

Технологии спутниковой СВЧ-радиометрии в России

Барсуков И.А., Черный И. В., Чернявский Г. М.

АО «Российские космические системы», icherny@cpi.space.ru

Особое место в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) занимает спутниковая СВЧ-радиометрия. Применение пассивных методов зондирования в СВЧ-диапазоне кардинально расширяет возможности наблюдения Земли из космоса.

Использование СВЧ диапазона, наряду с оптическим, повышает информативность ДЗЗ и, в отличие от последнего, позволяет проводить круглосуточные измерения во всепогодных условиях. Бортвые СВЧ-радиометры отличаются от радиолокаторов меньшими значениями массогабаритных характеристик и потребляемой энергии, что способствует повышению эффективности ДЗЗ из космоса. Спектральные особенности СВЧ-зондирования весьма эффективны при исследованиях и мониторинге системы океан–атмосфера.

Первые в мире микроволновые измерения Земли были осуществлены 50 лет назад с отечественного спутника "Космос-243", запущенного 23 сентября 1968 года. Измерения велись на частотах 3.4, 9.6, 22.2 и 37.0 ГГц в трассовом режиме [1].

Однако практическое применение микроволновых радиометров началось в 1979 году со спутника NOAA (США), на котором был установлен зондировщик Microwave Sounding Unit (MSU) для измерения профиля температуры атмосферы на частотах 50-58 ГГц [2]. В 1987 г. на орбиту был выведен космический аппарат (КА) Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) F08 министерства обороны США. На спутнике был установлен сканер Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), принимавший излучение Земли на частотах 19.3; 22.2; 37.0 и 85.5 ГГц для определения параметров поверхности и интегральных параметров атмосферы [3].

Приборный комплекс, установленный на КА DMSP F11, запущенном в 1991 году, наряду со сканером SSM/I, включал зондировщики Special Sensor Microwave/Temperature Sounder SSM/T-1 на частотах в диапазоне 50.5-59.4 ГГц и SSM/T-2 на 91.5, 150, 183.31±1, ±3, ±7 ГГц для определения профилей температуры и влажности атмосферы, соответственно [4]. С 1998 года на спутниках серии NOAA также устанавливаются температурный AMSU-A и влажностный AMSU-B зондировщики [5]. Данные приборы обеспечивают в определенном объеме стандартной гидрометеорологической информацией страны - члены ВМО.

Первый отечественный сканер "Икар-Дельта", предназначенный для экспериментов по определению интегральных метеопараметров атмосферы, был выведен на орбиту в 1996 году в составе модуля "Мир-Природа" [6].

В России спутниковая СВЧ-радиометрия является одной из немногих динамично развивающихся технологий ДЗЗ. Интенсивное развитие она получила благодаря исследованиям и разработкам ФГУП «Центр космических наблюдений» (впоследствии Научно-технологический центр "Космонит", а ныне отделение 60 АО "Российские космические системы").

За указанный период коллективом были созданы приборы для КА "Метеор-3М" (MTB3A, запущен в 2001 г.), КА "Сич-1М" (MTB3A-OK, запущен в 2004 г.), КА "Метеор-М" (MTB3A-ГЯ, КА №1 запущен в 2009 г., КА №2 запущен в 2014 г., КА №2-1 аварийный запуск в 2017 г.), МКА "Канопус-СТ" (МИРАМ-К, аварийный запуск в 2015 г.) [7-11]. Идет разработка перспективного СВЧ-радиометра MTB3A-ГЯ-МП для КА "Метеор-МП", запуск которого планируется после 2024 г. [12]. Фотографии указанных приборов приведены на рис.1-5.

Летные испытания многофункционального СВЧ-радиометра MTB3A начались в 2001 г. в составе КА "Метеор-3М". Рабочий диапазон частот MTB3A составлял 18-183 ГГц и содержал 21 канал [7]. Это было началом прорыва монополии США в спутниковой гидрометеорологии. К моменту запуска на орбиту конструкция прибора MTB3A не имела аналогов. В MTB3A конструктивно объединены функций сканера типа SSM/I, и зондировщиков типа SSM/T-1, -2 и AMSU-A, -B.

Радиометр стал первым в мире спутниковым сканером/зондировщиком для определения стандартных метеорологических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в квазиреальном масштабе времени. По данным MTB3A могут быть определены паросодержание атмосферы, водозапас облаков, скорость приводного ветра, восстановлены вертикальные профили температуры и влажности атмосферы и др. [10,13]. Американский аналог – сканер/зондировщик SSMIS - был выведен на орбиту два года спустя в 2003 г. на КА DMSP F16 [14].

В настоящее время модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы MTB3A-ГЯ (ГЯ - в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (2018-2002), конструкторе бортовых космических приборов) – один из основных видов целевой аппаратуры на метеорологических спутниках серии "Метеор-М".

Технические характеристики MTB3A-ГЯ

Диапазон.....	10,6; 18,7; 23,8; 31,5; 36,5; 42; 48; 52–57; 91; 183,31 ГГц
Апертура антенны.....	0,65 м
Пространственное разрешение	16–198 км
Полоса обзора	1500 км
Сканирование	коническое, круговое
Режим работы	непрерывный
Период сканирования	2,5 с
Нестабильность вращения.....	10 ⁻⁴
Поток данных	35 Кбит/с
Объем ЗУ	1 Гбайт
Масса, не более	94 кг
Потребление, не более	80 Вт

Информационные характеристики радиометрических каналов MTB3A-ГЯ, приведённые к орбите КА «Метеор-М» (высота 830 км)							
Центральная частота, ГГц	Поляризация	Кол-во полос	Ширина полосы, МГц	Пространственное разрешение (антенное пятно), км	Приведённый пиксель изображения, км	Чувствительность не хуже, К/пиксель	Высота максимума весовой функции, км
10,6	В, Г	1	100	89×198	32×32	0,5	—
18,7	В, Г	1	200	52×116	32×32	0,4	—
23,8	В, Г	1	400	42×94	32×32	0,3	—
31,5	В, Г	1	1000	35×76	32×32	0,3	—
36,5	В, Г	1	1000	30×67	32×32	0,3	—
42,0	В, Г	1	1000	26×60	32×32	0,4	—
48,0	В, Г	1	1000	24×43	32×32	0,4	—
91,65	В, Г	2	2500	14×30	16×16	0,6	—
52,80	В	1	400	21×48	48×48	0,4	2
53,30	В	1	400	21×48	48×48	0,4	4
53,80	В	1	400	21×48	48×48	0,4	6
54,64	В	1	400	21×48	48×48	0,4	10
55,63	В	1	400	21×48	48×48	0,4	14
$F_0 \pm 0,1$	Г	4	50	21×48	48×48	0,4	20
$F_0 \pm 0,05$	Г	4	20	21×48	48×48	0,7	25
$F_0 \pm 0,025$	Г	4	10	21×48	48×48	0,9	29
$F_0 \pm 0,01$	Г	4	5	21×48	48×48	1,3	35
$F_0 \pm 0,005$	Г	4	3	21×48	48×48	1,7	42
183,31±7,0	В	2	1500	9×21	32×32	0,5	1,5
183,31±3,0	В	2	1000	9×21	32×32	0,6	2,9
183,31±1,0	В	2	500	9×21	32×32	0,8	4,7
$F_0 = 57,2903 \pm 0,3222$ ГГц,							

По информационным характеристикам и области применения MTB3A-ГЯ соответствует зарубежным аналогам – зондировщикам AMSU-A и AMSU-B (спутники NOAA, США и MetOp, ESA), ATMS (спутник SNPP, США) [15], сканерам AMSR-E (спутник Aqua, США), AMSR2 (спутник GCOM-W1, Япония) [16] и сканеру/зондировщику SSMIS (спутники DMSP F16–F19, США) [14].

Результаты функционирования прибора MTB3A-ГЯ на КА "Метеор-М" №1 и №2 представлены в публикациях [17-19]. Функционирование прибора в космосе на протяжении многих лет позволило обосновать методику и выполнить внешнюю калибровку каналов сканера и зондировщика, проанализировать временные ряды яркостных температур на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризациях над тестовыми участками и глобальные поля яркостной температуры за отдельные сроки. Собранный материал используется при разработке методик обработки и анализа микроволновых данных с последующих спутников серии "Метеор-М". Это относится к внешней калибровке MTB3A-ГЯ и к оценке стабильности функционирования прибора в космосе.

На основании полученных многолетних данных проведено физическое обоснования выбора участков для внешней калибровки, моделирования яркостных температур над океаном, тропическими лесами Амазонки, ледяным щитом Гренландии и Антарктиды в различные сезоны.

Сегодня данные микроволнового радиометра MTB3A-ГЯ используются в численных моделях прогноза погоды Росгидрометом и Европейскими метеоцентрами в рамках Всемирной метеорологической организации (ВМО).

Запуски спутников серии "Метеор-М" будут продолжены. Сведения о последующих запусках размещены на сайте Всемирной метеорологической организации в разделе Observing Systems Capability Analysis and Review Tool <http://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/284>. Очередной спутник «Метеор-М» №2-2 планируется вывести в космос в марте 2019 г.



Рис. 1. Микроволновый сканер-зондировщик MTB3A КА «Метеор-3М». Запуск – 2001.



Рис. 2. Микроволновый сканер-зондировщик MTB3A-OK КА «Сич-1М». Запуск – 2004.



Рис. 3. Микроволновый сканер-зондировщик MTB3A-ГЯ КА «Метеор-М». Запуск – 2009, 2014, 2017, 2019.

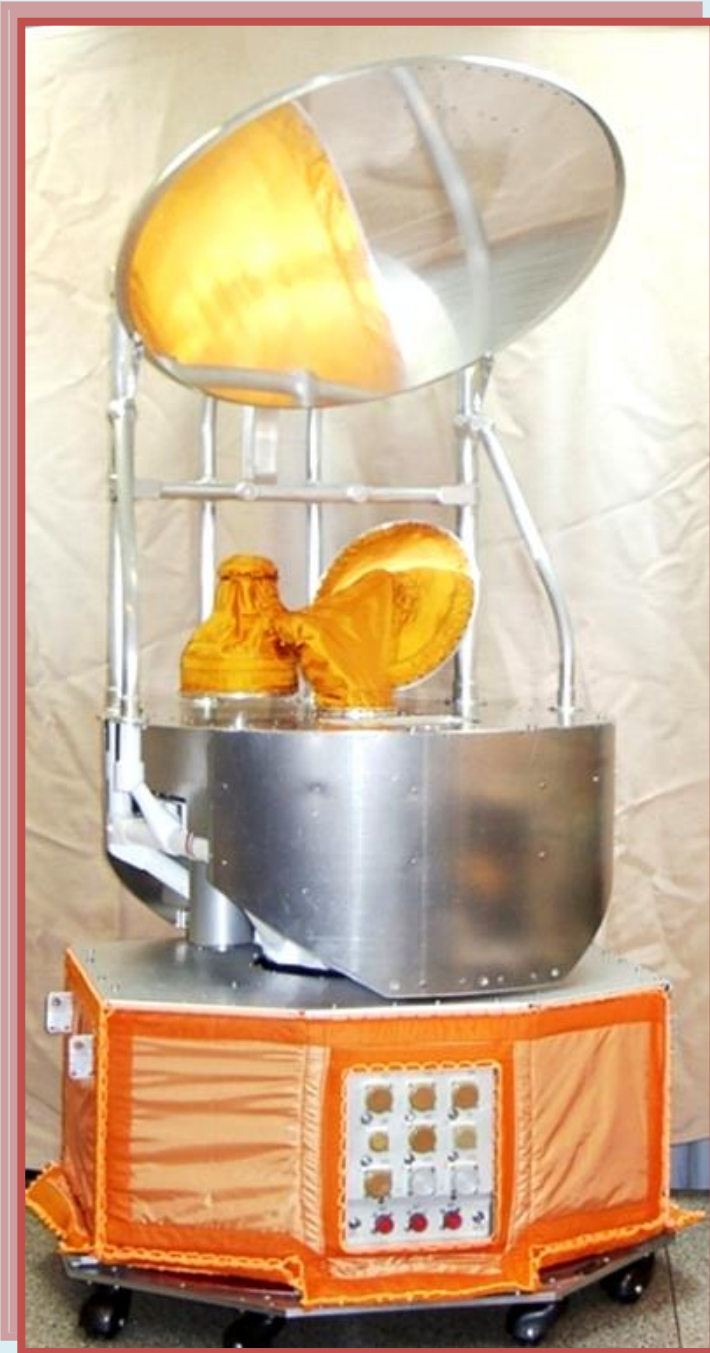


Рис. 4. Микроволновый сканер-зондировщик МИРАМ-К МКА «Канопус-СТ». Запуск – 2015.



Рис. 5. Микроволновый сканер/зондировщик/поляриметр MTB3A-ГЯ-МП КА «Метеор-МП». Апертура антенны 1 м. Запуск – после 2024.

Схема сканирования MTB3A-ГЯ

Схема кругового конического сканирования MTB3A-ГЯ построена таким образом, что визирование производится в направлении кормы КА (рис. 6). Направление скана — слева направо с рабочим сектором 105° (от –90° до 15° относительно трассы спутника), что обеспечивает полосу обзора шириной 1500 км. Угол визирования составляет 53,3°, а угол падения — 65°. Несимметричность сектора сканирования связана с максимальной реализацией поля незатенения элементами конструкции КА. Для данной высоты орбиты существует потенциальная возможность обеспечить ширину полосы обзора MTB3A-ГЯ не менее 2200 км, что будет реализовано в новой модификации спутника «Метеор-МП» (Cherry et al., 2017).

За период сканирования 2,5 с перемещение нормали спутника составит 16 км, что сравнимо с размером элемента пространственного разрешения радиометра в каналах 91,6 и 183,31 ГГц. Поэтому в качестве пространственного элемента квантования сигнала (для всех радиометрических каналов) выбран масштаб 16×16 км. На этапе предварительной обработки данных в пунктах приёма производится процедура пространственного усреднения (сглаживания) изображений в отдельных каналах до размеров пикселя 32×32 и 48×48 км (см. таблицу), что обеспечивает повышение чувствительности в два и три раза, соответственно.

На рис. 7 и рис. 8 приведены изображения Земли полученные MTB3A-ГЯ КА «Метеор-М» №2. С учетом нисходящих и восходящих витков обеспечивается полное суточное покрытие Земли, за исключение ромбовидных зон, которые покрываются за 48 ч.

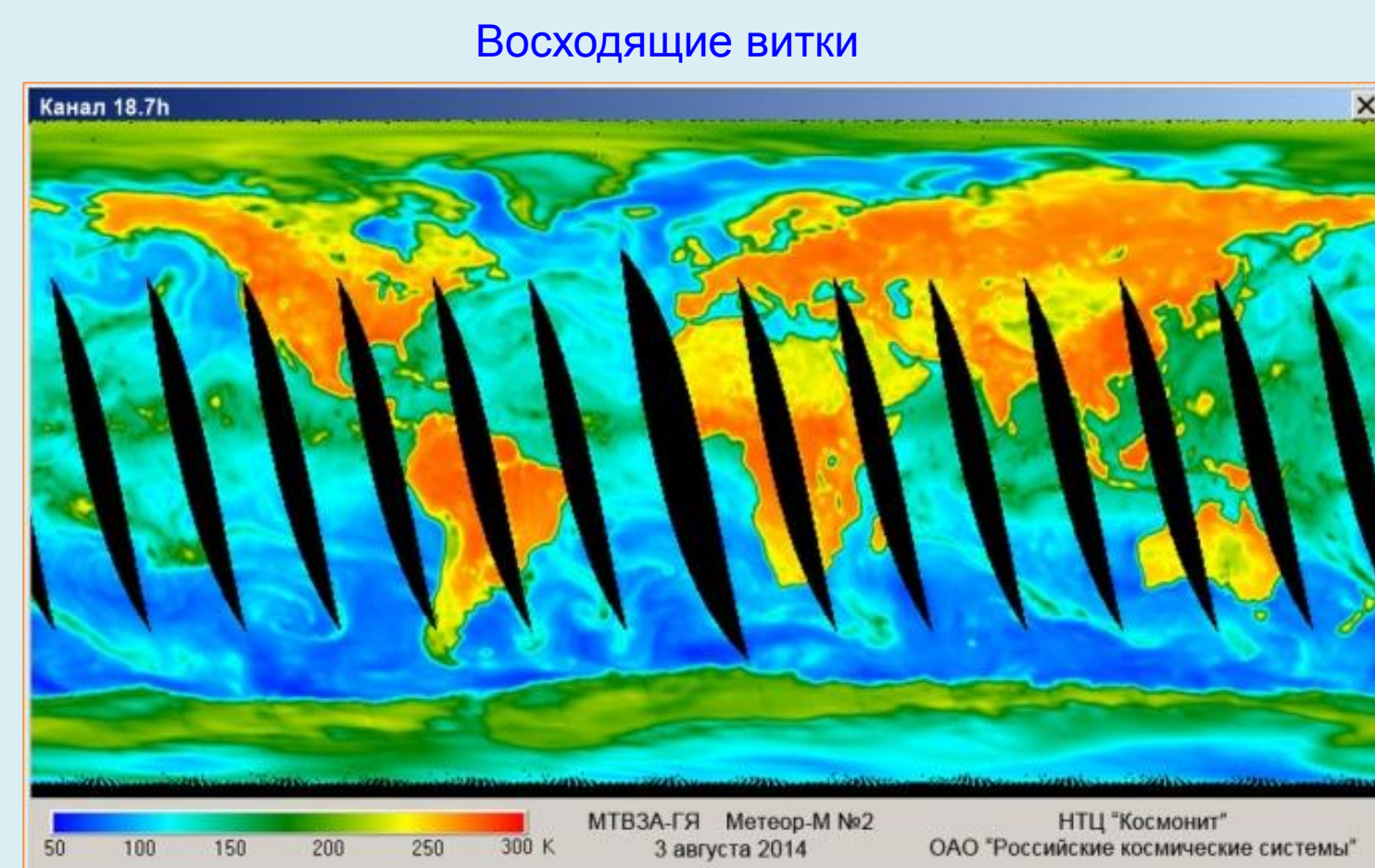
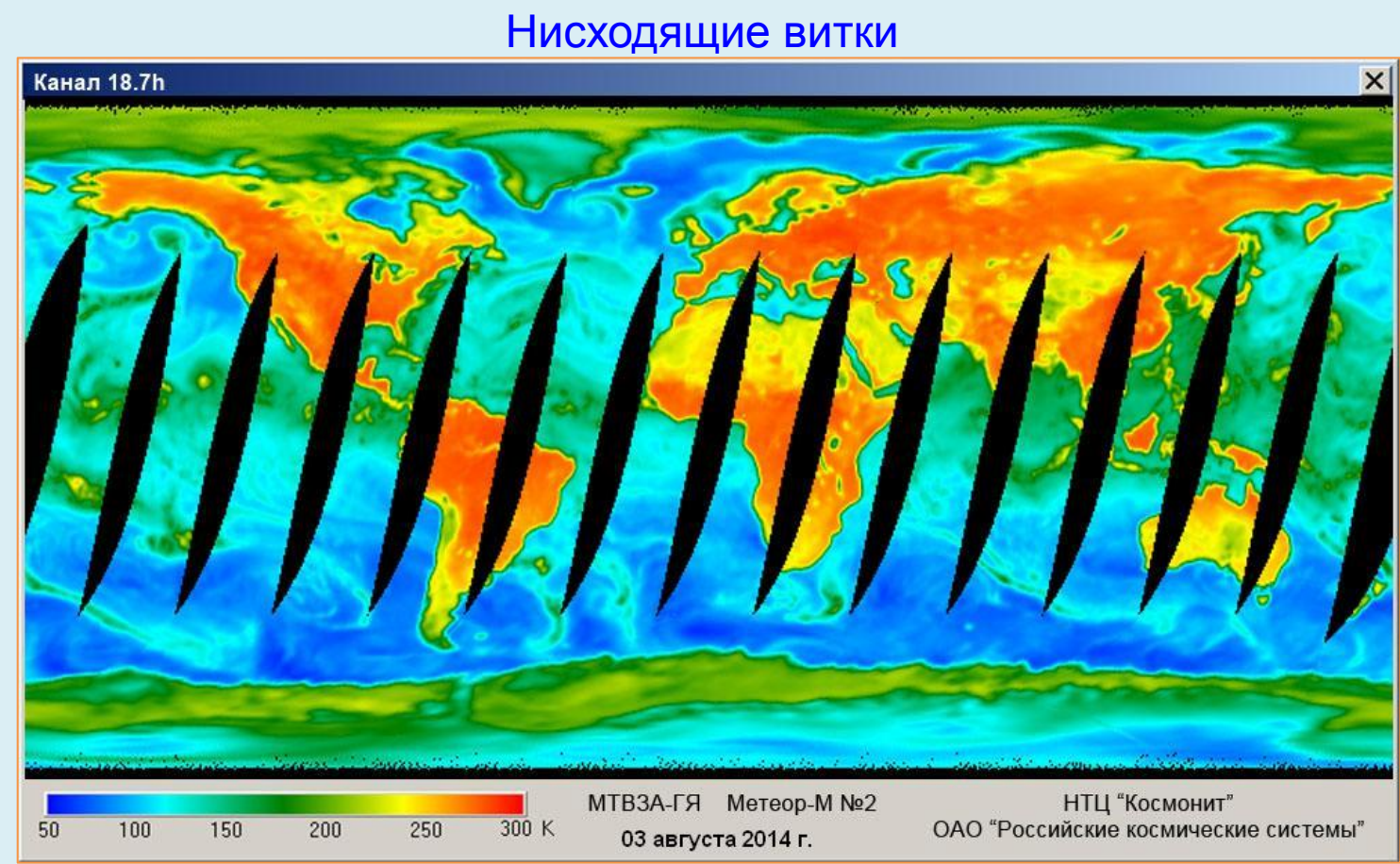


Рис. 7. Суточная съемка Земли на частоте 18,7 ГГц .

Литература

- Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Еропов С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
- Spencer R. W., Christy J. R. Precision lower stratospheric temperature monitoring with the MSU: Technique, validation, and results 1979–91 // J. Climate. 1993. No. 6. P. 1194–1204.
- Hollinger J. P., Pierce J. L. Poe G. A. SSM/I instrument and evaluation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1990. V. 28. No. 5. P. 781–790.
- Falcone V. J., Griffin M. K., Isaacs R. G., Pickle J. D., Morrissey J. F., Bussey A., Kakar R., Wang J., Racette P. SSM/T-2 Calibration data analyses // Proc. IEEE Topical Symp. Combined Optical, Microwave, Earth and Atmosphere Sensing. 1993. P. 165–168.
- Rosenkranz P. W. Retrieval of temperature and moisture profiles from AMSU-A and AMSU-B measurements // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. No. 11. P. 2429–2435.
- Jackson P. T. J., Hsu A. Y., Armand N., Kutuza B., Shutko A., Tishchenko Y., Petrenko B., Evtushenko A., Smirnov M., Savorskiy V., Sorokin I., Nikolaev A., Sidorenko A. Pirroda passive microwave observations in the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'98). 1998. P. 1568–1570.
- Черный И. В., Чернявский Г. М., Успенский А. Б., Пегасов В. М. СВЧ-радиометр MTB3A спутника «Метеор-3М» № 1: предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 1–15.
- Наконечный В. П., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Черный И. В., Чернявский Г. М., Данилов С. Г., Казанцев О. Ю. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик MTB3A-OK // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 197–203.
- Чернявский Г. М. Отечественные технологии спутниковой СВЧ-радиометрии. Аэрокосмический курьер. 2007. № 6. С. 22–24.
- Болдырев В. В., Ильгасов П. А., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Черный И. В., Чернявский Г. М., Яковлев В. В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик MTB3A-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 243–248.
- Барсуков И. А., Никитин О. В., Стрельцов А. М., Черный И. В., Чернявский Г. М. Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра MTB3A-ГЯ КА «Метеор-М» №1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 257–264.
- Cherry I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for New Russian Meteorological Satellite // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2017. P. 1220–1223.
- Cherry I. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Uspensky A. B., Streltsov A. M. On-orbit calibration of the "Meteor-M" Microwave Imager/Sounder // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2010. P. 558–561.
- Kunkee D. B., Hong Y., Thompson D. A., Werner M. F., Poe G. A. Analysis of the Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) fields-of-view on DMSP F-16 // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 4. P. 934–945.
- Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W. J., Wang X., Lin L., Anderson K. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) // J. Geophys. Research. Atmosphere. 2012. T. 9. № 4. С. 121–128.
- Imaoka K., Kachi M., Rasahara M., Ito N., Nakagawa K., Oki T. Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2 // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Kyoto, Japan, 2010. V. 38. Pt. 8.
- Митник Л. М., Митник М. Л., Гурвич И. А., Выкочко А. В., Кузлякина Ю. А., Черный И. В., Чернявский Г. М. Исследование эволюции тропических циклонов в северо-западной части Тихого океана по данным СВЧ-радиометров MTB3A-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 1 и AMSR-E со спутника Aqua // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 121–128.
- Митник Л. М., Митник М. Л., Чернявский Г. М., Черный И. В., Выкочко А. В., Пичугин М. К. Приводный ветер и морской лёд в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников «Метеор-М» № 1 и GCOM-W1 в январе – марте 2013 г. // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 1–11.
- Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Черный И.В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника Метеор-М №2. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Сборник научных статей. Том 15, №3, 2018, с.152-174.