

Внешняя калибровка каналов радиометра МТВЗА-ГЯ на метеорологическом спутнике "Метеор-М № 2

Л.М. Митник¹, В.П. Кулешов¹, М.Л. Митник¹, Д. Л.Спиричев², И. В.Черный²,
В. В. Яковлев²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН (ТОИ ДВО РАН), 690041 Владивосток, ул. Балтийская 43. E-mail: lm_mitnik@mail.ru

²Научно-технологический центр "Космонит" ОАО "Российские космические системы" 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Профсоюзная, д. 84/32. E-mail: icherny@cpi.space.ru

Рассмотрены основные характеристики микроволнового сканера-зондировщика МТВЗА-ГЯ на спутнике "Метеор-М №2". Обсуждается выбор тестовых площадок для внешней калибровки радиометра и оценки стабильности его функционирования в космосе. Приведены временные ряды яркостных температур радиометров МТВЗА-ГЯ и AMSR2 над тестовыми площадками в лесах Амазонки и в Восточной Антарктиде.

The main characteristics of a MTVZA-GY microwave sounder- scanner on the "Meteor -M №2" satellite are considered. The choice of the test sites for radiometer vicarious calibration and evaluation of the stability of its functioning in space are discussed. The time series of the brightness temperatures of MTVZA – GY and AMSR2 radiometers over the test sites in the Amazon forest and in the East Antarctica are given.

Метеорологический спутник "Метеор-М № 2" с 29-канальным сканирующим микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ на борту был запущен 8 июля 2014 г. К достоинствам МТВЗА-ГЯ следует отнести комбинацию в одном приборе каналов сканера и зондировщика, наличие новых частот 42.0 и 48.0 ГГц и зондирование на вертикальной (в) и горизонтальной (г) поляризациях под углом $\theta = 65^\circ$ к местной нормали. Частоты зондирования ν выбраны таким образом, чтобы из результатов измерений получать количественные сведения о подстилающей поверхности, тропосфере и стратосфере. Антенна радиометра диаметром 65 см сканирует Землю в полосе шириной 1500 км. Для оценки параметров поверхности и тропосферы используются данные сканера на частотах 10.7, 18.7, 23.8, 31.5, 36.5, 42.0, 48.0 и 91.65, а для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы – данные каналов зондировщика в области низкочастотного ската полосы поглощения молекулярного кислорода 52-58 ГГц и в области сильной линии водяного пара, центрированной на частоте 183.31 ГГц. По данным МТВЗА-ГЯ могут быть найдены паросодержание атмосферы V , водозапас облаков Q , скорость приводного ветра W , температура подстилающей поверхности, восстановлены вертикальные профили температуры $T(h)$ и влажности $a(h)$ атмосферы и др. [1].

Радиометр МТВЗА-ГЯ входил также в состав аппаратного комплекса спутника "Метеор-М № 1". Глобальные измерения, а после выхода из строя бортовой памяти - измерения только над территорией, охватываемой приемными станциями России, выполнялись с 2009 по 2014 г., и только на каналах сканера. Некоторые результаты обработки данных со спутника "Метеор-М № 1" отражены в [2-5].

Глобальные измерения уходящего излучения Земли о спутника "Метеор-М № 2" начаты 30 июля 2014 г. и с тех пор продолжают практически непрерывно (март 2016 г.). Калибровки выходных сигналов МТВЗА-ГЯ выполняется по измерениям над протяженными (квази) однородными естественными излучателями: "холодными" и "горячими" участками путем сопоставления отсчетов $v^{B,G}$ с расчетными значениями яркостных температур $T_{я}^{B,G}(v)$ на частотах ν на в- и г-поляризациях каналов

радиометра. Яркостные температуры рассчитываются путем численного интегрирования уравнения переноса излучения (УПИ) в системе подстилающая поверхность - атмосфера (СППА) для выбранных "холодных" и "горячих" участков. Минимальные значения $T_{я}$ наблюдаются над океаном при слабом ветре, отсутствии облаков и малом паросодержании атмосферы, а максимальные - над широколиственными тропическими лесами в бассейнах рек Амазонка и Конго [6 и цитируемая в статье литература]. Входными данными при интегрировании УПА служат экспериментальные и/или модельные значения геофизических параметров: температуры и коэффициентов излучения выбранных участков подстилающей поверхности (океана, леса, пустыни) и атмосферы (вертикальные профили давления, температуры и влажности атмосферы, водности облаков) и др.

Для разработки методики выбора калибровочных участков были рассчитаны $T_{я}^{B,\Gamma}(v)$ при вариациях вертикальных профилей метеорологических характеристик в безоблачной атмосфере над океаном и тропическим лесом с использованием алгебраической формы УПР [6-10]:

$$T_{я}^{B,\Gamma}(v,\theta) = \chi^{B,\Gamma}(v,\theta) \cdot T_o \cdot e^{-\tau(v)\sec\theta} + T_{я}^{\uparrow}(v,\theta) + T_{я}^{\downarrow}(v,\theta) [1 - \chi^{B,\Gamma}(v,\theta)] e^{-\tau(v)\sec\theta} + T_k \cdot [1 - \chi^{B,\Gamma}(v,\theta)] \cdot e^{-2\tau(v)\sec\theta}, \quad (1)$$

где $T_{я}^{B,\Gamma}(v,\theta)$ – яркостная температура СППА на v- или г-поляризации на частоте v под углом θ ,

$\chi^{B,\Gamma}(v,\theta)$ - коэффициент излучения подстилающей поверхности,

$T_o = t_o + 273,16$,

$\tau(v)$ - полное (интегральное) поглощение в атмосфере,

$T_{я}^{\uparrow}(v,\theta)$ и $T_{я}^{\downarrow}(v,\theta)$ – яркостные температуры восходящего и нисходящего излучения атмосферы, соответственно,

T_k - яркостная температура космического излучения.

При расчетах $T_{я}$ над океаном варьировались температура поверхности океана (ТПО), скорость приводного ветра W и паросодержание атмосферы V , а над лесами Амазонки - температура воздуха у поверхности (на уровне крон) и паросодержание атмосферы V , что позволило определить диапазоны вариаций $T_{я}^{B,\Gamma}(v)$ при различном сочетании параметров. Коэффициенты излучения океана находились по формулам Френеля с использованием современных аппроксимаций для диэлектрической проницаемости воды в зависимости от температуры и солености и эмпирических зависимостей, описывающих приращение коэффициентов излучения от скорости ветра [11]. При расчетах $T_{я}$ над лесом коэффициенты излучения на различных частотах, поляризациях и углах визирования были взяты из работ [12, 13].

Участкам океана в умеренных и высоких широтах с ТПО < 10-12°C и со слабым ($W < 2-3$ м/с) ветром соответствуют минимальные значения отсчетов на $v = 10.7$ ГГц на г-поляризации. Проверка отсутствия облачности выполнялась по данным зондирования на $v = 42.0$ и 48.0 ГГц на г-поляризации. Паросодержание атмосферы V над маловетренными безоблачными участками океана определялось по микроволновым измерениям со спутников GCOM-W1, DMSP, GPM и других, что позволяло оконтурить зоны с минимальными значениями V . Таким образом, анализ полей $n^{\Gamma}(10)$, $n^{\Gamma}(42)$ и $n^{\Gamma}(48)$ по данным МТВЗА-ГЯ и полей ТПО и V по данным, доступным из интернета, позволяет выбрать участки океана, пригодные для внешней холодной калибровки. Значениям $n_{хол}^{B,\Gamma}(v)$ для этих участков приписывались расчетные

значения яркостных температур $T_{я}^{B,\Gamma}_{хол}(\nu)$, найденных для комбинации параметров ТПО, W и V .

Для внешней горячей калибровки выбираются большие участки лесных массивов с максимальными значениями $n^{B,\Gamma}_{гор}(\nu)$. Значениям $n^{B,\Gamma}(\nu)$ для этих участков приписывались расчетные значения яркостных температур $T_{я}^{B,\Gamma}_{гор}(\nu)$, найденных для комбинации параметров ТПО и V . Пониженные значения в полях отсчетов могли быть обусловлены попаданием в поле зрения радиометра озер, рек, болот, влажной почвы, неэкранированных густой растительностью, а на частотах $\nu > 36$ ГГц - мощной облачностью и осадками. Такие области для калибровки не использовались.

По отсчетам $n_{хол}$ и $n_{гор}$, усредненным по круговым площадкам диаметром 100 км, и соответствующим им парам яркостных температур $T_{яхол}$ и $T_{ягор}$ для каждого канала определялась крутизна шкалы яркостных температур $\alpha = \Delta T_{я}/\Delta n$ и опорный уровень выходных сигналов $T_{я0} = \alpha n_{холмин}$. В предположении, что зависимость отсчетов от входных сигналов линейная, по полям отсчетов строились поля яркостных температур. Подобная процедура повторялась для измерений МТВЗА-ГЯ, выполненных на восходящих и нисходящих витках над различными "холодными" областями Тихого и Атлантического океана и над лесными массивами Амазонки.

Стабильность работы радиометра на орбите определялась путем анализа временных рядов среднесуточных значений отсчетов, усредненных по круговым тестовым площадкам диаметром 100 км в восточной Антарктиде на куполе DomeСв районестанции Concordia (75.10° ю.ш., 123.33° в.д., Н = 3233 м) [12] и в Гренландии в районе GEO Summit Station (72.34° с.ш., 38.29° з.д., Н = 3212 м). К достоинствам выбранных тестовых площадок следует отнести сочетание следующих факторов: круглогодичная отрицательная температура воздуха, отсутствие воды в жидкой фазе, низкие значения паросодержания атмосферы (зимой < 1 кг/м² и летом до 5-7 кг/м²), наличие данных о температуре $T(0)$, давлении $P(0)$ и влажности $a(0)$ атмосферы у поверхности по измерениям автоматической метеорологической станции и вертикальных профилей $T(h)$, $P(h)$ и $a(h)$ дважды в сутки по измерениям радиозондов. Существенное значение для оценки изменчивости $n^{B,\Gamma}(\nu)$ имеет высокое по сравнению с тропическими широтами временное разрешение: тестовые площадки в полярных областях 4-5 раз в сутки находятся в пределах полосы обзора МТВЗА-ГЯ. Измерения над этими площадками могут быть использованы не только для оценки стабильности, но и для калибровки всех каналов МТВЗА-ГЯ.

Важным средством контроля работы МТВЗА-ГЯ в космосе и отработки методики кросс-калибровки на различных частотах и поляризациях служит сравнение временных рядов $T_{я}$, полученных различными радиометрами над одними и теми же тестовыми участками. Яркостные температуры сканерных каналов МТВЗА-ГЯ сравнивались с $T_{я}$, измеренными радиометром AMSR2 на японском спутнике GCOM-W1 [14, 15].

На рисунке 1 приведены временные ряды среднесуточных яркостных температур за период 1 октября 2014 г. - 31 декабря 2015 г. на частотах 18.7 и 36.5 ГГц на в-и г-поляризациях по измерениям радиометрами МТВЗА-ГЯ и AMSR2 над площадкой в области DomeС [12, 16]. Из анализа временных рядов следует высокая стабильность работы двух радиометров и хорошее соответствие вариаций $T_{я}^{B,\Gamma}$ двух радиометров на синоптическом и сезонном масштабах с учетом различия в углах визирования (65° для МТВЗА-ГЯ и 55° для AMSR2), согласующихся с изменением температуры воздуха у поверхности плато. Амплитуда сезонных вариаций $T_{я}$ растет с увеличением частоты, что, в свою очередь, обусловлено уменьшением толщины слоя снега, в котором формируется излучение, а следовательно, и увеличением амплитуды проникающей в снег тепловой волны [12, 16, 17].

Временные ряды $T_{я}$ на частотах 31.5 и 48.0 ГГц по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих и нисходящих витках над круговой площадкой с диаметром 100 км с центром на 4.27° ю.ш., 56.77° з.д. в широколиственных лесах Амазонки приведены на рис. 2. Изменчивость $T_{я}$ вызвана сезонным ходом температуры на уровне крон, появлением облачности в поле зрения радиометра и, возможно, уменьшением усиления антенны на краю полосы обзора.

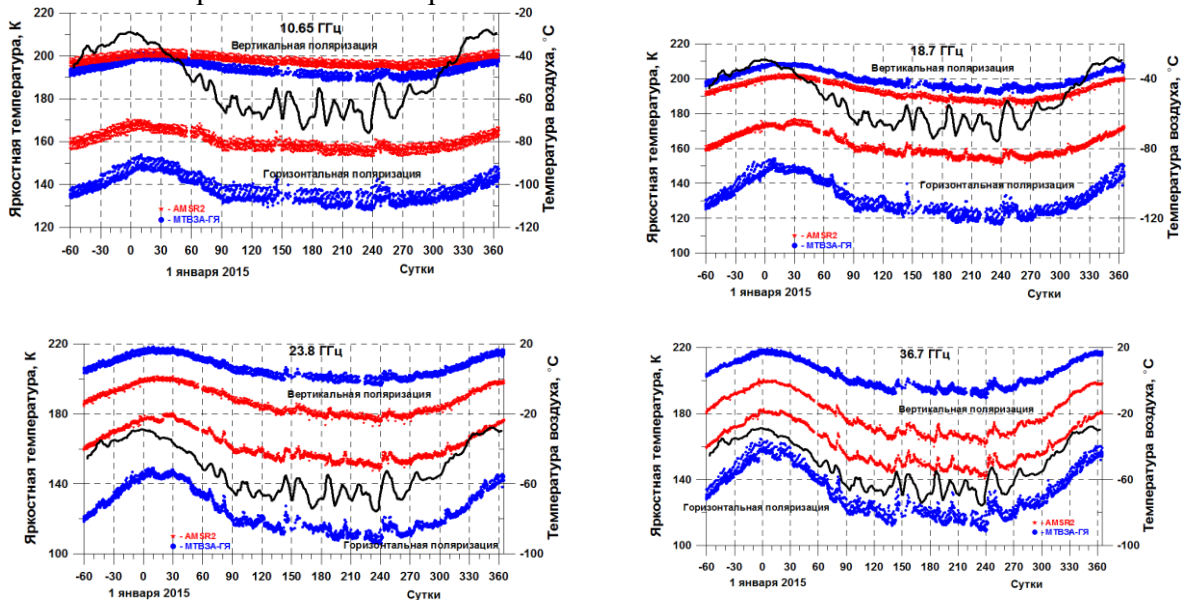


Рис. 1. Яркостные температуры на частотах 10.7, 18.7, 23.8 и 36.5 ГГц по измерениям радиометров МТВЗА-ГЯ (синие точки) и AMSR2 (красные точки) с 1 октября 2014 г. по 31 декабря 2015 г. над тестовой областью DomeC. Черная кривая – температура воздуха у поверхности при 5-суточном скользящем усреднении

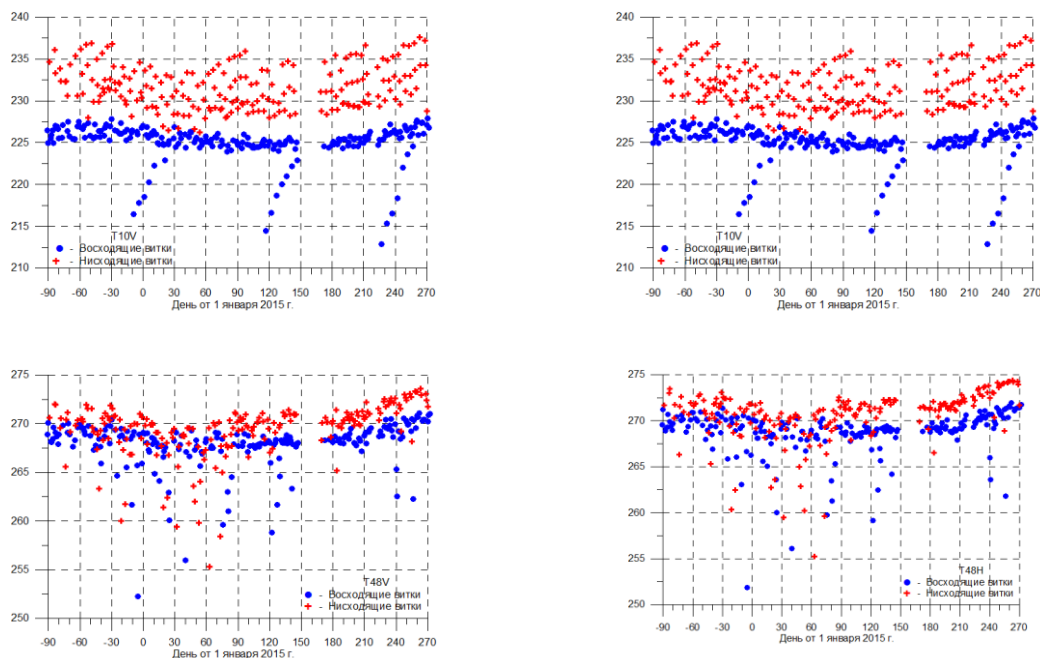


Рис.2. Яркостные температуры над тестовой областью в лесах Амазонки на частотах 31.5 и 48.0 ГГц на вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) поляризациях по измерениям МТВЗА-ГЯ на восходящих (синие точки) и нисходящих (красные крестики) витках с 1 октября 2014 г. по 30 сентября 2015 г.

Изменчивость яркостных температур на частотах в области поглощения кислорода обусловлена вариациями температуры воздуха в диапазоне высот, который определяется частотой зондирования. На рис. 3. показаны временные ряды T_y по измерениям на частотах 55.63 ГГц и $57.290344 \pm 0.3222 \pm 0.025$ ГГц. Поглощение в атмосфере на луче зрения на этих частотах велико, и излучение подстилающей поверхности не влияет на T_y .

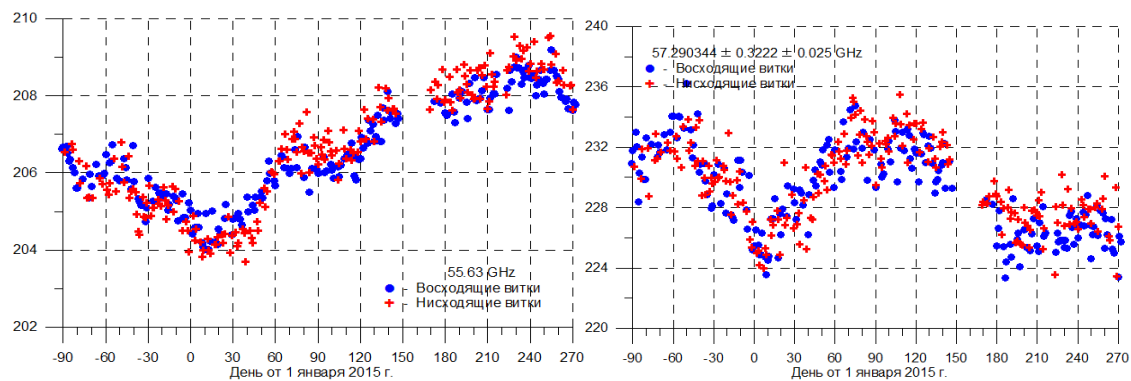


Рис.3. Яркостные температуры на частотах 55.63 и $57.290344 \pm 0.3222 \pm 0.025$ ГГц на восходящих (синие точки) и нисходящих (красные крестики) витках с 1 октября 2014 г. по 30 сентября 2015 г., характеризующие вариации температуры стратосферы над лесами Амазонки

Совместный анализ длительных измерений радиометров МТВЗА-ГЯ и AMSR2 и сопутствующей информации подтверждает правильность методики и предварительные результаты внешней калибровки каналов сканера МТВЗА-ГЯ [18] и демонстрирует стабильное функционирование радиометра в космосе. Из анализированных МТВЗА-ГЯ, полученных над станциями аэрологического зондирования в различных климатических зонах, и яркостных температур, рассчитанных по формуле (1) с использованием вертикальных профилей температуры, давления и влажности воздуха по данным радиозондирования до высот ≥ 33 км, следует возможность проведения внешней калибровки и для каналов зондировщика.

Литература

1. Болдырев В.В., Горобец Н.Н., Ильгасов П.А., Никитин О.В., Панцов В.Ю., Прохоров Ю.Н., Стрельников Н.И., Стрельцов А.М., Черный И.В., Чернявский Г.М., Яковлев В.В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 243-248.
2. Cherny 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. IGARSS 2010. Hawaii, 26-30 July. P. 558-561.
3. 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 МТВЗА-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.
4. Митник Л.М., Митник М.Л., Гурвич И.А., Выкочко А.В., Кузлякина Ю.А., Черный И.В., Чернявский Г.М. Мультисенсорное спутниковое зондирование зимних циклонов со штормовыми и ураганскими ветрами в северной части Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 161-174.
5. 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.
6. Митник Л.М., Митник М.Л. Калибровка и валидация - необходимые составляющие микроволновых радиометрических измерений со спутников серии Метеор-М № 2 // Современные проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2016. № 1. С. 95-104.
7. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
8. Митник М.Л., Митник Л.М. Восстановление паросодержания атмосферы и водозапаса облаков над океаном по данным микроволнового зондирования со спутников DMSP, TRMM, AQUA и ADEOS-II // Исследование Земли из космоса, 2006. №. 4. С. 34-41.
9. Mitnik L.M., Mitnik M.L. Retrieval of atmospheric and ocean surface parameters from ADEOS-II AMSR data: comparison of errors of global and regional algorithms // Radio Science. 2003. Vol. 38, № 4, 8065, doi: 10.1029/2002RS002659.
10. Куруза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. 2016 г. 336 с.
11. Митник Л.М., Митник М.Л. Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исследование Земли из космоса, 2011. № 6. С. 34-44.
12. Macelloni G., Brogioni M., Pampaloni P., Cagnati A. Multifrequency microwave emission from the Dome-C area on the East Antarctic plateau: Temporal and spatial variability // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2007. V. 45, No. 7. P. 2029-2039.
13. Brucker L., Picard G., Arnaud L., Barnola J.-M., Schneebeli M., Brunjail H., Lefebvre E., Fily M. Modeling time series of microwave brightness temperature at Dome C, Antarctica, using vertically resolved snow temperature and microstructure measurements // J. Glaciology. 2011. V. 57. No. 201. P. 171-182.
14. Imaoka K., Kachi M., Fujii H., Murakami H., Hori M., Ono A., Igarashi T., Nakagawa K., Oki T., Honda Y., Shimoda H. Global Change Observation Mission (GCOM) for monitoring carbon, water cycles, and climate change // Proc. IEEE. 2010. Vol. 98. No. 5. P. 717-734.
15. Okuyama A., Imaoka K. Intercalibration of Advanced Microwave Scanning Radiometer-2 (AMSR2) brightness temperature // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2015. V. 53. No. 8. P. 4568-4577.
16. Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л. Микроволновые характеристики Антарктического плато по измерениям со спутников Метеор-М № 2 и GCOM-W1 // Тезисы. 13 Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса" М., ИКИ РАН, 16-20 ноября 2014 г. С. 289
17. Surdyk S. Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica: An analytical approach // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 80. No. 2. P. 256– 271.
18. Mitnik L.M., Cherny I.V., Mitnik M.L., Chernyavskii G.M., Kuleshov V.P., Baranyuk A.V. The MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M no. 2 satellite: the first 10 months in an orbit, calibration of data and retrieval of geophysical parameters // Abstract Intern. Symposium "Atmospheric Radiation and Dynamics" (ISARD – 2015), Saint-Petersburg-Petrodvorets, June 2015. P. 23-25.