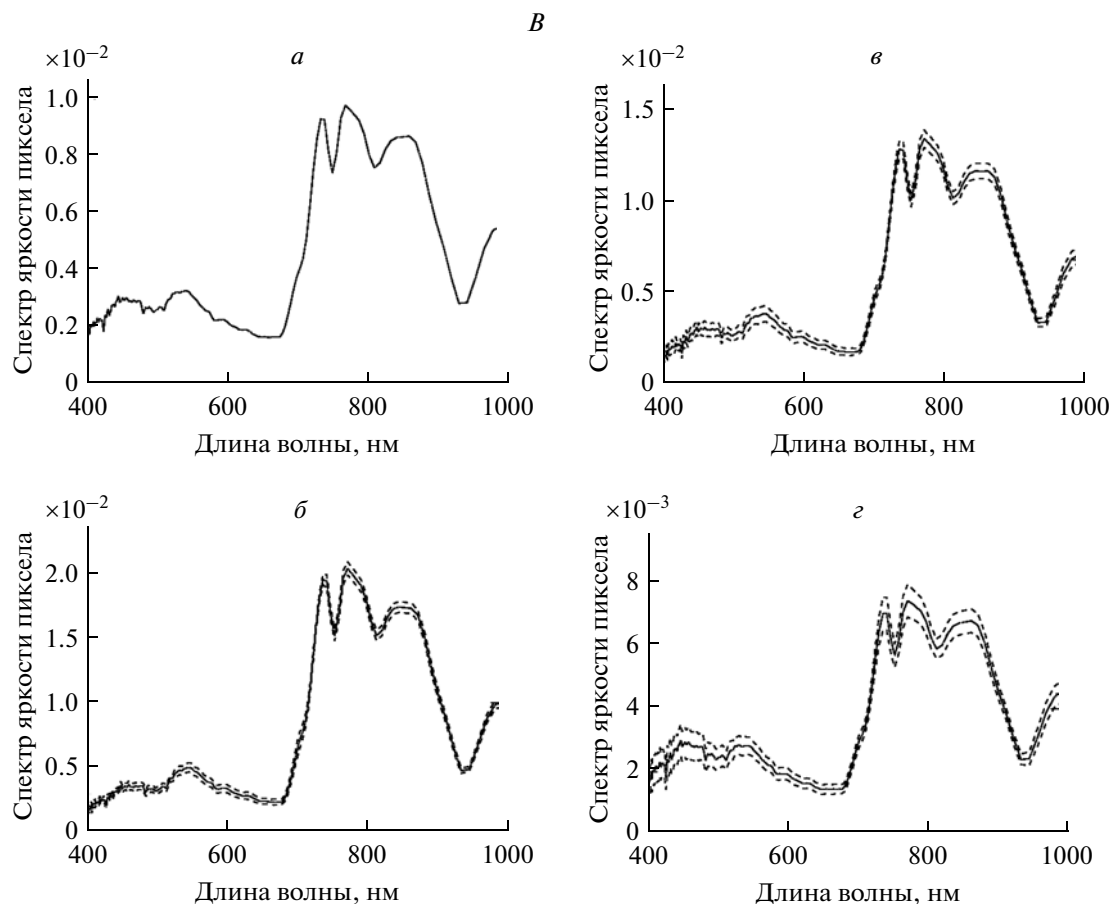
Рис. 5. Продолжение.

принадлежности выделенных контуров к выбранным классам объектов. Результаты обучения распространяются на все пиксели обрабатываемого изображения. Существенной, однако, оказывается мера пространственной изменчивости спектров в пределах этих контуров. Эта изменчивость связана с чередованием освещенных и затененных элементов разрешения (пикселей), относящихся к соответствующим классам объектов.

Данные рис. 5 характеризуют средние спектры и их среднеквадратические отклонения для семи участков, относящихся к “чистым выделам” (100% преобладающей породы) в общей совокупности выделенных контуров. На рис. 5*а* представлены средние значения СПЭЯ для каждого из выделенных участков, а также средние значения СПЭЯ и их среднеквадратические отклонения по диапазонам интегральных яркостей: 100–80% (рис. 5*б*),

80–40% (рис. 5*в*), 40–0% (рис. 5*г*). Эти градации соответствуют разным уровням солнечного освещения объектов: от полностью освещенных крон деревьев (рис. 5*б*) до полностью затененных фитоземных элементов лесной растительности (рис. 5*г*). К каждому из графиков на рис. 5*а–г* прилагается таблица, показывающая общее число пикселей в пределах выбранных контуров, их распределение по указанным градациям солнечного освещения и интегральные значения иллюстрируемых СПЭЯ. Данные рис. 5*А* и рис. 5*Б* соответствуют соснякам (участки № 25 и № 86), рис. 5*В* и рис. 5*Г* – ельникам (участки № 27 и № 28), рис. 5*Д–Ж* – березнякам (участки № 35, № 66, № 82).

Сравнение данных рис. 5*А* и 5*Б* показывает, что средний спектр всего участка № 86 более чем в 1.5 раза превышает средний спектр участка № 25. Это связано с тем, что возраст сосняков участка



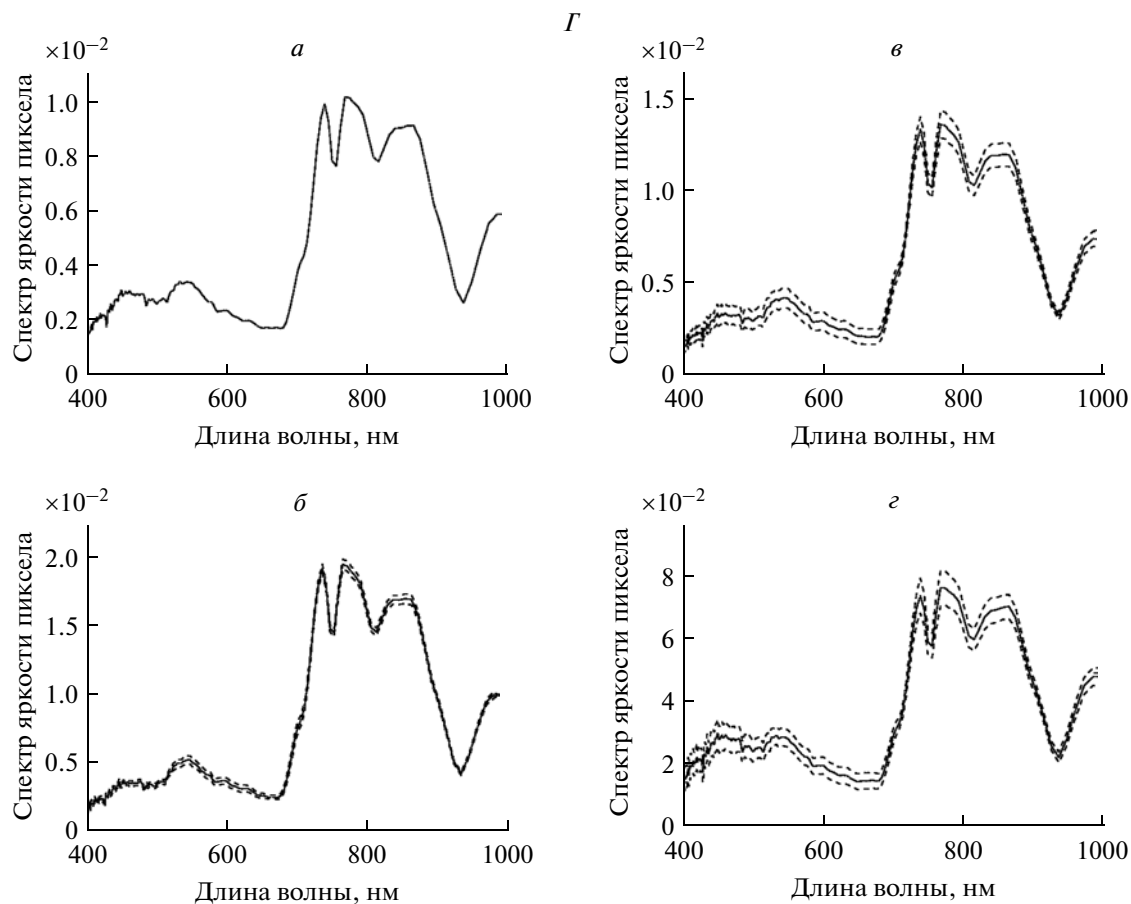
1	2	3
<i>a</i>	4624	90.56
<i>б</i>	68	165.6
<i>в</i>	1532	119.2
<i>г</i>	3024	74.4

Рис. 5. Продолжение.

№ 25 больше, чем возраст сосняков участка № 86: по мере увеличения возраста возрастает число пикселей освещенных крон в пределах выбранных контуров этих объектов. Сказанное подтверждается также данными для градаций 100–80% освещения крон. Таких пикселей не очень много в пределах выделенных контуров (52 из общей совокупности 7324 для участка № 25 в сравнении с 86 из общей совокупности 4874 для участка № 86). Соответственно интегральные значения яркости возрастают от 99.98 до 160.56 Вт/м², а для выбранной градации от 137.0 до 208.5 Вт/м². Спектры затененных фитоэлементов (градации 0–40%) в определенной степени соответствуют спектрам освещенных фитоэлементов (по-прежнему заметна полоса поглощения хлорофилла 620–670 нм), но амплитуда спектров оказывается приблизи-

тельно в 2 раза меньше для пикселей, относящихся к затененным фитоэлементам. Число таких пикселей уменьшается от 2764 для участка № 25 до 1544 для участка № 86 при том, что интегральные яркости этих градаций возрастают от 85.9 Вт/м² до 135.0 Вт/м² соответственно. Можно видеть, что при переходе от освещенных к затененным пикселям сохраняются характерные свойства растительности в виде полосы хлорофилла. Это означает, что полностью затененные пиксели несут информацию о наличии травянистой и кустарниковой растительности в межкروновых просветах в момент съемки.

Перечисленные особенности формирования спектров и распределения пикселей по градациям яркости сохраняются и для ельников (рис. 5*B* и рис. 5*Г* для участков № 27 и № 28 соответствен-



1	2	3
<i>а</i>	2868	95.73
<i>б</i>	80	163.4
<i>в</i>	1014	122.4
<i>г</i>	1774	77.5

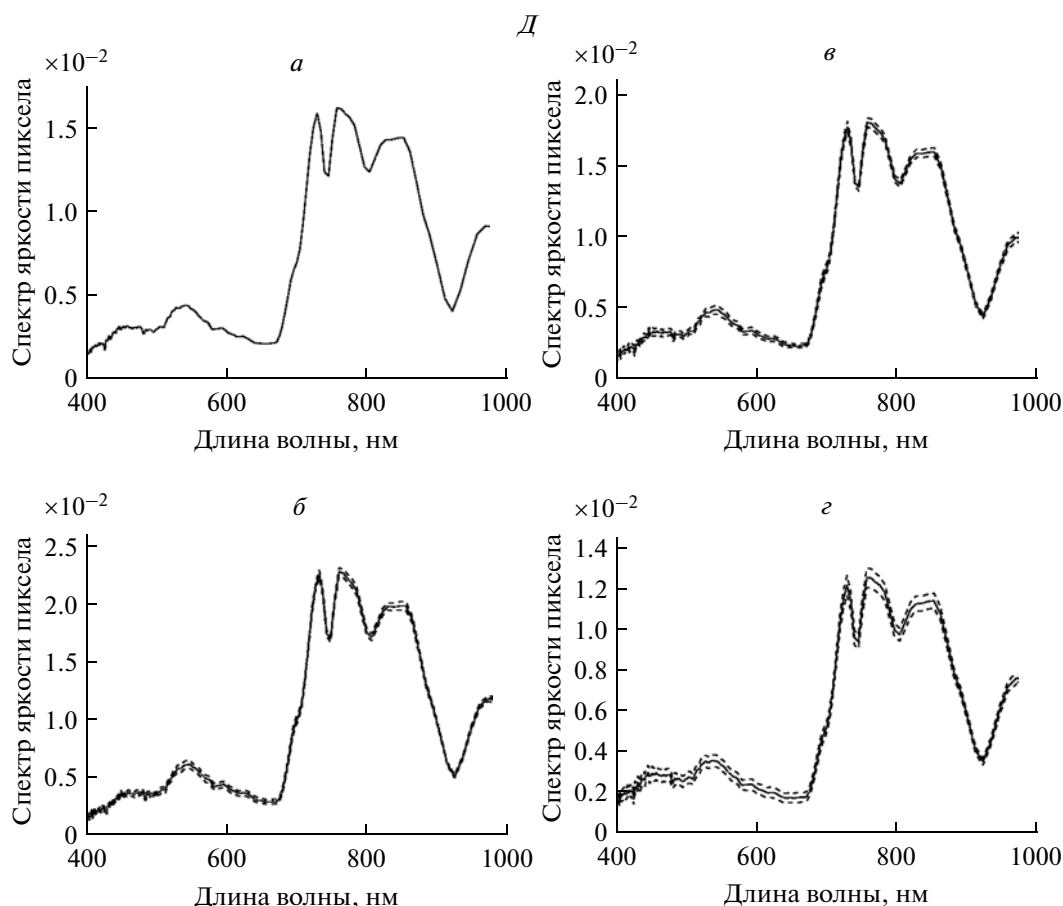
Рис. 5. Продолжение.

но). Здесь, однако, средние значения спектров в пределах выбранных контуров отличаются незначительно (90.56 и 95.73 Вт/м²), а для градаций 100–80% им соответствуют значения 165.6 и 163.4 Вт/м². При этом можно видеть, что изменчивость спектров затененных фитоэлементов для этих ельников разного возрастного состава значительно больше, чем для сосняков, а средние спектры для градаций солнечного освещения 0–40% изменяются слабо (74.4 и 77.5 Вт/м² соответственно).

Средние спектры типичных березняков (рис. 5Д для участка № 35, рис. 5Е для участка № 66, рис. 5Ж для участка № 82) приблизительно в 1.5 раза выше, чем для сосняков и ельников. При общем небольшом числе пикселей, принадлежащих градациям 100–80% освещения (60, 84 и

122 соответственно, из общего числа в несколько тысяч пикселей) можно видеть, что для этих градаций интегральные значения яркостей равны 193.0, 231.0 и 239.8 Вт/м². Вместе с тем для полностью затененных фитоэлементов (градации 0–40%) эти значения убывают до 114.3, 139.7 и 161.1 Вт/м² соответственно. Число таких спектров оказывается в среднем меньше (858, 2562 и 304) в сравнении с тем, что наблюдается для хвойных (сосняки, ельники) пород: там эти цифры достигают 2000–3000.

Необходимость указанной детализации ярких и темных пикселей в пределах выделенных контуров заданных классов объектов связана с тем, что такое разделение освещенных и затененных фитоэлементов лесной растительности приводит к повышению точности распознавания таких объ-



	1	2	3
<i>a</i>		2546	142.24
<i>б</i>		60	193.0
<i>в</i>		1628	155.1
<i>г</i>		858	114.3

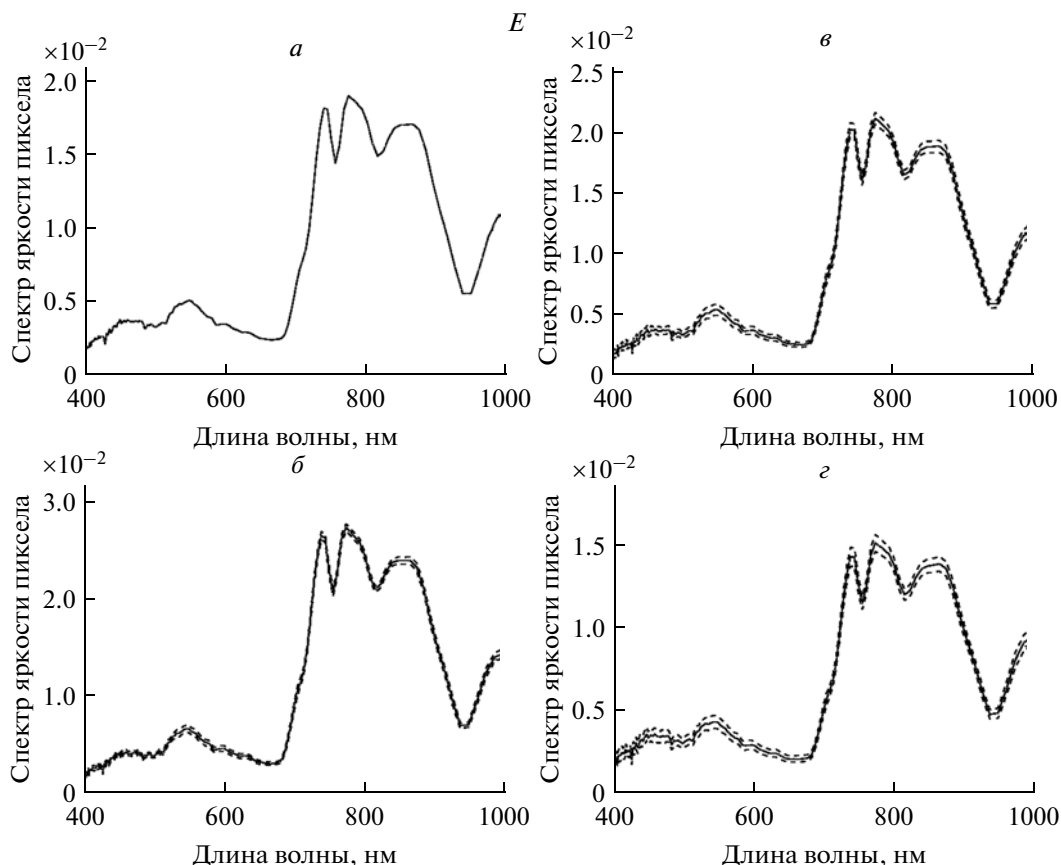
Рис. 5. Продолжение.

ектов (Козодеров и др., 2013). Выбранный в работе (Козодеров, Егоров, 2011) критерий распознавания по величине смещения области перехода от полосы хлорофилла к максимуму спектральной отражательной способности растительности в значительной степени нивелирует этот эффект. Применимость этого критерия связана преимущественно с использованием освещенных фитоэлементов, число которых, как видно из данных рис. 5, оказывается незначительным (до сотни пикселей при общем их числе в несколько тысяч в пределах выделенных контуров).

Результаты расчетов указанных смещений спектров на диапазоне длин волн (520–980 нм) для выбранных градаций (100–80%) приведены в табл. 1 по данным рис. 2*a–в*, в табл. 2 по данным рис. 3*a–д* и в табл. 3 по данным рис. 4*a, б*. Неплохая разли-

чимось трех разных пород лесной растительности заметна по данным табл. 1. По данным табл. 2 можно видеть, что используемый критерий позволяет различить сосняки и березняки, но сложнее обстоит дело с ельниками. Здесь по наклону кривых спектрального хода ельники оказываются неразличимы даже относительно березняков, что требует введения дополнительных критериев. Также сравнительно хорошо различаются участки сосны и березы по данным табл. 3.

С целью устранения указанных сложностей с отделением ельников от остальных пород лесной растительности в создаваемую автоматизированную систему был введен дополнительный расчетный блок. Он позволяет по заданному среднему значению интегральной яркости с одного участка выбрать группу спектров в рамках определенного



1	2	3
<i>а</i>	6382	167.82
<i>б</i>	84	231.0
<i>в</i>	3736	185.7
<i>г</i>	2562	139.7

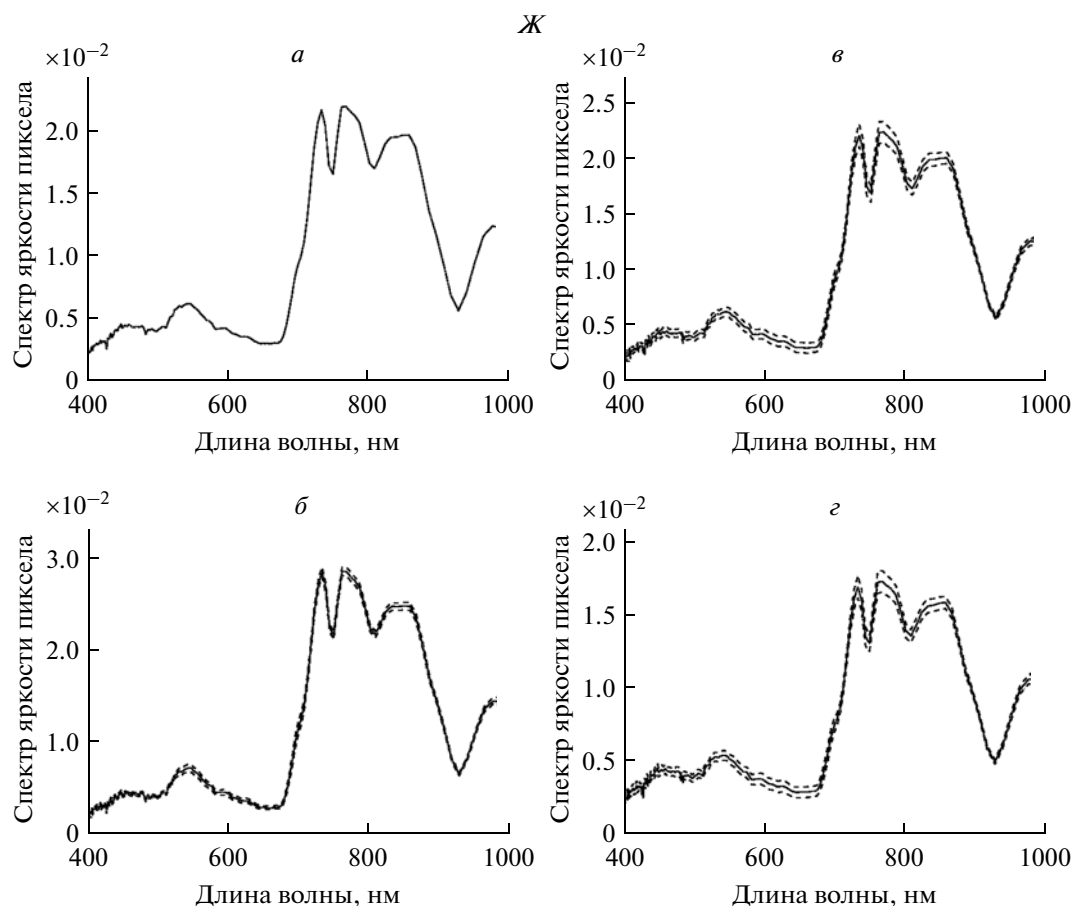
Рис. 5. Продолжение.

по ширине и настраиваемого автоматически по расположению границ диапазона яркостей с другого участка со средней интегральной яркостью, равной заданной. Система сама находит соответству-

ющие градации яркостей и формирует подгруппу спектров, средняя яркость которых равна заданной априори. Такая дополнительная процедура способствовала указанному отделению ельников от берез-

Таблица 1. Результаты расчета средних параметров смещения спектров для данных рис. 2а, б, в

Сосна, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Ель, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Береза, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров
40	762.675	50	774.0	52	778.3
42	762.988			54	778.9
44	762.602				
46	763.055				
48	762.952				
	[762.6–763.1]		[774.0]		[778.3–778.9]



1	2	3
<i>а</i>	1430	195.15
<i>б</i>	122	239.8
<i>в</i>	1004	200.0
<i>г</i>	304	161.1

Рис. 5. Окончание.

няков и сосняков. Указанные смещения после таких преобразований для данных табл. 2 по березня-

кам оказались равными: (748.3–751.5 нм), по ельникам – (743.2–743.7 нм).

Таблица 2. Результаты расчета средних параметров смещения спектров для данных рис. 3а–д

Сосна, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Ель, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Береза, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров
24	770.589	27	778.349	29	774.356
25	767.966	28	777.717	30	773.804
26	765.802			31	774.937
33	768.948			32	775.134
34	771.090			35	780.910
				29а	777.241
				30а	776.337
	[765.8–771.1]		[777.7–778.3]		[773.8–780.9]

Таблица 3. Результаты расчета средних параметров смещения спектров для данных рис. 4а, б

Сосна, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Ель, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров	Береза, № участка	Яркость (80–100%); среднее смещение спектров
63	772.774			64	780.847
65	775.956			66	784.003
67	774.392			68	781.503
71	766.234			69	780.487
72	768.393			70	781.815
85	772.367			73	782.987
86	771.717			74	777.256
89	769.309			81	779.962
90	768.506			82	778.891
				83	778.671
	[766.2–776.0]				[777.3–784.0]

Можно утверждать о перспективах использования такого многокритериального подхода для различения групп лесной растительности разного породного состава и возраста уже на стадии рассмотрения всей совокупности используемых тестовых участков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создается автоматизированная система обработки данных гиперспектрального самолетного зондирования с использованием разных критериев различимости регистрируемых спектров в пределах выделенных контуров лесной растительности разного породного состава и возраста. Система позволяет уже на стадии обучения используемого классификатора (вычислительной процедуры) разделить множество всех спектров по величине их интегральной яркости с учетом освещенных и затененных пикселей обрабатываемого ГСИ. Показаны особенности формирования таких обучающих выборок, привязанных к имеющимся данным наземной лесотаксации территории. Перспективы системы – в ее наполнении данными гиперспектрального зондирования в увязке с данными лесотаксации, которые нуждаются в обновлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Козодеров В.В., Егоров В.Д.* Распознавание растительности по данным гиперспектрального аэрозондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 40–48.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В.* Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. М.: МФТИ, 2008. 222 с.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Казанцев О.Ю., Персев И.В., Щербаков М.В.* Обработка дан-

ных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 3–11.

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Вычислительная система обработки данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования // Научно-техническая конф. “Гиперспектральные приборы и технологии”. Красногорск, 17–18 января 2013 г. С. 102–103.

Blackburn G.A., Steele C.M. Towards the remote sensing of matorral vegetation physiology: Relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies // Rem. Sens. Env. 1999. V. 70. P. 278–292.

Carter G.A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress // Int. J. Rem. Sens. 1994. V. 15. P. 697–703.

Chang C.-I., Ren H., Chiang S.S. Real time processing algorithms for target detection and classification in hyperspectral imagery // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2001. V. 39. P. 760–768.

Collins W., Chang S.H., Raines G., Canney F., Ashley R. Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits // Econ. Geol. 1983. V. 78. P. 737–749.

Curran P.J., Kupiec J.A., Smith G.M. Remote sensing the biochemical composition of a slash pine canopy // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1997. V. 35. P. 415–420.

Janetos A.C., Justice C.O. Land cover and global productivity: A measurement strategy for the NASA programme // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6. P. 1491–1512.

Kozoderov V.V., Egorov V.D. Vegetation Pattern Recognition Using Hyperspectral Air Sounding Data // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. Pleiades Publishing, Ltd., 2011. V. 47. № 9. P. 1135–1142.

Lyon J.G., Yuan D., Lunetta R.S., Elvidge C.D. A change detection experiment using vegetation indices // Photogram. Engin. Rem. Sens. 1998. № 64. P. 143–150.

McGwire K., Minor T., Fenstermaker L. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments // Rem. Sens. Env. 1999. V. 72. № 3. P. 360–374.

Penuelas J., Filella I., Lloret P., Munoz F., Vilajeliu M. Reflectance assessment of mite effects on apple trees // Int. J. Rem. Sens. 1995. V. 16. P. 2727–2733.

Thenkabail P.S. Optimal hyperspectral narrowbands for discriminating agricultural crops // *Rem. Sens. Rev.* 2002. V. 20. № 4. P. 257–291.

Vane G., Goetz A.F.H. Terrestrial imaging spectroscopy // *Rem. Sens. Env.* 1988. V. 24. P. 1–29.

An Automation of Hyperspectral Airborne Remote Sensing Data Processing

V. V. Kozoderov¹, V. D. Egorov²

¹ *M.V. Lomonosov Moscow State University*

² *Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

An automated system is proposed of discrimination of the spectral radiances registered by the hyperspectral airborne instruments based on average spectra and their interclass variability while distinguishing pixels related to the illuminated and shaded elements of the crown trees for various species and ages. Maps of the ground-based inventory for the selected area of airborne remote sensing are used as prior information. The system forms data bases of the selected classes of objects in an automated regime using the contours of these objects drawn on the image under processing. An opportunity to distinguish these classes is demonstrated in the red edge region of the spectra transition from the chlorophyll spectral band to the maximum of the spectral vegetation reflectivity.

Keywords: hyperspectral imaging, pattern recognition, characteristic features of vegetation

АВИАЦИОННЫЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2013 г. И. Д. Родионов¹, А. И. Родионов², Л. А. Ведешин³, А. Н. Виноградов⁴,
В. В. Егоров^{5,*}, А. П. Калинин⁶

¹Институт химической физики им. Н.Н.Семенова РАН, Москва

²ЗАО “Научно-технический центр “Реагент”, Москва

³Президиум РАН, Москва

⁴Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет

⁵Институт космических исследований РАН, Москва

⁶Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва

*E-mail: victor_egorov@mail.ru

Поступила в редакцию 03.05.2013 г.

Представлена ретроспектива разработок авиационных гиперспектрометров, выполненных в ЗАО “НТЦ “Реагент”. Описаны гиперспектральные приборы, разработанные в период с конца 90-х годов прошлого века по настоящее время. Созданная в последнее время линейка гиперспектрометров охватывает диапазон от ультрафиолетового (0.2 мкм) до ближнего инфракрасного (1.0 мкм). Эти приборы могут устанавливаться на воздушных и автомобильных носителях, включая малоразмерные. Проводимые ЗАО “НТЦ “Реагент” разработки гиперспектральных приборов достигли к настоящему времени промышленной зрелости и подготовлены к серийному производству. Их технические характеристики позволяют утверждать, что фактически создана широкодиапазонная светосильная ультраспектральная аппаратура высокого пространственного разрешения с возможностью бортовой обработки данных в реальном времени.

Ключевые слова: авиационный гиперспектрометр, зондирование, спектр, изображение, спектральное и пространственное разрешение, угловое поле зрения

DOI: 10.7868/S0205961413060080

ВВЕДЕНИЕ

Задачей гиперспектральных измерений в оптическом диапазоне является дистанционное зондирование (ДЗ) поверхности Земли (с борта самолетов, вертолетов и космических летательных аппаратов) с целью идентификации природных техногенных объектов и определения их состояния. По сложившейся в настоящее время терминологии, гиперспектральными называют измерения при наличии от нескольких сотен до тысячи спектральных каналов, а гиперспектрометром — прибор, осуществляющий измерения одновременно в спектральной и пространственных координатах. Идентификация объектов и материалов при гиперспектральных измерениях базируется на способностях этих объектов и материалов поглощать и отражать свет дифференцировано по длинам волн и специфично для каждого материала. Фундаментальной основой такого ДЗ является предположение о наличии корреляции между регистрируемым отраженным (или излученным)

светом и химическим составом отражающей поверхности.

Измерения с числом спектральных каналов более 1000 в зарубежной литературе обозначаются как “ультраспектральные” (Larar et al., 2010), и этой проблеме посвящено уже более сотни работ, регулярно проводятся международные форумы (в частности конференции SPIE). Строгой терминологии, разграничивающей гиперспектральные и ультраспектральные измерения, нет. Для ультрафиолетового (УФ) и видимого диапазонов можно условно считать гиперспектральными измерения со спектральным разрешением от 1 до 10 нм, а ультраспектральными — с разрешением лучше 1 нм.

Измеряемыми характеристиками являются зависимость коэффициента отражения поверхности Земли от пространственной координаты X точки на Земле, значения длины волны регистрируемого излучения λ , компоненты поляризации отраженного излучения. Чувствительность спектрального коэффициента отражения разнородных объектов к значению частоты и поляризации

подсвечивающего и собственного излучения выделяет гиперспектральный метод среди других методов изучения поверхности Земли. Данные гиперспектральных измерений бывают особенно полезны для решения таких сложных задач, как детектирование малых объектов, идентификация состава объектов земной поверхности и происходящих процессов, различие между очень близкими классами предметов, оценки биохимических и геофизических параметров и т.п. Только гиперспектральные измерения могут выявить малые спектральные различия между отдельными элементами поверхности и служить индикатором интересующих нас объектов и процессов на поверхности Земли.

Список задач гиперспектрального зондирования чрезвычайно велик. В статье (Akim et al., 2004) упоминается более двух десятков возможных приложений гиперспектральной съемки, и этот список с тех пор постоянно расширяется. Назначением гиперспектрометрии высокого разрешения, обсуждаемой в данной работе, является детальное распознавание инфраструктуры и исследование тонкой структуры спектров, позволяющей выявлять малые изменения в состоянии зондируемых объектов. Главный же вопрос данной работы – описание как предыдущих, так и новейших разработок гиперспектрометров ЗАО “НТЦ “Реагент”.

Основным результатом гиперспектральной съемки является “гиперкуб”. Так в мировой литературе называют множество данных, образованных значениями интенсивности отраженного солнечного сигнала от двумерной поверхности местности, разбитой условно на элементы изображения – пикселы. Кроме двух стандартных координат к каждому пикселу добавляется спектральная координата, что обеспечивает многомерность пространства данных. Кроме того, может добавляться еще дискретная поляризационная координата. Таким образом, измеряемые данные представляют собой значения функции, заданной в многомерном пространстве с непрерывными и дискретными аргументами. Гиперспектральные измерения являются чрезвычайно перспективными, поскольку обеспечивают максимальное количество информации, содержащейся в восходящем от зондируемого объекта излучении. В настоящее время в зарубежной литературе активно развивается и следующий шаг в этом направлении – ультраспектральные измерения. В России широкое применение методов гиперспектральной съемки сдерживалось практически полным отсутствием такого типа сенсоров, за исключением разработанного в Институте космических исследований (ИКИ РАН) экспериментального образца авиационного видеоспектрометра (Аванесов, 1980), который, однако, не нашел дальнейшего практического применения.

За рубежом первенство в направлении авиационных шелевых гиперспектрометров ассоциируется с прибором AVIRIS (<http://aviris.jpl.nasa.gov/>). В эксплуатации он находится с 1989 г. Имеет 224 спектральных канала в полосе 400–2500 нм, 500 пространственных каналов. Его разрешение $4 \times 4 \text{ м}^2$ с высоты 4 км с захватом полосы 1900 м при скорости носителя 190 км/ч. Обеспечивает 12 бит канал съема данных.

Одной из первых отечественных организаций–разработчиков гиперспектральных сенсоров был ЗАО “НТЦ “Реагент”. Его отличие от других разработчиков заключалось в четкой постановке задачи – необходимости развития гиперспектрометрии высокого пространственного и одновременно спектрального разрешения. Именно такой подход обеспечивает практически-важные достижения в ДЗ. Паллиатив в данном вопросе не представляет практического интереса (хотя и может иметь научное или узконаправленное применение).

В течение многих лет ЗАО “НТЦ “Реагент” проводил работы по созданию гиперспектральной аппаратуры с необходимыми техническими характеристиками и наработкой опыта применения гиперспектральной технологии для обоснования необходимости ее масштабного внедрения (гиперспектрометрии высокого разрешения) в практику отечественного ДЗ Земли.

В настоящее время ситуация начинает изменяться к лучшему – частично в связи с усилиями ЗАО “НТЦ “Реагент”, но в основном из-за начавшегося на Западе (и на Востоке, в частности в Китае) массированного внедрения данной технологии в практически важные, в том числе стратегические, приложения. Далее пренебрегать данным направлением не представляется возможным, поэтому интерес к гиперспектрометрии в РФ стремительно растет. Фактически начинается формирование рынка гиперспектрометрии. Нет сомнения (и уже известны факты), что вчерашний скептицизм сменится протекционизмом и дилерством западных компаний на отечественном рынке. Мы полагаем, что такой подход бесперспективен, поскольку, при всей простоте исходных позиций, гиперспектрометрия достаточно сложное комплексное направление, требующее соединения в одном приборе высоких достижений оптики, фотоприемной аппаратуры, электроники, встроенной вычислительной техники, системного и прикладного математического обеспечения, системных решений и интеграции в бортовые комплексы. Недостаточная проработка хотя бы одного из этих пунктов делает провальным проект в целом. Закупки отдельных даже высококачественных составляющих не решают проблемы в целом.

Цель настоящей работы – обзор гиперспектрометров, созданных ЗАО “НТЦ “Реагент”, и констатация нового этапа в развитии данного направления в РФ – перехода к ультраспектрометрии и серийному производству отечественной гиперспектрально-ультраспектральной аппаратуры для массовых применений. Можно утверждать, что все технические проблемы на пути построения современных бортовых гиперспектральных комплексов в значительной степени решены, и задача сегодняшнего дня – наработка практики их массового применения.

РАЗРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРОВ В ЗАО “НТЦ “РЕАГЕНТ”

Интерес к гиперспектрометрии как качественно новому средству решения задач дистанционного мониторинга экологических и узкоспециализированных задач был анонсирован еще в 1980-х годах в ИПМ им М.В. Келдыша АН СССР (Rodionov, Ponomarev, 1993a). Там же были предложены практические пути реализации этого направления на основе перестраиваемых акустооптических неколлинеарных фильтров и фотоприемных устройств с предельно высокой чувствительностью – монофотонных фотоприемников.

В дальнейшем эти направления получили развитие в образованном в 1990 г. ЗАО “НТЦ “Реагент”. В частности, были проведены работы по созданию линейки акустооптических видеоспектрометров в диапазоне от УФ-С до ближнего ИК (Rodionov, Ponomarev, 1996).

Возможность создания серийных образцов приборов основывалась на проведенных до этого в мировой практике и в СССР многолетних разработках фундаментальных основ данного направления – исследования свойств нелинейных кристаллов (в частности парателлурита), технологии выращивания совершенных нелинейных кристаллов, теории акустооптических приборов.

При этом видеоспектрометры УФ-С- и УФ-В-диапазонов на кристаллах DKDP и KDP были созданы впервые в мировой практике. Удалось добиться эффективной апертуры фильтров на уровне 1 см при поле зрения до 6 град и спектральном разрешении на уровне 1 нм. Пространственное разрешение было на уровне 500 линий по полю зрения (ограничивалось имеющимися на тот момент матрицами).

Эти характеристики и в настоящее время являются ориентировочными при оценках возможностей акустооптических видеоспектрометров.

Основной интерес к акустооптическим видеоспектрометрам связан с возможностью сопровождать двигающийся в угловом пространстве объект и, перебирая спектральные линии, строить спектр излучения данного объекта. При этом

спектральная характеристика формируется в течение достаточно длинного временного интервала и при этом предполагается, что в течение этого времени спектр излучения сохраняется неизменным.

Другим отличительным свойством акустооптических видеоспектрометров является возможность слежения за характерными узкими линиями спектра, позволяющими извлекать уникальную информацию.

В связи с ограниченными возможностями на тот момент вычислительной техники побудительным мотивом являлась и возможность за счет модуляции сигнала на пьезо-преобразователях реализовать интегралы от спектральной зависимости коэффициента яркости с весовыми множителями, т.е. осуществлять оптические вычисления.

Дальнейшее развитие акустооптического направления в спектрометрии проводилось в РФ и за рубежом другими организациями. При этом наибольшие успехи оказались достигнуты в применениях к исследованию биологических материалов.

Применительно к задачам аэрокосмического мониторинга более практическим оказалось направление, основанное на щелевых гиперспектрометрах (“PushBroom” по западной классификации).

Причин этого несколько. Наибольший практический интерес оказался не в слежении за маневрирующим объектом, а в сплошном мониторинге как можно больших площадей местности. В этом случае важным фактором является светосила прибора, которая прямо пропорциональна площади обзора при прочих равных условиях. Возможности щелевых гиперспектрометров, по крайней мере в исполнении ЗАО “НТЦ “Реагент”, оказались в этом случае почти в 100 раз выше по сравнению с лучшими акустооптическими. Другой аргумент – щелевые гиперспектрометры дают в точке местности мгновенную картину спектральной кривой, а акустооптические – формируют ее в разные моменты времени. В то же время турбулентность атмосферы и общая изменчивость освещения местности в случае последовательных измерений не позволяют достигнуть высокого качества спектральной кривой в условиях аэрокосмического применения. Это особенно проявляется при ультраспектральных измерениях.

Отметим, что эффективное изготовление акустооптических видеоспектрометров ограничено в 2 раза и более узким спектральным диапазоном в условиях применения одной камеры по сравнению с щелевыми гиперспектрометрами. Эта особенность связана с ограниченной эффективностью возбудителя акустооптических волн при удалении от центральной длины волны, и, хотя и имеются технические идеи, практическая ситуация в этом вопросе с 1990-х годов существенно не изменилась.

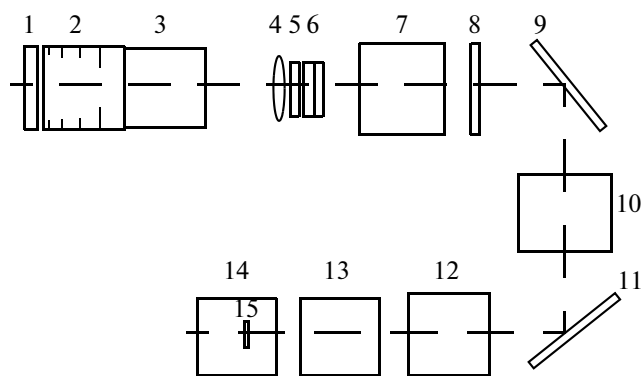


Рис. 1. Схема модуля гиперспектрометра: 1 – иллюминатор, 2 – бленда, 3 – входной объектив, 4 – коллектор, 5 – входная щель, 6 – оптический фильтр, 7 – коллиматор, 8 – поляризационная матрица, 9 – дифракционная решетка, 10 – камерный объектив, 11 – отклоняющее зеркало, 12 – электроннооптический усилитель, 13 – проекционный объектив, 14 – видеокамера без объектива, 15 – ПЗС (прибор с зарядовой связью) матрица.



Рис. 2. Полоска поверхности Земли, проецируемая на вход электроннооптического усилителя. Величина полосы по Y определяется углом $1'$ и высотой полета.

В РФ в конце 1990-х годов и в начале 21 в. в ЗАО “НТЦ “Реагент” для мониторинга газопроводов был разработан гиперспектрометр (Воронцов и др., 2002а, Воронцов и др., 2002б, Калинин и др., 2006, Dedikov et al., 2001), представляющий собой набор отдельных модулей для разных поддиапазонов длин волн, работающих синхронно по полям зрения и съемки кадра и завязанных в единую бортовую систему. Эти модули охватывали следующие диапазоны длин волн: УФ $\lambda \sim 0.3\text{--}0.4$ мкм, первый диапазон видимого излучения $\lambda \sim 0.43\text{--}0.7$ мкм, второй диапазон видимого излучения $\lambda \sim 0.66\text{--}0.86$ мкм. Результаты измерений всех модулей объединялись при обработке, и в конечном итоге получается единая спектральная зависимость во всем исследованном диапазоне длин волн. Съемка проводилась одновременно для нескольких по-

ляризаций. Так что реализовалась идеология гиперспектрально-поляризационных измерений. Конструктивно модули одинаковы и схема одного такого модуля показана на рис. 1.

Каждый модуль имел входную апертуру диаметром 3 см и обладал мгновенным полем зрения $12^\circ \times 1'$, что обеспечивало формирование на входе электронно-оптического усилителя изображения полосы поверхности Земли, размеры которой определяются высотой полета самолета, вертолета или КА и фокусным расстоянием объектива (рис. 2).

В этих модулях в качестве диспергирующего устройства использовалась плоская одномерная дифракционная решетка. Особенностью одномерных решеток является сохранение ими пространственного распределения светового потока по одной из координат и развертывание (отклонение) по другой координате плоского потока спектральной линии в зависимости от ее длины. Угол отклонения спектральной линии пропорционален длине волны, и это позволяет разворачивать плоский поток в зависимости от длины волны по угловой координате.

Дифракционная решетка и электронно-оптический усилитель формируют на ПЗС-матрице изображение, по одной оси которого отложена X – координата узкой полосы Земли (рис. 2), по другой λ – длина волны отражаемого от Земли излучения, а величина заряда каждого элемента матрицы (пиксела) характеризует интенсивность, определяющая спектральную плотность данной длины волны. Таким образом, на ПЗС-матрице мы получаем набор спектральных зависимостей отраженного от поверхности Земли излучения в зависимости от координаты X определенного участка поверхности Земли. Вследствие того, что самолет (или вертолет, а в будущем и КА), на котором находится гиперспектрометр, движется вдоль координаты Y (рис. 2), мы последовательно исследуем различные полосы участка поверхности Земли в направлении Y .

Внешний вид одного из этих модулей указанного гиперспектрометра представлен на рис. 3 (см. на цветн. вклейках).

При разработке набора указанных выше модулей был применен не имевший до этого мировых аналогов подход, основанный на использовании многокамерных фотоприемников на основе комбинации электронно-оптического преобразователя (ЭОП) нулевого поколения (это обеспечило высокое отношение энергии сигнала к спектральной плотности шума), ЭОП с микроканальным усилением (это обеспечило высокий уровень усиления) и ПЗС-матрицы на выходе, что обеспечило считывание гиперспектральной информации.

Последнее позволило реализовать, впервые в РФ, реальные гиперспектральные измерения гео-

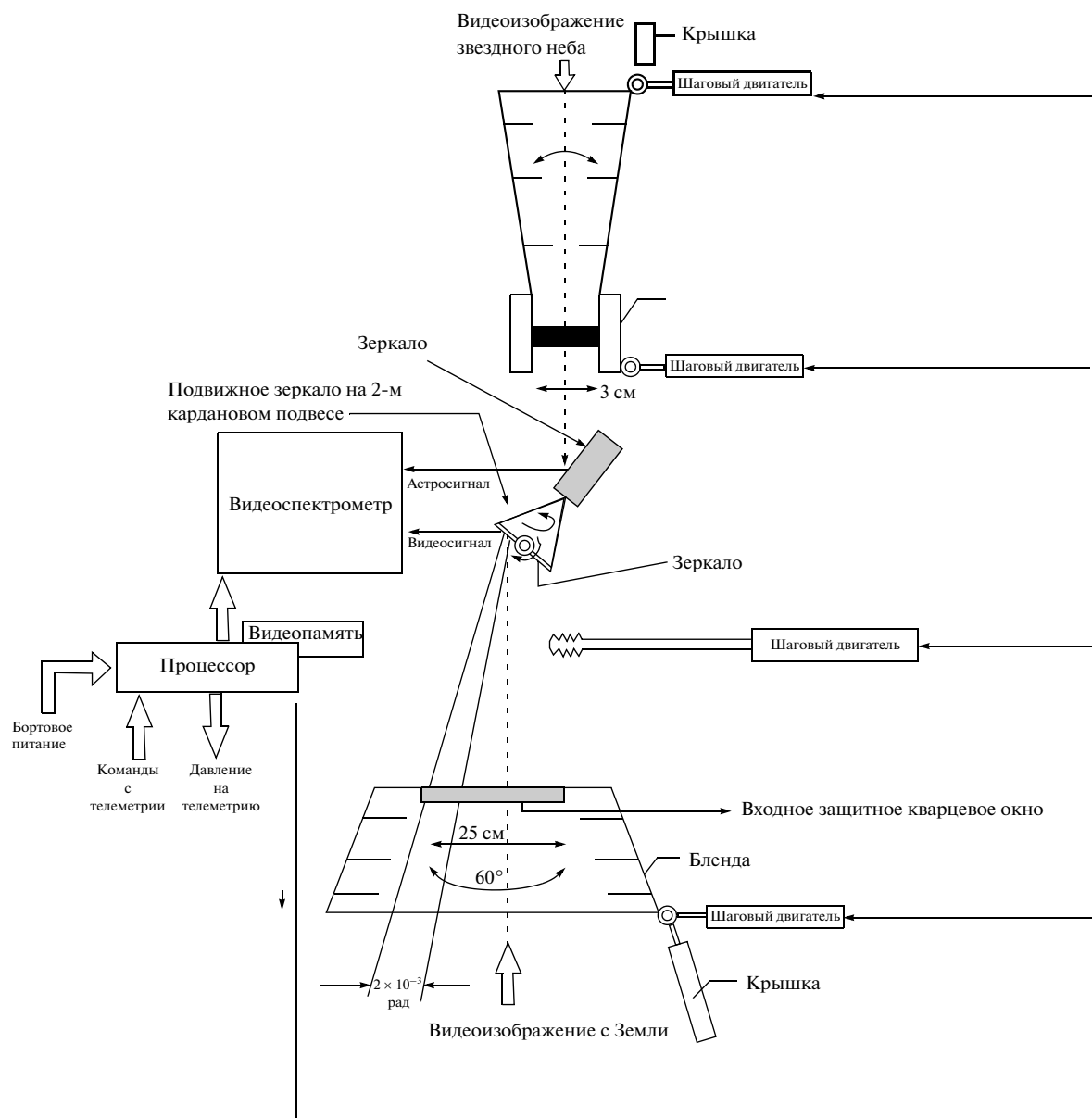


Рис. 4. Функциональная схема приборного комплекса малого космического аппарата “Астрогон–Вулкан”.

технических систем (северные трубопроводы) при полете типового самолета аэрофотосъемщика (ИЛ-20, АН-30). При этом результативные измерения проводились и в сложных условиях сильной облачности и морозящего дождя при полете на высоте 1000 м (несколько ниже уровня облаков) (Хренов и др., 2001, Непобедимый и др., 2004).

В последующем использование таких многокамерных фотоприемников в составе гиперспектрометров встречалось и в зарубежной литературе.

Также в ЗАО “НТЦ “Реагент” был разработан проект гиперспектрометра дистанционного мониторинга высокого разрешения, предназначенного для малого КА “Астрогон-Вулкан” (Белов

и др., 2003, Балтер и др., 2007а, Rodionov et al., 1997б). Функциональная схема приборного комплекса аппарата “Астрогон-Вулкан”, включающего гиперспектральный сенсор разработки ЗАО “НТЦ “Реагент”, представлена на рис. 4. Основные характеристики этого гиперспектрометра приведены в табл. 1.

Мотивацией разработки проекта “Астрогон-Вулкан” являлась очевидная (в зарубежной литературе) истина – для распространения области применения гиперспектральной технологии на промышленный мониторинг и мониторинг двойного применения необходимо пространственное разрешение на уровне 3–5 м, а для уверенной

Таблица 1. Основные характеристики гиперспектрометра высокого разрешения, предназначенного для малого КА “Астрогон-Вулкан”

Параметр	Значение
Количество спектрально-поляризационных каналов измерения	>1600
Гиперспектральный режим съемки осуществляется в каждом из шести спектральных диапазонов по программе, заданной с Земли или сформированной на борту	да
Мгновенное поле зрения, град	0.36
Пространственное разрешение, м	<3
Спектральное разрешение (для $\lambda = 0.5$ мкм), нм	1
Входной диаметр объектива, мм	250–300
Разрешение фотоприемника, линий	500
Угловое разрешение фотоприемника (для $\lambda = 0.5$ мкм), рад	6×10^{-6}
Радиометрическое разрешение для максимального спектрального разрешения до 2.2 нм и пространственного до 3 м	не хуже 5%
Внешняя и внутренняя калибровки	есть
Температурный диапазон работы для посадочных мест, град С	–40...+ 40
Температурный режим работы для оптико-механического блока, град С	20 ± 2
Объем магнитной памяти, Гбайт	до 300
Скорость выдачи данных в радиолинию, Мбит/с	120
Масса прибора в целом, кг	не более 50
Пиковая потребляемая мощность, Вт	200
Срок эксплуатации в условиях полета, лет	не менее 5

классификации объектов на местности требуется порядка 1000 и более спектральных каналов.

В США это было очевидно еще в 1990-х годах, и достижение необходимого уровня характеристик было разбито на три этапа. Сначала, в конце 1990-х годов, был запущен спутник EO-1 с гиперспектральным сенсором Hyperion, с пространственным разрешением 30 м и 220 спектральными каналами. В последние годы запущен (с 2010 г. введен в эксплуатацию) спутник TacSat 3, с пространственным разрешением около 4 м и 400 спектральных каналов, с разрешением 5 нм в диапазоне 400–2500 нм. В числе 16 приоритетных программ NASA имеется и направление развития гиперспектральной аппаратуры и гиперспектральных спутниковых группировок с продвинутой гипер(ультра-) спектральной аппаратурой высокого

пространственного и спектрального разрешения (более 1000 спектральных линий). Отметим, что TacSat 3 позиционируется как военный спутник, доступ к данным которого существенно ограничен для коммерческого потребителя. “Астрогон-Вулкан” позиционировался как высокоэффективный коммерческий проект, возможно, международный (Makridenko et al., 2003).

К сожалению, практическая возможность создания в начале 2000-х годов прорывного аппарата, опережающего текущий уровень мировой техники, не была оценена в должной мере. Отметим, что РАН (академик Лаверов Н.П.) неоднократно обращала внимание на эту проблему.

В связи со сложностью финансирования космических проектов ЗАО “НТЦ “Реагент” продолжил разработку гиперспектрометров для авиационных применений.

В середине 2000-х годов в ЗАО “НТЦ “Реагент” был разработан макет призматического гиперспектрометра (Орлов, 2008), функциональная схема которого приведена на рис. 5. Его основные параметры приведены в табл. 2.

Наличие видеоканала и синхронных с ним съемок гиперспектрального сенсора позволили разработать способ устранения искажений изображений ДЗ, связанных со сложной траекторией движения носителя гиперспектрального сенсора (Орлов, 2008; Ильин, 2011б). Пример исправления

Таблица 2. Основные параметры призматического гиперспектрометра

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, нм	500–900
Спектральное разрешение, нм	1–10
Пространственное разрешение, рад	1×10^{-3}
Число независимых спектральных каналов	224
Отношение сигнал/шум	> 100

искажений гиперспектральных изображений показан на рис. 6 (на цветн. вклейках).

Этот подход (Ильин, 2011б) имеет принципиальное значение, обеспечивая, во-первых, возможность получения качественных гиперспектральных данных без использования гироплатформ, что важно для применения на малоразмерных летательных аппаратах. Во-вторых, именно такой подход обеспечивает наибольшие возможности совместной обработки панхромных и гиперспектральных данных. Такая обработка (Data Fusion) в зарубежной литературе считается обязательной составляющей гиперспектрометрии и приводит к качественному улучшению гиперспектральных данных.

Призменный гиперспектрометр (Орлов, 2008) был использован в экспериментах по распознаванию категорий растительных ценозов (Балтер и др., 2007б, 2008б; Егоров и др. 2011; Ильин и др., 2011а). Пример тематической обработки материалов видео- и гиперспектральной съемки (классификации с обучением) показаны на рис. 7 (на цветн. вклейках). В матрицах точности классификации (табл. 3) по диагонали жирным шрифтом выделены значения вероятностей правильного обнаружения объекта, вне диагонали – вероятность ложной тревоги объекта.

В процессе выполнения работы решена важная задача наркочеконтроля – показана практическая возможность по обучению на тестовых участках оконтуривать с высокой точностью посевы наркочерющих растений на больших площадях.

Показана возможность не только различать посевы мака и конопли, и не только отличать коноплю от близкой к ней по виду крапивы, но и определять количество мужской и женской (поскони) конопли в пикселе изображения, проективные покрытие, размеры листья и пр. Более подробная информация об используемой процедуре классификации с обучением почвенно-растительных объектов, объеме выборки наземных измерений и методике расчета матрицы точности классификации представлена в работах (Балтер и др., 2007а; 2008а, Егоров и др. 2011, Ильи и др., 2011).

При решении данной задачи был разработан принципиально новый подход к обработке гиперспектральных данных (Ильин, 2011б), основанный на обучении с применением нейросетей.

Разработанный в ЗАО “НТЦ “Реагент” макет бортового гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазонов с высоким пространственным разрешением (Виноградов и др., 2012) показан на рис. 8 (на цветн. вклейках). Характеристики этого гиперспектрометра приведены в табл. 4.

На рис. 9 (на цветн. вклейках) дано изображение, полученное этим гиперспектрометром в ходе самолетной съемки с высоты 1 км.

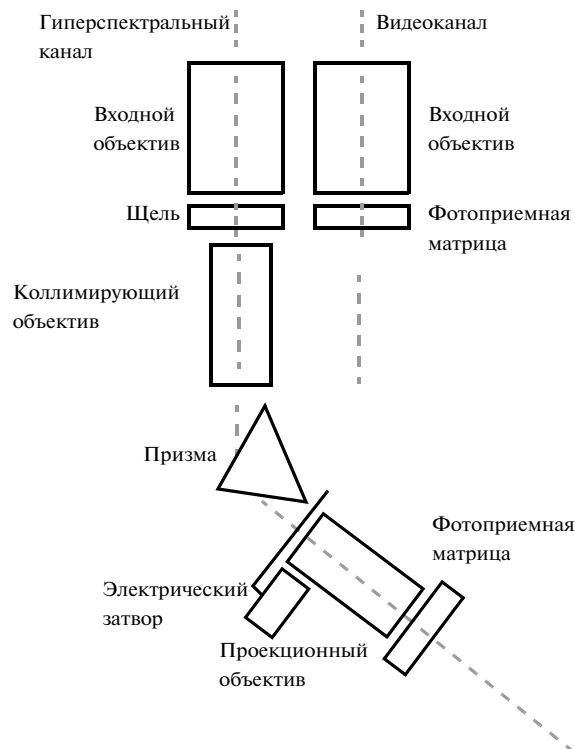


Рис. 5. Функциональная схема призменного гиперспектрометра.

На рис. 10 показаны графики спектральной плотности энергетической яркости в точках а, б, в, г рис. 9.

Из анализа рис. 10а следует, что СПЭЯ убывает до длины волны 700 нм. В диапазоне 530–560 нм имеется небольшой подъем, связанный с некоторым зарастанием поля под паром растительностью и обусловленный повышенной отражательной способностью хлорофилла. В ближнем ИК-диапазоне график СПЭЯ сильно изрезан, что обусловлено поглощением солнечного излучения молекулами кислорода и парами воды. Аналогичная изрезанность СПЭЯ наблюдается и на других графиках рис. 10. Рисунок 10б представляет собой классический образец спектра зеленой растительности с ярко выраженным пиком в области

Таблица 3. Матрица точности классификации

Объекты классификации	Объекты, выделенные по результатам классификации		
	Почва	Фоновая растительность	Конопля
Почва	0.82	0.087	0.0052
Фоновая растительность	0.0004	1	0
Конопля	0.00024	0.073	0.859

Таблица 4. Основные характеристики бортового гиперспектрометра видимого и ближнего ИК-диапазона с высоким пространственным разрешением

Параметр	Значение
Поле зрения гиперспектрометра, град	15
Поле зрения видеоканала, град	30
Спектральный диапазон, нм	450–800
Количество независимых спектральных каналов	не менее 250
Светосила, D/f	0.95
Пространственное разрешение, мрад	не хуже 1
Отношение сигнал/шум	не менее 100
Максимальная скорость записи данных, fps	30
Разрешение фоточувствительного элемента	1390 × 1040
Размер фоточувствительного элемента, мм	8.8 × 6.6 (2/3")
Сетевой интерфейс	1GbEthernet
Питание, В	8–30
Потребляемый ток, мА	240–1240
Потребляемая мощность, Вт	7–12

530–560 нм, сильным поглощением излучения Солнца в красной области спектра в диапазоне 650–690 нм и резким подъемом значений СПЭЯ в ближней ИК-области.

Среди антропогенных объектов можно выделить здание с красной металло-черепичной крышей (рис. 10а) и полотно асфальтовой дороги (рис. 10б). Красная крыша, как и следовало ожидать, характеризуется резким подъемом СПЭЯ в области 580–620 нм. Спектр отражения от асфальта характеризуется квазиэкспоненциальным спаданием. Он значительно отличается от других спектров отсутствием выраженных особенностей (спадов или пиков).

Для демонстрации высокой пространственной разрешающей способности созданного гиперспектрометра приведем результат съемки просеки (попутная основная задача) в лесном массиве с линией электропередачи (ЛЭП), результаты которой в RGB-цветах показаны на рис. 11 (на цветн. вклейках). Именно высокое пространственное разрешение прибора позволило выделить на снимке провода ЛЭП, опоры и тени от них.

Отметим, что гиперспектрометрия, при ее практических применениях, должна применяться не в рафинированном виде, а с учетом остальных, не менее важных, факторов для ДЗ. К такому относятся – многоракурсные измерения, по-

ляризационные измерения и т.п. Игнорирование последних в ряде задач возможно, но должно учитываться в общем виде. В этой связи в ЗАО “НТЦ “Реагент” был предложен проект многоракурсного гиперспектрометра (Родионов, 2012), позволяющий проводить съемку земной поверхности одновременно под разными углами визирования. Такое многоракурсное зондирование земной поверхности позволяет повысить достоверность процедур классификации и оценки состояния зондируемых объектов.

Это особенно существенно при съемке объектов со сложной пространственной структурой. При гиперспектрометрии высокого пространственного разрешения по объектам инфраструктуры, например, по зданиям, разные ракурсы дают принципиально разный спектр. Например, съемка в надири дает спектр материала крыши дома, а при съемке под углом спектр сигнала, восходящего от стен дома и окон. В результате усредненного описания ошибки будут уже в первом порядке. В настоящее время за рубежом для таких задач предлагается пятиракурсная съемка (Mententi, 2004).

Продемонстрируем функционирование многоракурсного гиперспектрометра на примере прибора, показанного на рис. 12 (на цветн. вклейках), в котором диафрагменный узел состоит из трех щелей. Отраженные, рассеянные или излучаемые фотоны от объекта попадают во входной объектив 1, который формирует изображение объекта на многощелевом диафрагменном узле. Каждая щель выделяет изображение узкого участка объекта, видимого под разными углами, как это показано на рис. 13, на котором приведены три положения (а, б и в) гиперспектрометра при пролете носителя прибора над изучаемым объектом. Был изготовлен макет трехщелевого гиперспектрометра (Егоров и др., 2013), который продемонстрировал справедливость предложенной идеи.

Полученный опыт практической работы по созданию гиперспектральных систем и получения и обработки полетной информации позволил перейти от этапа исследовательской работы по апробированию гиперспектральной технологии к следующему этапу – промышленному освоению гиперспектральных систем и их серийному производству. Для этого на основании предыдущего опыта была разработана линейка современных гиперспектральных модулей УФ-, видимого ближнего ИК-диапазонов для мобильных и бортовых применений, охватывающих диапазон от УФ- (200 нм) до ближнего ИК-диапазона (1.1 мкм). На рис. 14 представлены изображения модулей указанной выше линейки.

Вся линейка гиперспектральных модулей (пять приборов) предназначена для проведения детального мониторинга техногенных систем и элемен-

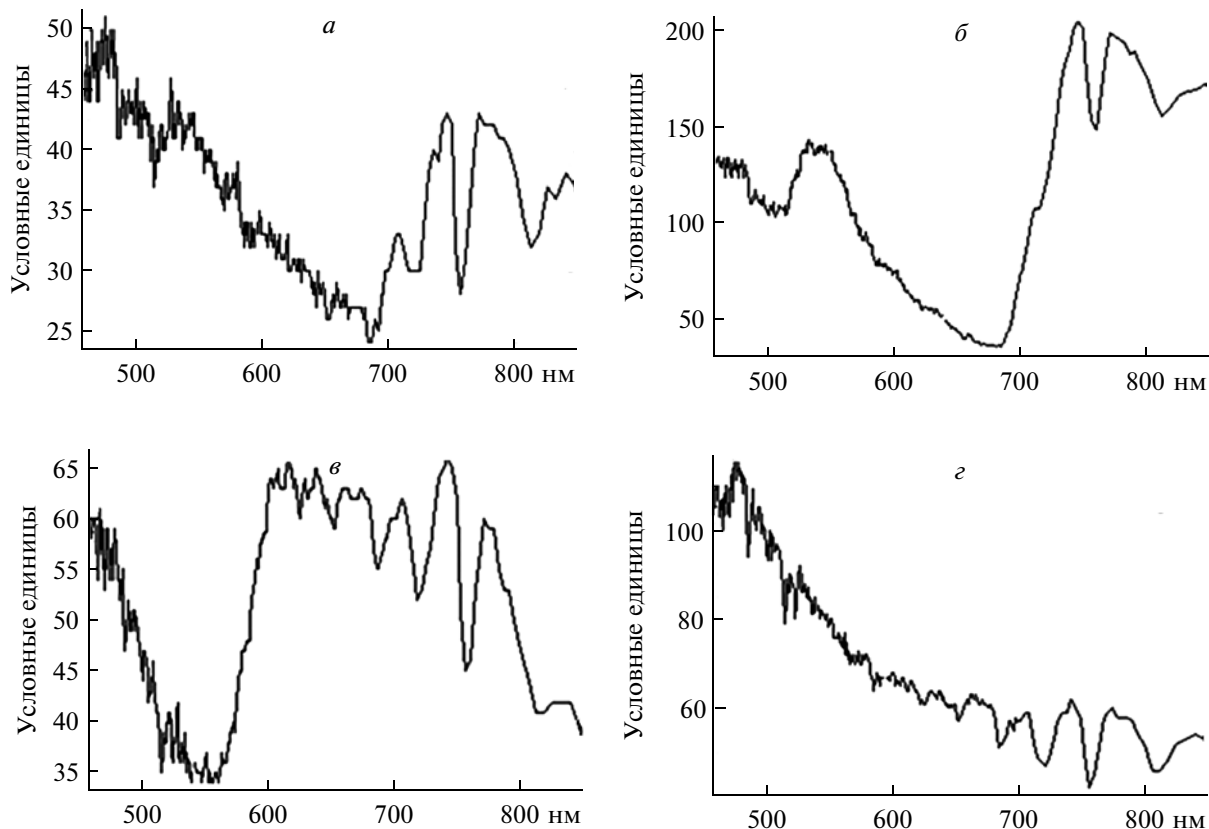


Рис. 10. Графики (ненормированные) спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в точках а, б, в, г рис. 9.

тов их инфраструктуры. Конструктивно каждый модуль линейки выполнен в виде моноблока без единой крепежной плиты. В качестве спектроделителя во всех приборах использована призма.

В табл. 5 перечислены характеристики представленных на рис. 14 модулей.

Предлагаемые потребителю гиперспектральные комплексы снабжаются компактной системой бортовой обработки (предобработка, включающая калибровку, а также тематическую обработку) и хранения данных в реальном времени, интегрируются с навигационной системой борта

Таблица 5. Характеристики линейки гиперспектральных модулей

№ пп	Характеристика	Гиперспектральные модули				
		УФ	УФ-ВИД	ВИД –ИК-1	ВИД –ИК-2	ВИД –ИК-3
1	Спектральный диапазон, мкм	0.2–0.3	0.35–0.55	0.45–1.0	0.45–0.9	0.4–1.0
2	Угол поля зрения, град	60	60	60	20	35
3	Пространственное разрешение с высоты 1 км, м	от 0.3				
4	Число каналов	до 500				
5	Частота кадров, 1/с	до 100				
6	Масса, кг	5.8	6.6	11	1.95	3.2
7	Габариты, мм	605 × 235 × 105	590 × 310 × 102	575 × 315 × 135	400 × 180 × 80	425 × 230 × 84
8	Наличие термостабилизации	да		да		

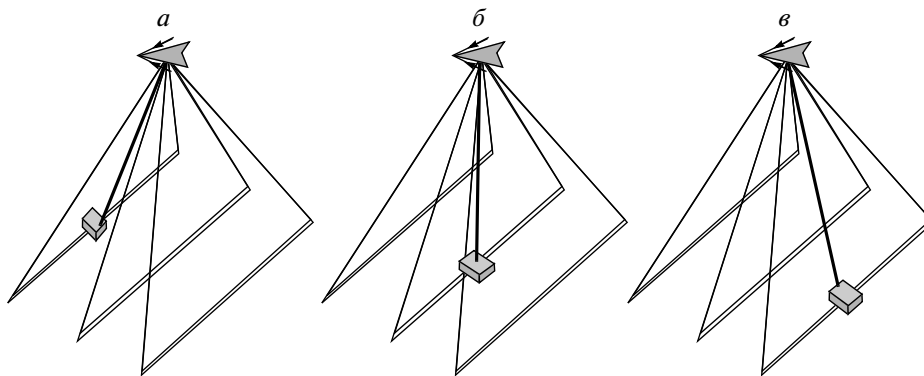


Рис. 13. Пролет многослойного гиперспектрометра над объектом.

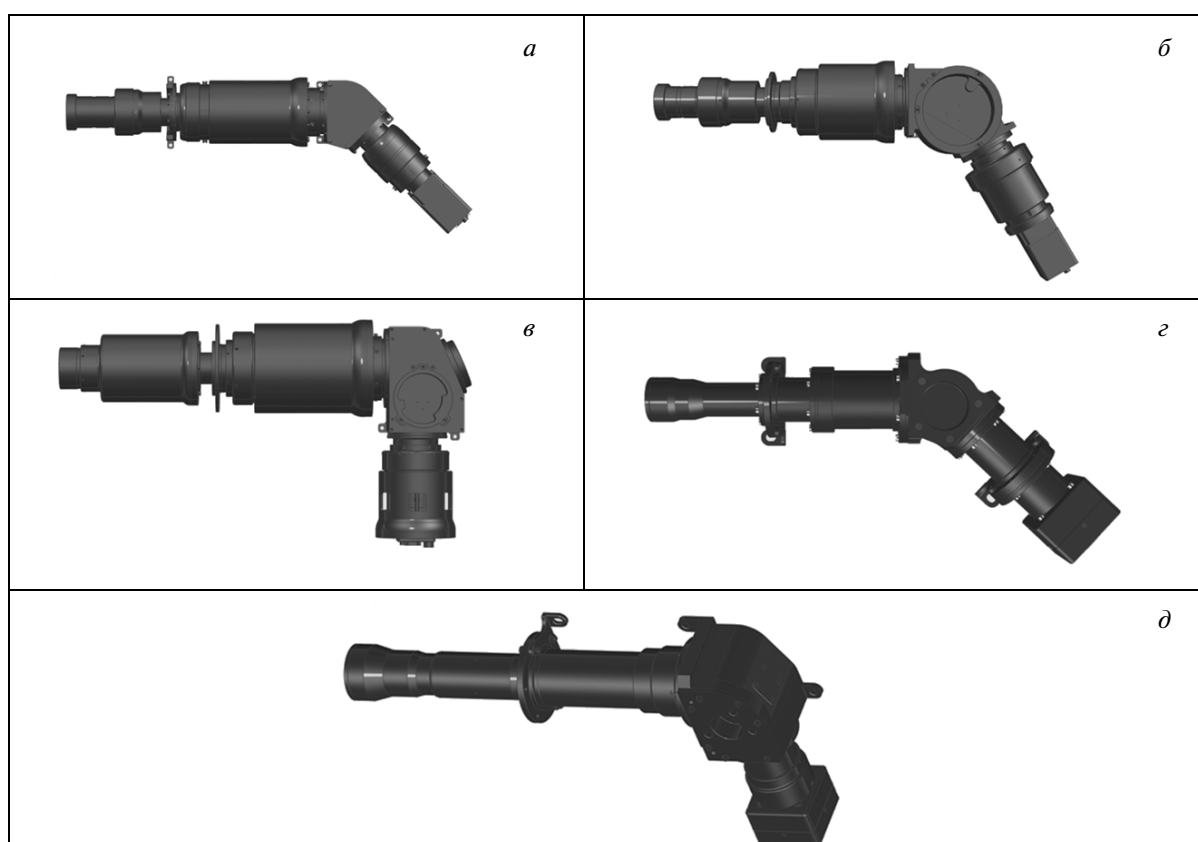


Рис. 14. Линейка гиперспектральных модулей: *a* – УФ-диапазон; *б* – УФ-ВИД; *в* – ВИД-ИК-1; *г* – ВИД-ИК-2; *д* – ВИД-ИК-3.

и обеспечивают передачу данных в каналы связи. Комплексы адаптируются по требованию потребителя к конкретным носителям и целевым назначениям. Возможно как использование отдельных модулей, так и комплексов модулей с масштабируемой системой бортовой совместной обработки данных.

Для демонстрации возможностей созданных гиперспектрометров на рис. 15 (на цветн. вклей-

ках) показан гиперспектральный снимок окружающей промышленной зоны модулем ВИД-ИК-3.

На рис. 16 показан график нормированной спектральной плотности энергетической яркости рассеяния атмосферой солнечного излучения в точке изображения неба на этом снимке. Хорошо видны линии поглощения различных газов и аэрозолей природного и антропогенного происхождения. Анализ спектральной кривой на рис. 16 пока-

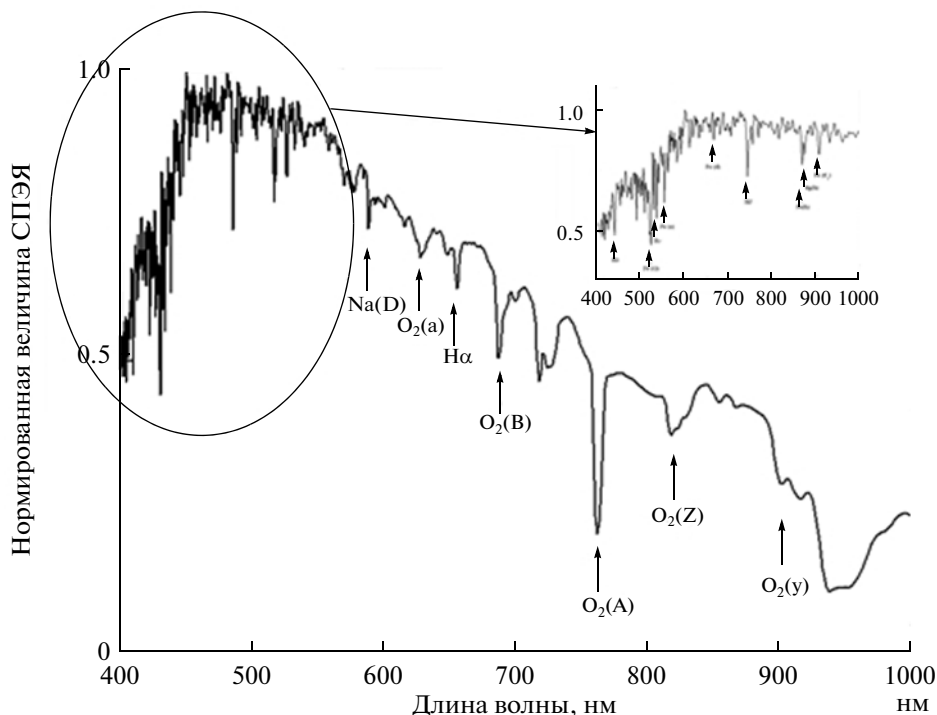


Рис. 16. Нормированное значение спектральной плотности энергетической яркости рассеяния атмосферой солнечного излучения.

зывает, что на разработанных для серийного производства образцах получено не только уникальное для широкоугольной гиперспектрометрии пространственное разрешение (около 1000 линий в поле зрения), но одновременно фактически достигнуто ультраспектральное разрешение (в сине-зеленой области спектра) — порядка 0.2 нм. Обратим внимание, что неравномерность по спектральной координате, свойственная призмным спектрометрам (на красной границе разрешение ухудшается до 2–3 нм), в данном случае коррелирует с более густым расположением линий поглощения в сине-зеленой области спектра. Поэтому имеется четкое выделение линий поглощения на всем диапазоне длин волн. Число спектральных каналов — не менее 500 (обратим внимание, что часто под спектральным разрешением понимают размерность используемой матрицы, что неверно).

Частота кадров на уровне 100 Гц реализуется практически в течение всего светлого времени суток.

Для диапазона 0.2–0.3 мкм возможно использование монофотонного сенсора (Белов и др., 2010, Rodionov et al., 1997a), обеспечивающего предельно высокий уровень чувствительности и динамического диапазона в данной области спектра. В этом случае кадровое накопление отсутствует и возможна регистрация быстропротекающих процессов с временным разрешением до 1 нс и лучше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проводимые с начала 1990-х годов разработки гиперспектральных приборов ЗАО “НТЦ “Реагент” достигли к настоящему времени промышленной зрелости и подготовлены к серийному производству.

Достигнутые технические характеристики позволяют утверждать, что фактически создана широкодиапазонная светосильная ультраспектральная аппаратура высокого пространственного разрешения с возможностью бортовой обработки в реальном времени, что, с одной стороны, открывает новые информационные возможности, а, с другой стороны, требует развития методического аппарата ультраспектральной технологии, которая несколько отличается от гиперспектральной и в настоящее время представляется достаточно новой и перспективной технологией.

Разрабатываемые приборы могут устанавливаться на воздушных и автомобильных носителях, включая малоразмерные.

Предлагаемые потребителю гиперспектральные комплексы снабжаются компактной системой бортовой обработки (предобработка, включающая калибровку, а также тематическую обработку) и хранения данных в реальном времени, интегрируются с навигационной системой борта и обеспечивают передачу данных в каналы связи. Комплексы адаптируются по требованию потре-

бителя к конкретным носителям и целевым назначениям. Возможно как использование отдельных модулей, так и комплексов модулей с масштабируемой системой бортовой совместной обработкой данных.

Накопленный опыт создания гиперспектральной аппаратуры в ЗАО «НТЦ «Реагент» позволяет при наличии финансирования перейти к созданию компактной по габаритам и весам бортовой космической аппаратуры высокого пространственного и спектрального разрешения с необходимым числом каналов для мониторинга природно-техногенных объектов Земли.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственный контракт № 16.523.11.3005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аванесов Г.А.* Проблемы аэрокосмической спектроскопии земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 1980. № 2. С. 34–43.
- Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д.* Кластеризация почвенно-растительных объектов с помощью нейросетевого алгоритма Кохонена // Зондирование Земли из космоса. Вып. 5. Т. I. М.: ООО Азбука-2000, 2008а. С. 32–39.
- Балтер Д.Б., Белов А.А., Воронцов Д.В., Ведешин Л.А., Егоров В.В., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов А.И., Родионова И.П., Федунин Е.Ю.* Проект спутникового гиперспектрометра, предназначенного для малого космического аппарата // Исслед. Земли из космоса. 2007а. № 2. С. 43–55.
- Балтер Б.М., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Останний А.Н., Родионова И.П., Родионов И.Д.* Оценка возможностей гиперспектральной съемки для дистанционного обнаружения заданного типа растительности: Препринт № Пр-2134. М.: ИКИ РАН, 2007б. 28 с.
- Балтер Б.М., Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Стальная М.В., Чекалина Т.И.* Целевое выделение растительных сообществ по данным авиационной гиперспектральной съемки и много спектрального сенсора «QuickBird» // Исслед. Земли из космоса. 2008б. № 6. С. 34–42.
- Белов А.А., Воронцов Д.В., Дубровицкий Д.Ю., Калинин А.П., Любимов В.Н., Макриденко Л.А., Овчинников М.Ю., Орлов А.Г., Осипов А.Ф., Полищук Г.М., Пономарев А.А., Родионов И.Д., Родионов А.И., Салихов Р.С., Сенник Н.А., Хренов Н.Н.* Малый космический аппарат «Астрогон-Вулкан» гиперспектрального дистанционного мониторинга высокого разрешения: Препринт № 726. М.: ИПМех РАН, 2003. 32 с.
- Белов А.А., Калинин А.П., Крысюк И.В., Порохов М.А., Родионов А.И., Родионов И.Д., Русанов В.В.* Монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона «Скорпион» // Датчики и системы. 2010. № 1. С. 47–50.
- Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калинин А.П., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф.* Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли: Препринт № 702. М.: ИПМ РАН, 2002а. 35 с.
- Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калинин А.П., Родионов А.И., Шилов И.Б., Родионов И.Д., Любимов В.Н., Осипов А.Ф., Зубков Б.В., Яковлев Б.А.* Оценка спектрального и пространственного разрешения гиперспектрометра АГСМТ-1: Препринт № 704. М.: ИПМ РАН, 2002б. 36 с.
- Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д.* Бортовой гиперспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: ИКИ РАН, 2012. Т. 9. № 3. С. 101–107.
- Егоров В.В., Ильин А.А., Калинин А.П., Родионов А.И., Родионов И.Д.* Оценка количественных биометрических характеристик посевов наркосодержащих культур по данным авиационного гиперспектрального зондирования // Исслед. Земли из космоса. № 5. 2011. С. 64–69.
- Егоров В.В., Калинин А.П., Мельникова Е.М., Родионов И.Д., Родионова И.П., Родионов А.И.* Многощелевой гиперспектрометр типа push-broom для дистанционного зондирования земной поверхности: Препринт № 704. М.: ИПМ РАН, 2013. 28 с.
- Ильин А.А., Виноградов А.Н., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов И.Д., Родионов А.И.* Способ оценки количественной характеристики зондируемой поверхности Земли: Патент № 2411468. 2011а. № 4.
- Ильин А.А., Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д., Родионов А.И.* Способ устранения искажений изображений дистанционного зондирования, связанных со сложной траекторией движения носителя сенсора изображения: Патент № 2411449. 2011а. № 4.
- Калинин А.П., Орлов А.Г., Родионов И.Д.* Авиационный гиперспектрометр // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2006. № 3. С. 11–24.
- Непобедимый С.П., Родионов И.Д., Воронцов Д.В., Орлов А.Г., Калашников С.К., Калинин А.П., Овчинников М.Ю., Родионов А.И., Шилов И.Б., Любимов В.Н., Осипов А.Ф.* Гиперспектральное дистанционное зондирование Земли // Докл. РАН. 2004. Т. 397. № 1. С. 45–48.
- Орлов А.Г.* Разработка и исследование авиационного гиперспектрометра видимого и ближнего ИК диапазонов: Дис. канд. техн. наук. М.: ИКИ РАН, 2008. 163 с.
- Родионов И.Д., Родионов А.И., Калинин А.П., Егоров В.В.* Многоакурсный гиперспектрометр для дистанционного зондирования земной поверхности: Патент № 121366. 2012. № 29.
- Хренов Н.Н., Дмитриевский А.Н., Ананенков А.Г., Шермет В.В., Пономарев А.А., Родионов И.Д.* Гиперспектральный аэрокосмический мониторинг трасс трубопроводов и территорий месторождений // Наука и техника в газовой промышленности. 2001. № 2-3. С. 37–46.
- Akim E.L., Behr P., Bries K., Egorov, Fedunin E.Yu., Kalinin A.P., Kalashnikov S.K., Kolk K.-H., Montenegro S., Rodionov A.I., Rodionov I.D., Ovchinnikov M.Yu., Orlov A.G., Pletner S., Shub B.R., Vedeshin L.A., Vorontsov D.V.* The fire infrared-hyperspectral monitoring (Russian – Germany Proposals for an International Earth Observation Mission): Preprint № 32. М.: Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, 2004. 36 p.

Dedikov E., Khrenov N., Lukyaschenko V., Salikhov R., Ponomarev A., Ovchinnikov M., Rodionov I. The Russian small satellite for hyperspectral monitoring of gas pipelines // Digest of 3rd Int. Symp. Int. Acad. of Astronautics. Berlin. 2001. P. 235–239.

Larar Allen M., Hyo-Sang Chung, Makoto Suzuki, Han'guk Haeyang Yŏn'guwŏn. Multispectral, hyperspectral, and ultraspectral remote sensing technology, techniques, and applications III // Proc. SPIE International Society for Optical Engineering. 13–14 October 2010. Incheon, Korea Republic, 2010. V. 7857.

Makridenko L.A., Salikhov R.S., Ovchinnikov M.Y., Khrenov N.N., Montenegro S., Behr P., Pletner S., Rodionov I.D. Mono-photon technology based on hyperspectral systems for remote sensing in Russia. // 4th IAA Symp. Small satellites for Earth observation. April 7–11, 2003. Berlin. iaa-b4-702.

Massimo M., Maselli F., Chiesi M., Benedetti R., Cristofori S., Guzzi D., Magnani F., Raddi S., Maffei C. Multi-angular hyperspectral observations of Mediterranean forest with PROBA-CHRIS // Proc. SPIE 5546, Imaging Spectrometry X, 204. October 15, 2004. doi:10.1117/12.559348.

Rodionov I., Ponomarev A. Active Optical Ecological Monitoring // SPIE. 1993. V. 2107. P. 476–494.

Rodionov I., Ponomarev A. Wide aperture acousto-optic turnable filters for visible and UV lights // SPIE. 1996. V. 2449. P. 200–207.

Rodionov I., Rodionova I., Ovchinnikov M. Approaches to develop the Earth observing systems based on the turnable acousto-optic filter and separate photons counter with MCP // SPIE. 1997a. V. 3117. № 3117-10.3.

Rodionov I., Rodionova I., Ovchinnikov M. The microsatellite for remote exploration of environment // SPIE. 1997b. V. 3119. № 3119-11.

Aviation Hyperspectral Complexes for Remote Sensing Problems

I. D. Rodionov¹, A. I. Rodionov², L. A. Vedeshin³, A. N. Vinogradov⁴, V. V. Egorov⁵, A. P. Kalinin⁶

¹ *Semyonov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre, Moscow*

³ *Presidium of Russian Academy of Sciences, Moscow*

⁴ *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow*

⁵ *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

⁶ *Ishlinsky Institute of Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Retrospect of aviation hyperspectral developments carried out by Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre is presented. Hyperspectral devices which were developed from the end of past century to nowadays are described. The set of hyperspectrometers created in the last time covered the band from UV (0.2 μ) to near infrared (1.0 μ). These devices can be installed in air and auto carriers. Created by Stock Company, Reagent Scientific Engineering Centre hyperspectral devices are ready for the series production. Their technical characteristics permit to confirm that it was really created the wide-range high-aperture ultra spectral equipment with high spatial resolution.

Keywords: hyperspectrometer, aviation, remote sensing, spectrum, image, spectral and spatial resolution, field of view

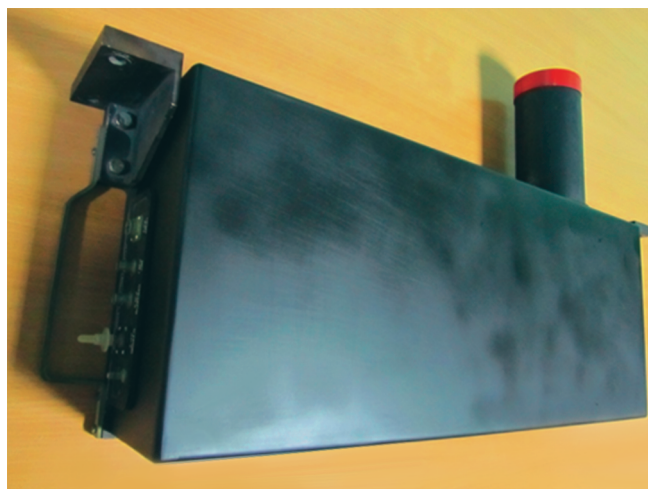


Рис. 3

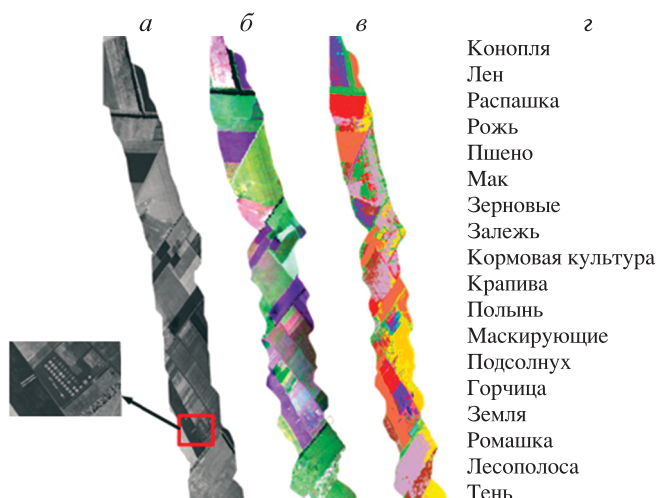


Рис. 7

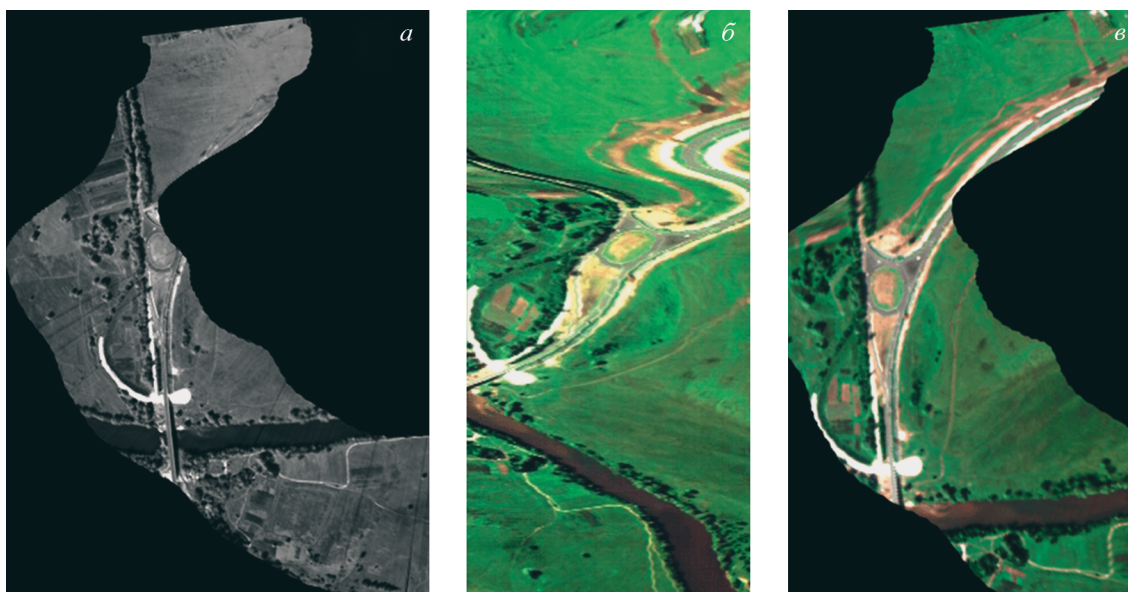


Рис. 6

Рис. 3. Гиперспектральный модуль видимого и ближнего ИК-диапазона.

Рис. 6. Пример геометрической коррекции гиперспектральных изображений: *а* – видеоизображение корректируемого участка; *б* – исходное гиперспектральное изображение этого же участка; *в* – результат геометрической коррекции.

Рис. 7. Пример использования материалов авиационной гиперспектральной съемки для классификации растительности: *а* – трассовая видеосъемка (на врезке показан тестовый полигон); *б* – исходное гиперспектральное RGB-изображение трассы; *в* – результаты классификации с обучением; *г* – легенда.



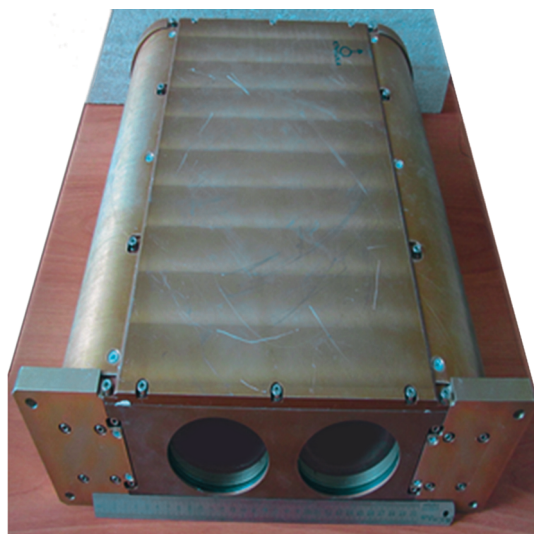


Рис. 8



Рис. 9



Рис. 11

Рис. 8. Макет бортового гиперспектрометра видимого и ближнего инфракрасного диапазона с высоким пространственным разрешением.

Рис. 9. Гиперспектральное RGB-изображение поселка и его окрестностей.

Рис. 11. Гиперспектральное RGB-изображение просеки в лесу с линией электропередачи, полученное с борта самолета.



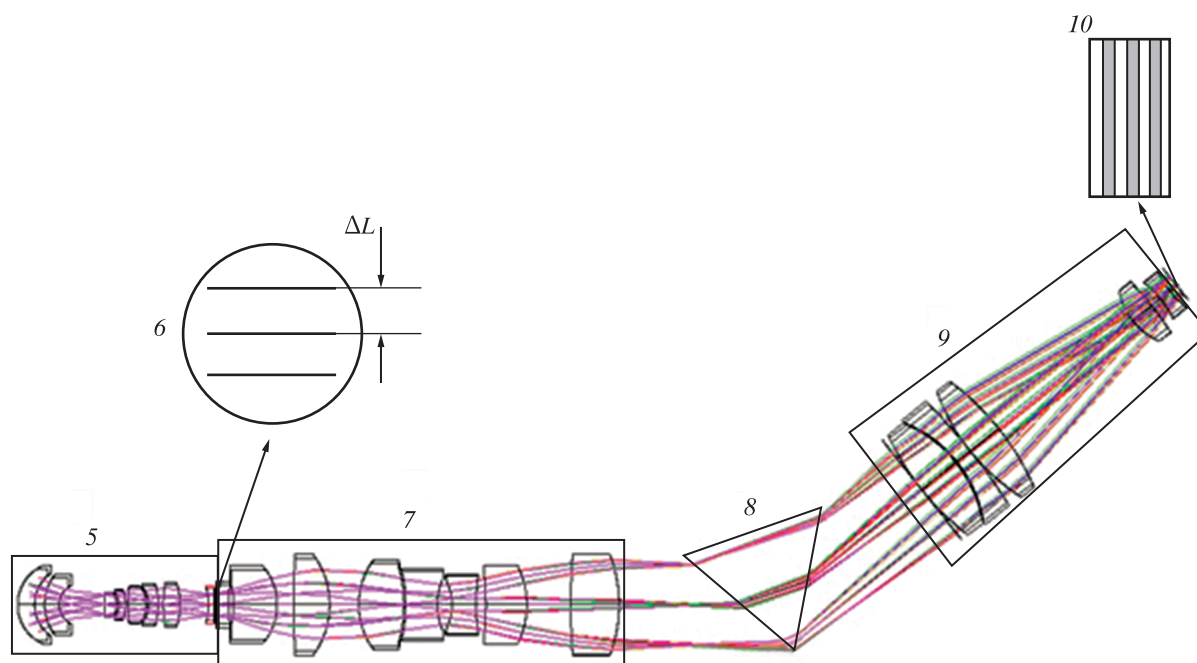


Рис. 12. Оптическая схема многощелевого (трехщелевого) гиперспектрометра.



Рис. 15. Гиперспектральный RGB-снимок, полученный из окна сканированием гиперспектрометром ВИД-ИК-2.

