

УДК 551.501.8

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВСЕПОГОДНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА AIRS/AMSU СПУТНИКА AQUA С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СВЧ-РАДИОМЕТРА ATMS СПУТНИКОВ SUOMI-NPP И NOAA-20

© А. А. Лагутин, Е. Ю. Мордвин, Н. В. Волков, А. И. Ревякин

*Алтайский государственный университет,
656049, г. Барнаул, просп. Ленина, 61
E-mail: lagutin@theory.asu.ru, zion0210@gmail.com*

Обсуждается технология обработки данных гиперспектрального зондировщика AIRS и микроволнового радиометра AMSU-A (установленных на спутнике Aqua), позволяющая восстанавливать геофизические параметры атмосферы и подстилающей поверхности даже при 80 % закрытия зоны наблюдения облаками. Выход из строя прибора AMSU-A в 2016 г. привел к исключению его данных из схемы обработки AIRS и внедрению упрощённого алгоритма AIRS Only, используемого сегодня в NASA. Предложен подход для восстановления «всепогодности» AIRS с использованием данных СВЧ-радиометра ATMS, установленного на спутниках Suomi-NPP и NOAA-20. Показано, что включение в алгоритм обработки данных ATMS позволяет получать геофизические результаты, практически совпадающие с оригинальными данными AIRS/AMSU.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, гиперспектрометр AIRS, СВЧ-радиометры AMSU-A и ATMS, спутники Aqua, Suomi-NPP, NOAA-20.

DOI: 10.15372/AUT20220210

Введение. В настоящее время гиперспектральная съёмка в ИК-диапазоне является важным источником спутниковой информации, которая используется для оценки климатических изменений [1], мониторинга состояния атмосферы и подстилающей поверхности [2], оценки содержания парниковых газов [3].

Современная эра космической гиперспектральной съёмки началась с запуска 4 мая 2002 г. на полярную солнечно-синхронную орбиту космической платформы Aqua [4, 5].

Одним из приборов этого спутника является зондировщик AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder) [4]. Гиперспектрометр AIRS осуществляет сканирование поверхности Земли и атмосферы 2378 каналами в направлении, перпендикулярном вектору скорости спутника. Ширина области сканирования ~ 1600 км. Прибор регистрирует интенсивность уходящего теплового излучения в диапазонах 3,74–4,61 мкм ($2169\text{--}2674\text{ см}^{-1}$), 6,20–8,22 мкм ($1217\text{--}1613\text{ см}^{-1}$), 8,8–15,4 мкм ($649\text{--}1136\text{ см}^{-1}$) с высоким спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda \sim 1200$ [5]. Эти спектральные диапазоны включают важные для восстановления параметров атмосферы зоны поглощения: углекислого газа (4,3 и 15 мкм), водяного пара (6,3 мкм), метана (7,7 мкм) и озона (9,6 мкм).

Для корректного восстановления геофизических параметров атмосферы и подстилающей поверхности при присутствии облачных структур в штатной схеме обработки измерений AIRS используются данные 15-канального микроволнового прибора AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit), также установленного на спутнике Aqua. Микроволновый радиометр AMSU-A состоит из двух модулей, которые включают 15 каналов. Модуль 2 (AMSU-A2) имеет два канала (23,8 и 31,4 ГГц), предоставляющие информацию об излучательной способности поверхности, содержании водяного пара и жидкой воды в облаках. Модуль 1 (AMSU-A1) имеет 12 каналов в полосе поглощения кислорода 50–58 ГГц,

обеспечивая возможность первичного температурного зондирования, а также имеет один канал с частотой 89 ГГц, предоставляющий информацию о поверхности и влажности.

Совместное использование данных AIRS и AMSU-A позволило с августа 2002 г. восстанавливать параметры системы даже при 80 % закрытия зоны наблюдения облаками [6, 7].

В 2016 г. прибор AMSU-A вышел из строя и его измерения были исключены из схемы обработки данных AIRS. Сегодня обработка зондировщика в NASA проводится с использованием упрощённого алгоритма AIRS Only [8].

Анализ ряда общедоступных данных современных спутниковых систем показал, что восстановление «всепогодности» AIRS возможно с использованием наблюдений СВЧ-радиометра ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder), установленного на спутниках Suomi-NPP и NOAA-20, орбиты которых близки к спутнику Aqua.

Спутник Suomi-NPP был запущен 28 октября 2011 г. Микроволновый радиометр ATMS является одним из пяти приборов платформы [9]. Радиометр ATMS сочетает в себе возможности сенсоров предыдущего поколения, в частности AMSU-A. Однако по сравнению со своими предшественниками ATMS обладает большим количеством каналов (22 канала), лучшим пространственным разрешением, более широким частотным диапазоном (от 21,8 до 183,3 ГГц) [10]. Каждый канал отвечает за детектирование температуры определённого атмосферного уровня. Ширина полосы захвата ATMS ~2300 км. Характеристики каналов радиометра ATMS представлены в табл. 1. Видно, что вышедшие из строя каналы AMSU-A (обозначены звёздочкой) имеют аналоги в составе детекторов микроволнового радиометра ATMS.

После того как радиометр ATMS хорошо зарекомендовал себя в комплексе аппаратуры Suomi-NPP, было принято решение о включении прибора в другие спутниковые

Таблица 1

Характеристики каналов микроволнового радиометра ATMS

№	Центр канала, ГГц	Ширина канала, ГГц	Аналогичный канал AMSU
1	23,8	0,27	1*
2	31,4	0,18	2*
3	50,3	0,18	3
4	51,76	0,4	—
5	52,8	0,4	4*
6	53,596 ± 0,115	0,17	5*
7	54,4	0,4	6*
8	54,94	0,4	7*
9	55,5	0,33	8
10	57,290344	0,33	9*
11	57,290344 ± 0,217	0,078	10
12	57,290344 ± 0,3222 ± 0,048	0,036	11
13	57,290344 ± 0,3222 ± 0,022	0,016	12
14	57,290344 ± 0,3222 ± 0,010	0,008	13
15	57,290344 ± 0,3222 ± 0,0045	0,003	14*
16	88,2	2	—
17	165,5	3	—
18	183,31 ± 7	2	—
19	183,31 ± 4,5	2	—
20	183,31 ± 3	1	—
21	183,31 ± 1,8	1	—
22	183,31 ± 1	0,5	—

миссии, такие как JPSS-1 (запущен 18 ноября 2017 г., вскоре после запуска переименован в NOAA-20) и JPSS-2 (планируется к запуску в 2022 г. [11]). Конфигурации орбит NOAA-20 и Suomi-NPP близки друг к другу, что увеличивает частоту съёмки отдельно взятой территории.

Целью представленной работы является создание технологии восстановления всепогодного режима работы гиперспектрального комплекса AIRS/AMSU спутника Aqua с использованием данных СВЧ-радиометра ATMS спутников Suomi-NPP и NOAA-20.

Процедура замены данных AMSU. На момент выполнения исследования прибором, который в наибольшей степени соответствует критериям для использования результатов его измерений в алгоритме обработки AIRS/AMSU, является микроволновый радиометр ATMS, базирующийся на космических платформах Suomi-NPP и NOAA-20 [9, 12].

В силу того что геометрия наблюдений приборов ATMS и AMSU различна, в частности отличаются размер пиксела и ширина области сканирования, для использования показаний ATMS в алгоритме обработки AIRS/AMSU требуется корректный метод переноса (ресамплинга) этих данных в систему координат AMSU. Выбранный для работы метод должен учитывать не только разницу в размерах пикселей наблюдений AMSU и ATMS в надире и по краям зоны сканирования, но и форму поверхности зоны сканирования. Исчерпывающий функционал для выполнения всех преобразований данных предоставляет библиотека `rugesample` [13] языка программирования Python, средствами которой реализована процедура ресамплинга данных.

Апробация методики переноса данных ATMS выполнялась на результатах наблюдений за 2015 г., когда радиометр AMSU функционировал в штатном режиме. Из архива Центра космического мониторинга Алтайского государственного университета были выбраны данные AIRS/AMSU-Aqua, для которых разница времени наблюдения не превышала 15 мин со временем измерений ATMS/Suomi-NPP. В этом случае треки (проекция траектории спутника на поверхность Земли) двух космических платформ имеют наименьшую разницу, а параметры атмосферы и подстилающей поверхности не успевают значительно измениться. В обработке использовались результаты ночных и дневных съёмок, выполненных в течение всего года.

Анализ результатов расчётов, выполненных с использованием стандартных методов ресамплинга библиотеки `rugesample` показал, что лучший результат процедуры переноса данных ATMS в пространство наблюдений AMSU достигается для метода Гаусса с параметрами $\sigma = 8000$ и $R = 45\,000$ м.

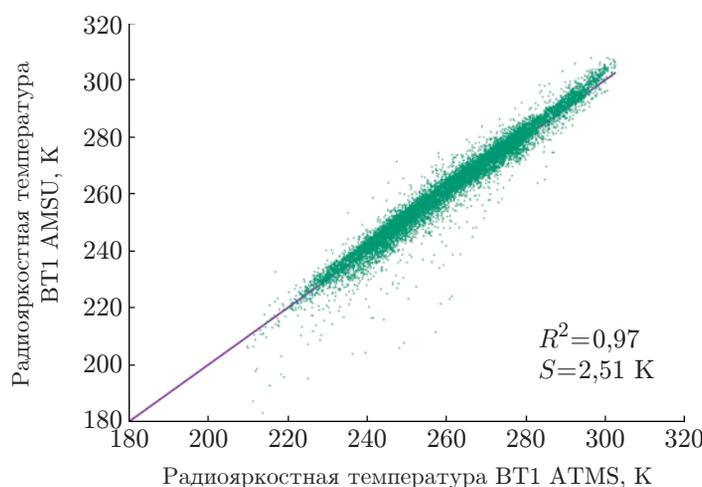


Рис. 1. Результаты корреляционного анализа радиояростной температуры первого канала AMSU

На рис. 1 показана диаграмма рассеяния для температуры первого канала AMSU (наблюдения) и результатов ресамплинга методом Гаусса данных ATMS, полученная для всего тестового набора данных. Установлено, что коэффициент корреляции для тестового набора данных $R^2 = 0,97$, а среднеквадратичное отклонение $S = 2,51$ К.

Предложенная процедура была реализована в вычислительном комплексе совместной обработки данных AIRS/AMSU/ATMS, созданном в лаборатории космического мониторинга и вычислительных технологий Алтайского государственного университета. В основе вычислительного комплекса лежит пакет IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package) версии 6 [14]. Схема обработки AIRS/AMSU/ATMS показана на рис. 2.

На первом этапе выполняется распаковка «сырого потока», полученного станцией приёма спутниковой информации АлтГУ [2, 3].

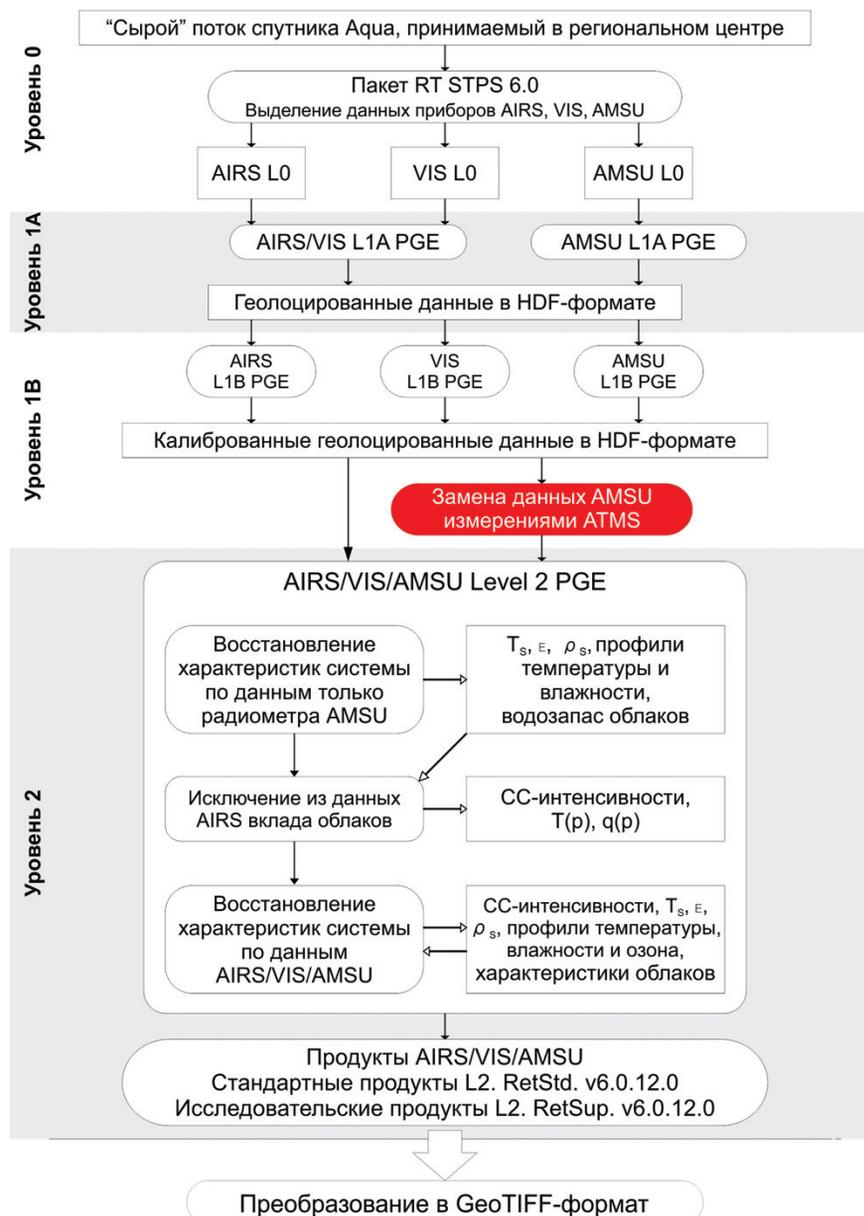


Рис. 2. Схема совместной обработки данных AIRS/AMSU/ATMS

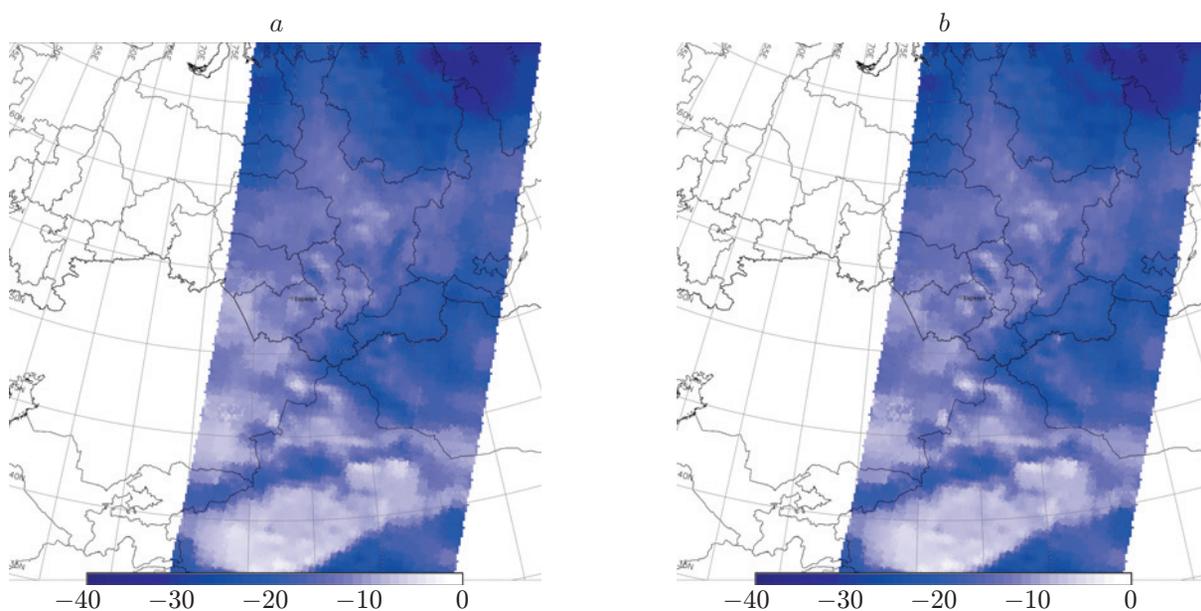


Рис. 3. Температура приземного слоя воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на 20:16 UTC 16 января 2015 г.: *a* — данные алгоритма AIRS/AMSU, *b* — результаты совместной обработки AIRS/AMSU/ATMS

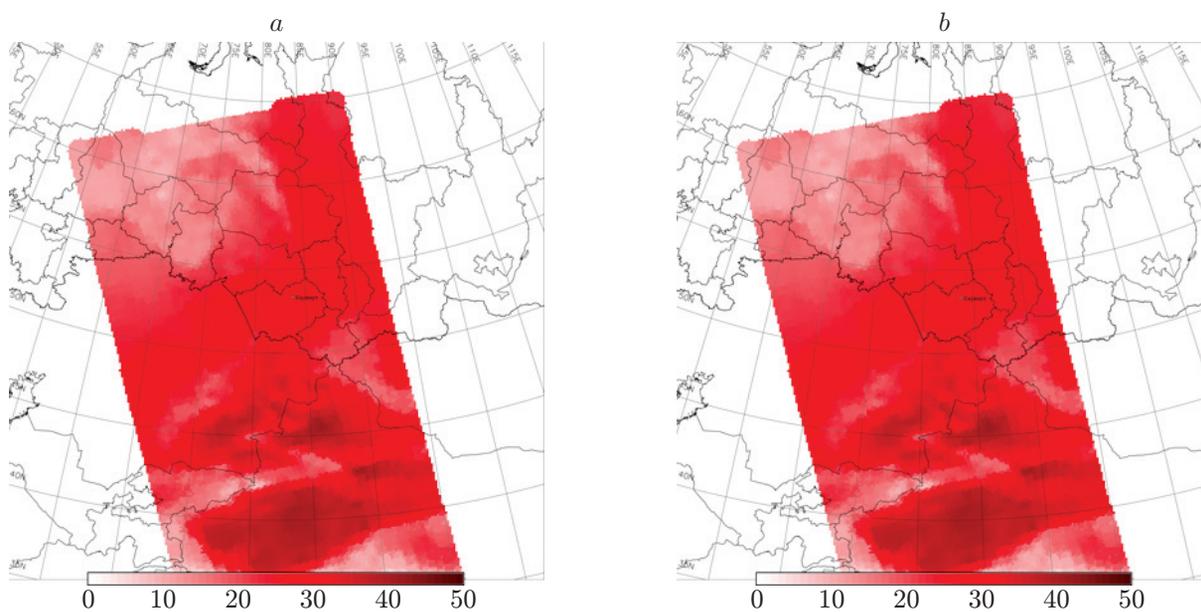


Рис. 4. Температура приземного слоя воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на 07:20 UTC 19 июля 2015 г.: *a* — данные алгоритма AIRS/AMSU, *b* — результаты совместной обработки AIRS/AMSU/ATMS

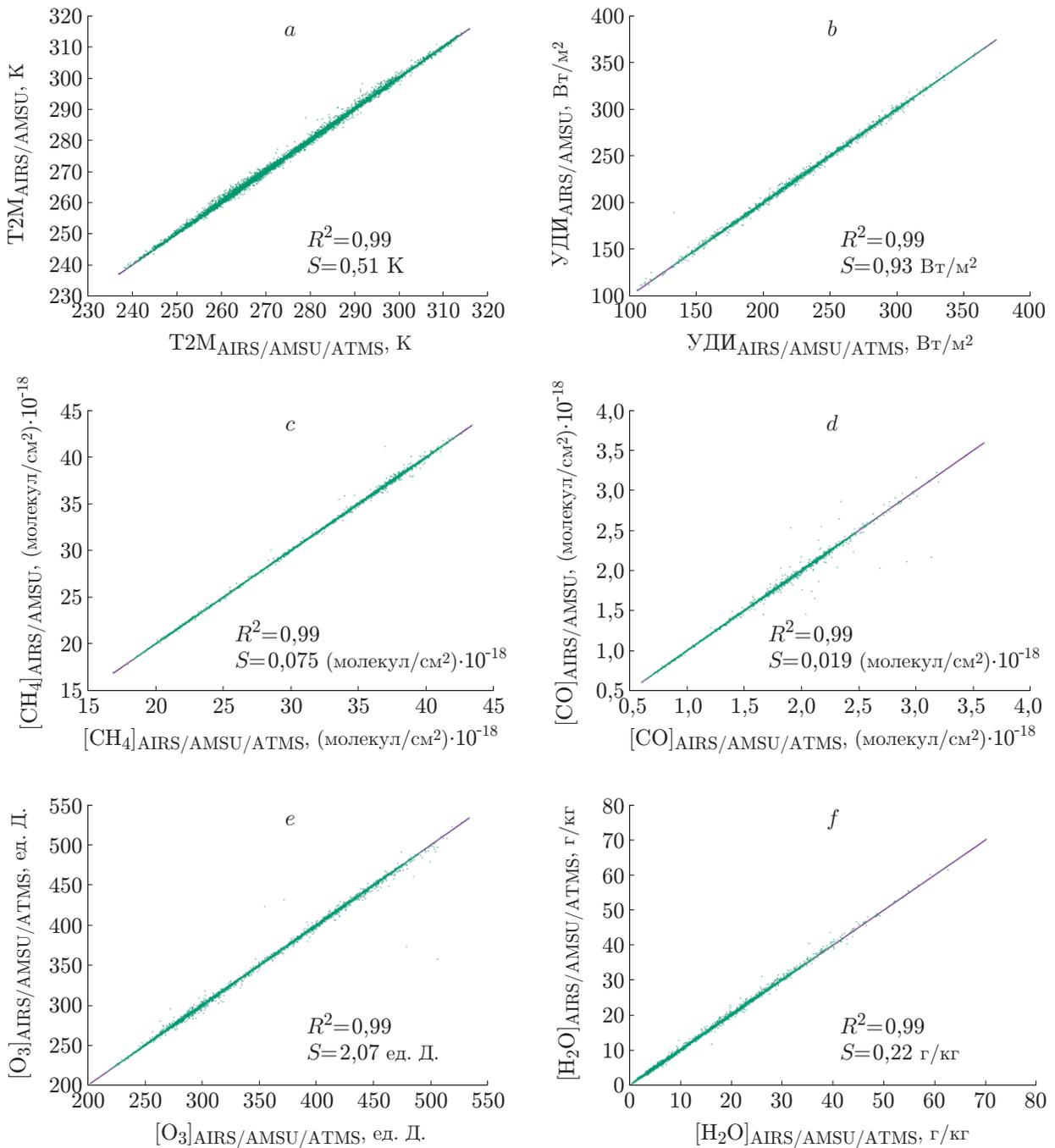


Рис. 5. Диаграммы рассеяния для некоторых продуктов уровня L2, полученные при корреляционном анализе данных алгоритма AIRS/AMSU версии 6 и результатов совместной обработки AIRS/AMSU/ATMS: *a* — приземная температура воздуха; *b* — уходящее из атмосферы длинноволновое излучение (УДИ); *c* — полное содержание метана; *d* — полное содержание угарного газа; *e* — полное содержание озона; *f* — полное содержание водяного пара в атмосфере (коэффициенты корреляции — R^2 и стандартные отклонения — S)

Для этого используется пакет RT-STPS (The Real-time Software Telemetry Processing System) версии 6.0 [15]. На уровне 1А выполняется геолицирование, а на уровне 1В — калибровка показаний всех приборов, входящих в измерительный комплекс. Восстановление характеристик атмосферы и подстилающей поверхности выполняется на уровне 2. Подсистема переноса данных ATMS в систему координат AMSU запускается по завершении всех процедур уровня L1В.

Верификация продуктов алгоритма AIRS/AMSU/ATMS. Верификация продуктов уровня L2 также выполнялась с использованием наблюдений 2015 г. Набор тестовых данных составлялся таким образом, чтобы охватить максимально широкий диапазон вариаций характеристик атмосферы и подстилающей поверхности.

На рис. 3 показано пространственное распределение приземной температуры воздуха для 16 января 2015 г., установленное по данным алгоритма AIRS/AMSU и результатам совместной обработки наблюдений AIRS/AMSU/ATMS. Аналогичные результаты определены для наблюдений, выполненных в летнее время (рис. 4). Видно, что достигается хорошее согласие результатов AIRS/AMSU/ATMS с данными AIRS/AMSU.

На рис. 5 показаны результаты корреляционного анализа для основных стандартных продуктов комплекса AIRS/AMSU. Полученные оценки среднеквадратичных отклонений и коэффициентов корреляции позволяют сделать вывод о возможности применения разработанной технологии обработки данных гиперспектрометра AIRS, принимаемых наземными станциями после сентября 2016 г.

Заключение. Предложен подход, использующий наблюдения микроволнового радиометра ATMS (установлен на спутниках Suomi-NPP и NOAA-20) в цепочке обработки данных гиперспектрального комплекса AIRS/AMSU, который базируется на космической платформе Aqua, для восстановления всепогодного режима работы комплекса. В ходе выполнения исследования разработан вычислительный комплекс обработки данных AIRS/AMSU с использованием наблюдений СВЧ-радиометра ATMS. Результаты верификации созданного комплекса, полученные с использованием наблюдений AIRS/AMSU 2015 г., когда СВЧ-радиометр AMSU функционировал в штатном режиме, показали, что геофизические параметры атмосферы и подстилающей поверхности, получаемые при совместном использовании данных AIRS и ATMS, практически совпадают с оригинальными данными AIRS/AMSU.

Следует отметить, что в условиях быстро меняющихся свойств атмосферы, например при сильном ветре, использование наблюдений ATMS возможно, если разница во времени прохода двух спутников не превышает 10–15 мин.

Значимость представленных результатов заключается в получении впервые 20-летнего ряда уникальных гиперспектральных спутниковых данных для климатических исследований и анализа поведения различных газовых компонент атмосферы. Отметим также, что предложенный подход может быть использован для выполнения интеркалибровки данных приборов следующего поколения.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках реализации Программы поддержки научно-педагогических работников ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», проект «Содержание CO₂ в атмосфере Алтайского края: результаты спутникового мониторинга и моделирования», договор № 10/22-ВГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **IPCC Special Report** on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Eds. P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia et al. 2019. 874 p.

2. **Лагутин А. А., Никулин Ю. А., Лагутин Ал. А. и др.** Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 2. AIRS // Вычислительные технологии. 2007. **12**, № 5. С. 78–102.
3. **Мордвин Е. Ю., Лагутин А. А.** Метан в атмосфере Западной Сибири. Барнаул: Азбука, 2016. 148 с.
4. **Parkinson C. L.** Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. **41**, Iss. 2. P. 173–183.
5. **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. Remote Sens. 2003. **41**, Iss. 2. P. 253–264.
6. **Susskind J., Blaisdell J. M., 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. Remote Sens. 2011. **49**, Iss. 3. P. 883–907.
7. **Susskind J., Barnet C. D., Blaisdell J. M.** Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. **41**, Iss. 2. P. 390–409.
8. **Susskind J., Blaisdell J., Iredell L. et al.** AIRS-Team Retrieval For Core Products and Geophysical Parameters: Versions 6 and 7 Level 2. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2020. 77 p.
9. **Suomi National Polar-orbiting Partnership.** URL: <https://eosps.nasa.gov/missions/suomi-national-polar-orbiting-partnership> (дата обращения: 01.03.2022).
10. **Kim E., Lyu C.-H. J., Anderson K. et al.** S-NPP ATMS instrument prelaunch and on-orbit performance evaluation // Journ. Geophys. Res. Atmos. 2014. **119**, Iss. 9. P. 5653–5670.
11. **Joint Polar Satellite System.** URL: <https://www.jpss.noaa.gov/> (дата обращения: 01.03.2022).
12. **Goldberg M. D., Kilcoyne H., Cikanek H.** Joint Polar Satellite System: The United States next generation civilian polar-orbiting environmental satellite system // Journ. Geophys. Res. 2013. **118**, Iss. 24. P. 13463–13475.
13. **Hoese D., Raspaud M., Lahtinen P. et al.** Pytroll/pyresample: Version 1.16.0. Zenodo. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3888692>.
14. **Huang H.-L., Gumley L. E., Strabala K. et al.** International MODIS and AIRS processing package (IMAPP) — A direct broadcast software package for the NASA Earth Observing System // BAMS. 2004. **85**, Iss. 2. P. 159–161.
15. **NASA Goddard Space Flight Center's (GSFC) Direct Readout Laboratory (DRL).** Real-time Software Telemetry Processing System (RT-STPS) User's Guide. Greenbelt, Maryland, 2017, 31 p.

Поступила в редакцию 01.03.2022

После доработки 10.03.2022

Принята к публикации 23.03.2022