

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., предстоящий 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 теле связи 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{g} (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 перцептрон (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 RTTOV-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 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 пикселах, 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

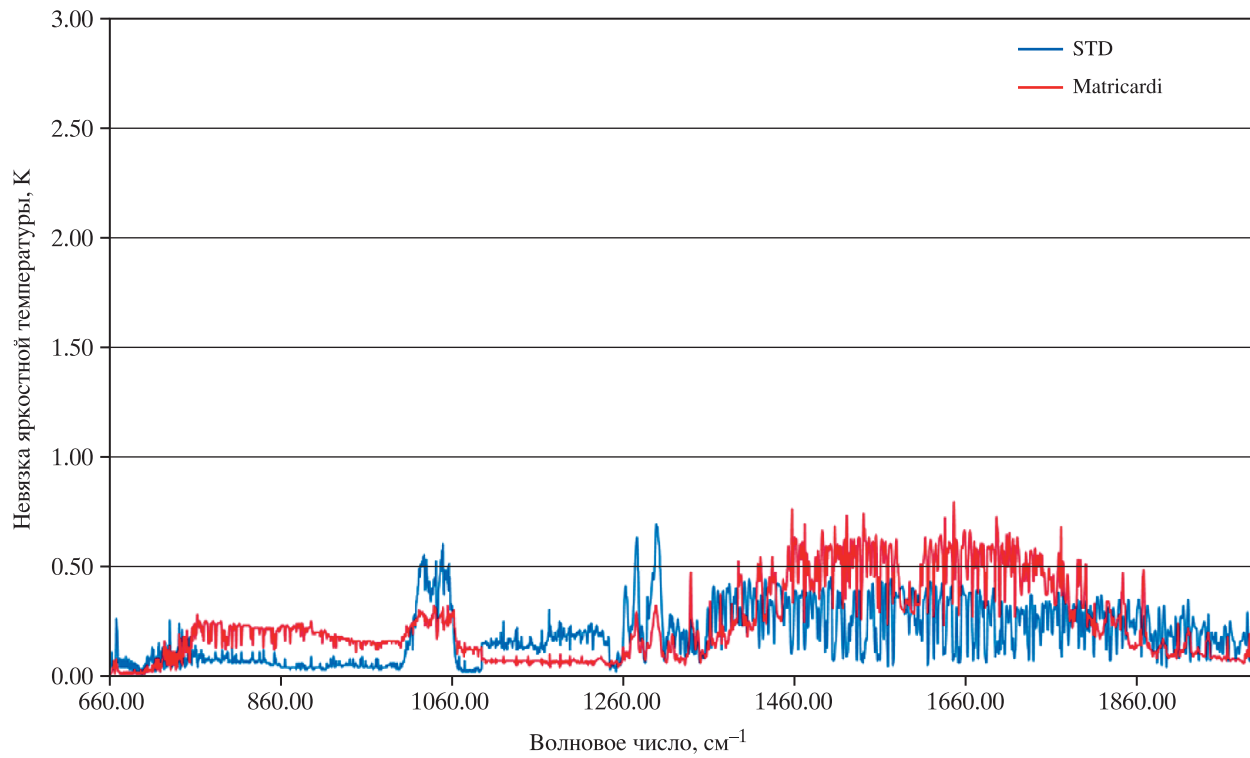


Рис. 1. Сравнение результатов моделирования спектров ИКФС-2 с помощью БРМ/ИКФС и LBLRTM.

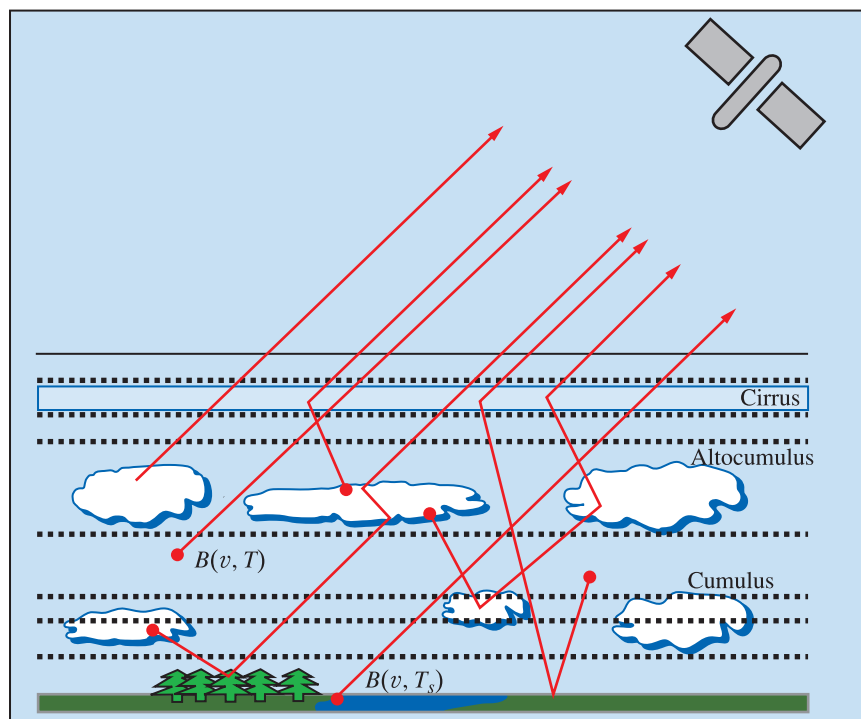


Рис. 2. Геометрическая схема расчетов в алгоритме Монте-Карло.



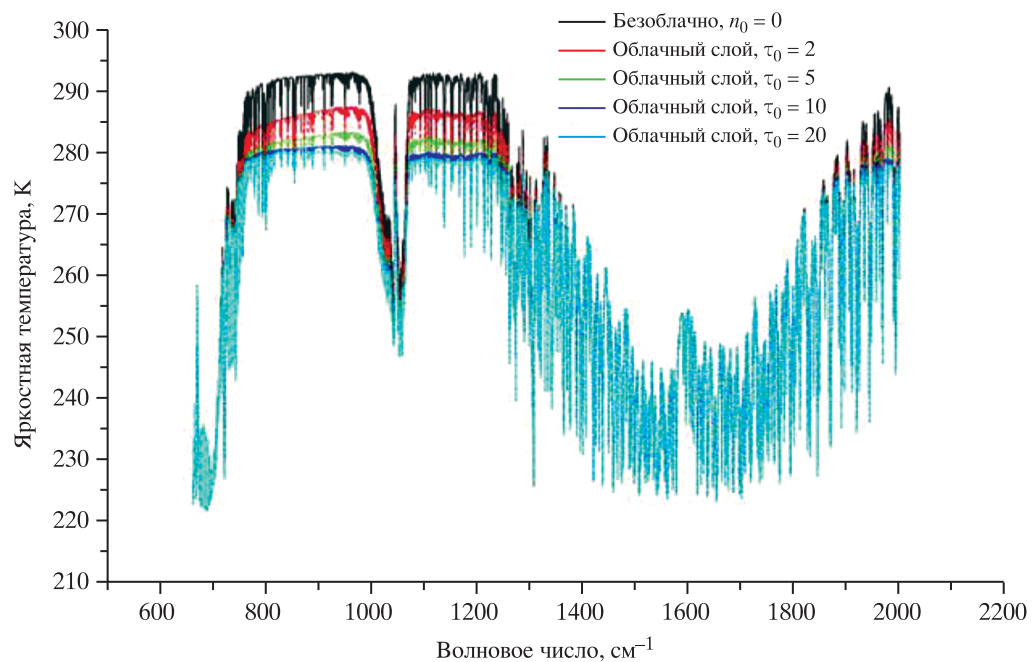


Рис. 4. Спектры яркостных температур в каналах ИКФС-2 при сплошном облачном слое с различной оптической толщиной τ_0 , летняя среднеширотная модель атмосферы.

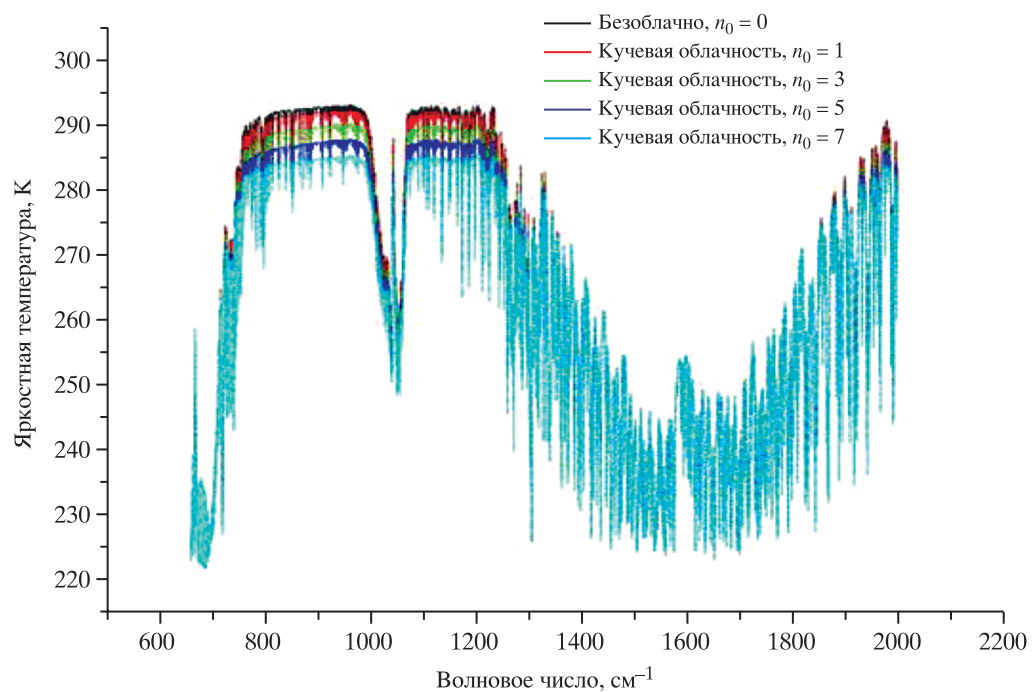


Рис. 5. Спектры яркостных температур в каналах ИК-зондировщика ИКФС-2 при различных баллах кучевой облачности, летняя модель атмосферы.