Спутниковые микроволновые радиометрические измерения экстремального повышения температуры в Восточной Антарктиде в марте 2022 года

Л. М. Митник, В. П. Кулешов, М. Л. Митник, А. В. Баранюк

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

Приведены результаты зондирования Восточной Антарктиды и прилегающих областей Южного океана микроволновыми спутниковыми радиометрами МТВЗА-ГЯ на частотах $\nu = 10–190$ и AMSR2 на $\nu = 6–89$ ГГц во время вторжения тёплого и влажного воздуха (атмосферной реки — АР) из района Тасмании в марте 2022 г. Потепление воздуха у поверхности, обусловленное АР, было зарегистрировано автоматическими станциями погоды (*англ.* Automatic Weather Station — AWS) на побережье и на высотных станциях «Восток», Concordia и Dome CII в Восточной Антарктиде. Изменчивость характеристик атмосферы над Антарктидой изучена по показаниям радиозондов, запущенных со станций Casey на побережье и Concordia на высоте 3230 м, и временным рядам яркостной температуры $T_я(\nu)$, усреднённой по круговой площадке диаметром 200 км с центром на расстоянии ~200 км от ст. Concordia. Влияние вариаций температуры воздуха и поверхности, а также паросодержания атмосферы на вариации яркостной температуры оценено по результатам моделирования переноса микроволнового излучения в системе «атмосфера – фирн» с использованием радиозондовых профилей со ст. Concordia. Было показано, что рост $T_я(\nu)$ на частотах 89–92 ГГц значительной части Восточной Антарктиды при перемещении АР был вызван в основном увеличением температуры фирна. Приращение $T_я(\nu)$ на частотах ~176–190 ГГц в области линии поглощения водяного пара было обусловлено увеличением как температуры фирна, так и температуры и влажности воздуха. По измерениям яркостной температуры $T_я(\nu)$ над открытым океаном на частотах в окнах прозрачности атмосферы $\nu \approx 6–48$ ГГц и $\nu \approx 88–92$ ГГц определены скорость ветра W, водозапас облаков Q и паросодержание атмосферы V, а также изучена временная изменчивость параметров в области АР.

Ключевые слова: Антарктида, аномалия температуры воздуха, атмосферная река, микроволновая радиометрия, AMSR2 GCOM-W1, «Метеор-М» № 2-2 МТВЗА-ГЯ, Concordia, автоматические станции погоды, яркостная температура, моделирование, временные ряды, температура поверхности фирна

Одобрена к печати: 07.12.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-246-261

Введение

Результаты микроволнового (МВ) зондирования Антарктиды и Южного океана из космоса представляют значительный интерес для решения научных и прикладных задач, таких как оценка влияния различных природных факторов на современное изменение климата, изучение взаимодействия океана, морского льда и атмосферы, моделирование переноса излучения в системе «океан – морской и материковый лёд – атмосфера», калибровка спутниковых радиометров и др. Необходимость расширения работ по дистанционному зондированию Южного полушария из космоса подчёркнута в публикации (Pope et al., 2017). Яркостная температура Южного океана на различных типах поляризации в МВ-диапазоне определяется температурой и солёностью воды, скоростью ветра у поверхности, распределением по высоте температуры и влажности воздуха, водности и лёдности облаков, а также характеристиками осадков. Основные факторы, влияющие на коэффициент излучения и яркостную температуру Антарктиды в МВ-диапазоне (поляризация излучения, шероховатость поверхности, распределение температуры фирна с глубиной, микроструктура фирна (форма и размер зёрен, плотность в зависимости от глубины), характеристики атмосферы), рассмотрены в статьях (Kar

et al., 2022; Macelloni et al., 2007; Narvekar et al., 2010; Picard et al., 2014; Surdyk, 2002) и в цитируемых в них публикациях.

Изменчивость яркостной температуры Антарктиды $T_я(\nu)$, циклонических образований, атмосферных рек (АР) и приводного ветра над Южным океаном, морского льда и шельфовых ледников Антарктиды исследована по спутниковым и наземным МВ-наблюдениям на частотах ν от 1,4 до 200 ГГц (Comiso, 2010; Kar et al., 2022; Melsheimer et al., 2022; Mitnik et al., 2021; Picard et al., 2014; Pope et al., 2017; Ricaud et al., 2015).

Важной причиной изменчивости выступают интенсивные циклоны и атмосферные реки, которые при благоприятной синоптической обстановке выносят тёплый и влажный воздух с океана на континент (Pohl et al., 2021). Индикатором этих процессов над Южным океаном и Антарктидой становятся температура поверхности и приземного воздуха, паросодержание атмосферы, определяемые по данным МВ-радиометров, оптических и инфракрасных (ИК) спектрометров, автоматических станций погоды (*англ*. Automatic Weather Station — AWS) и радиозондов (Чернявский и др., 2018, 2020; Mitnik et al., 2017, 2018, 2021, 2022; Pagano et al., 2010; Ricaud et al., 2020a; Sims et al., 2012; Ye et al., 2007).

В работе рассмотрены вариации $T_я(\nu)$ ледяного щита Восточной Антарктиды по измерениям спутниковых МВ-радиометров AMSR2 (*англ*. Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) японского спутника дистанционного зондирования Земли «Сидзуку» (*англ*. Global Change Observation Mission 1st-Water — GCOM-W1 (Shizuku)) и МТВЗА-ГЯ (Микроволновый сканер температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) до, во время и после экстремального повышения температуры воздуха 16–21 марта 2022 г. На станциях Concordia (75° 06′ ю. ш., 123° 20′ в. д., высота поверхности $h_п = 3230$ м), «Восток» (78° 28′ ю. ш., 106° 50′ в. д., $h_п = 3489$ м) и других, расположенных на Антарктическом плато, всплеск температуры воздуха составил ~30–40 K, а на береговых станциях — ~10–15 °C. Из анализа синоптической информации и данных спутниковых наблюдений следует, что потепление было вызвано мощной атмосферной рекой, протянувшейся от Австралии к Антарктиде. Аналогичное экстремальное потепление над Восточной Антарктидой наблюдалось в декабре 1989 г. (Turner et al., 2022).

Метеорологические и радиозондовые наблюдения

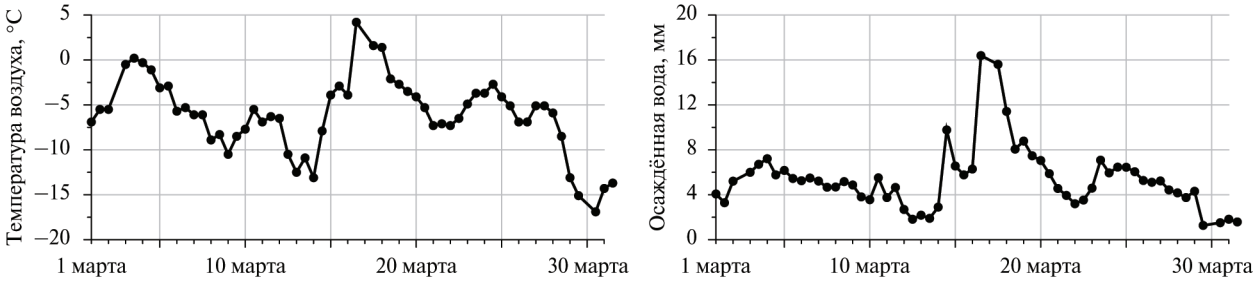
Временные ряды температуры воздуха у поверхности T_0 и паросодержания атмосферы V по данным радиозондов в 00:00 и 12:00 UTC (*англ*. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) на ст. Casey 89611 (66° 17′ ю. ш., 110° 12′ в. д., $h_п = 42$ м) в марте 2022 г. приведены на *рис. 1* (см. с. 248). Прохождение атмосферной реки над станцией проявляется в повышении T_0 до положительных значений 17–18 марта (см. *рис. 1а*).

Мощный поток тёплого и влажного воздуха под действием северных ветров распространился от побережья на высокое (>1,5 км) Антарктическое плато. Скачок температуры воздуха у поверхности плато превысил 30 °C. Временные ряды T_0 по данным AWS «Восток», Concordia и Dome CII (75,106° ю. ш., 123,346° в. д., $h_п = 3250$ м) показаны на *рис. 2* (см. с. 248).

На российской станции «Восток» 18 марта была зафиксирована температура воздуха –17,7 °C, что на ~35 °C выше среднесуточного максимума в этот день и на 15 °C выше значения T_0 для любого дня в марте за всё время наблюдений с 1957 г. На франко-итальянской научной станции Concordia (~560 км от ст. «Восток») 17 марта $T_0 = -11{,}5$ °C — рекордный максимум, на 37 °C превысивший среднесуточный максимум в этот день (– 49 °C) также за всё время наблюдений. На расположенной поблизости AWS Dome CII температура до и после вторжения атмосферной реки составляла – 60 °C.

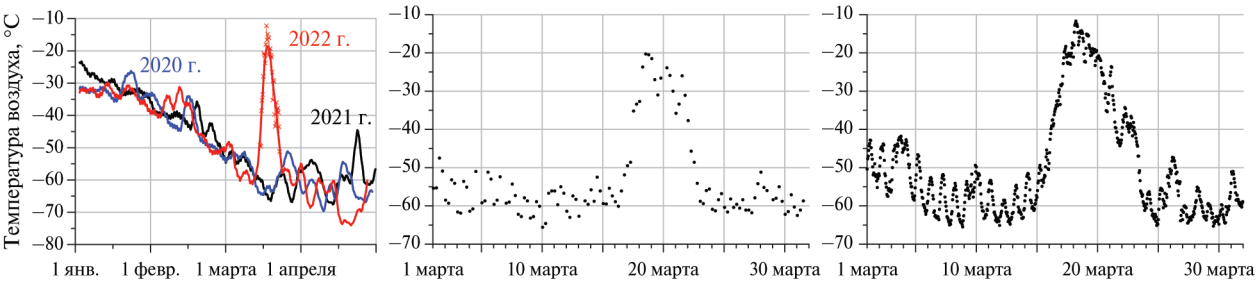
Рост температуры и влажности воздуха следует из анализа показаний радиозондов, выпущенных 14–25 марта со ст. Concordia (https://www.climantartide.it/dataaccess/rds) в 12:00 UTC и ст. Casey (https://weather.uwyo.edu/upperair/bufrraob.shtml) в 00:00 и 12:00 UTC. Относительная влажность в слое толщиной >3–5 км возрастала до 80–100 %. Паросодержа-

ние атмосферы над ст. Casey увеличилось с ~2–4 кг/м^2 10–14 марта до ~16 кг/м^2 17–18 марта (см. *рис. 1б*), а над ст. Concordia — с ~0,2–0,5 до 2,5–4,2 кг/м^2.



а *б*

Рис. 1. Временные ряды температуры воздуха у поверхности по данным AWS (*а*) и паросодержания атмосферы по данным радиозондов (*б*) на ст. Casey в марте 2022 г.



а *б* *в*

Рис. 2. Временные ряды температуры воздуха у поверхности по измерениям AWS в январе – апреле в 2020, 2021 и 2022 гг. на ст. Concordia (*а*) и в марте 2022 г. на станциях «Восток» (*б*) и Dome CII (*в*)

Микроволновые спутниковые измерения

Характеристики атмосферной реки и синоптических циклонов над Южным океаном и Восточной Антарктидой 14–25 марта 2022 г. были изучены в основном по измерениям МВ-радиометров AMSR2, GMI (*англ.* GPM Microwave Imager) и МТВЗА-ГЯ (спутник «Метеор-М» № 2-2). Спутниковые данные включали как яркостную температуру $T_{\text{я}}^{\text{В,Г}}(\nu)$ на вертикальной (В) и горизонтальной (Г) поляризации на частотах радиометров ν, так и поля паросодержания атмосферы V, водозапаса облаков Q и скорости приводного ветра W, восстановленные по $T_{\text{я}}^{\text{В,Г}}(\nu)$ по алгоритмам (Митник, Митник, 2006, 2011; Mitnik et al., 2009).

Временные ряды $T_{\text{я}}^{\text{В,Г}}$ на частотах 10,65 и 36,5 ГГц по данным AMSR2 над ст. Concordia и температуры воздуха у поверхности T_0 по данным AWS с 1 сентября 2019 г. по 30 апреля 2022 г. приведены на *рис. 3* (см. с. 249). Яркостная температура измерена над тестовой областью — кругом диаметром 200 км. Сезонная изменчивость температуры воздуха регистрируется в слое фирна толщиной ~10 м (Brucker et al., 2011; Macelloni et al., 2007). Глубина проникновения электромагнитной волны в фирн уменьшается с частотой и составляет ~10 м на $\nu = 10$ ГГц и ~1–2 см на $\nu \approx 90$ ГГц (Kar et al., 2022; Picard et al., 2014; Surdyk, 2002). Поэтому на $\nu = 10{,}65$ ГГц сезонные вариации не превышают 10 К (см. *рис. 3а*), а на $\nu = 36{,}5$ ГГц возрастают до 30–33 К (см. *рис. 3б*).

Помимо ярко выраженных сезонных изменений T_0 с размахом ~40 °C и $T_{\text{я}}$ с размахом, зависящим от частоты и поляризации принимаемого излучения, видны синоптические вариации с типичной продолжительностью 5–7 сут, связанные с вторжениями тёплого и холодного воздуха. Синоптические вариации особенно заметны в холодное полугодие. На временных рядах T_0 и $T_{\text{я}}$ на 36,5 ГГц выделяется пик 15–25 марта 2022 г. между тёплым летним и холодным зимним сезоном с беспрецедентным ростом температуры воздуха (см.

рис. 2а). Максимальной температуре воздуха $T_0 = 261{,}5$ K в местный полдень соответствует $T_я(89\text{B}) = 218$ K на восходящем витке. Приращения относительно значений за 10–14 марта равны ~50 K для T_0 и ~40 K для $T_я(89\text{B})$.

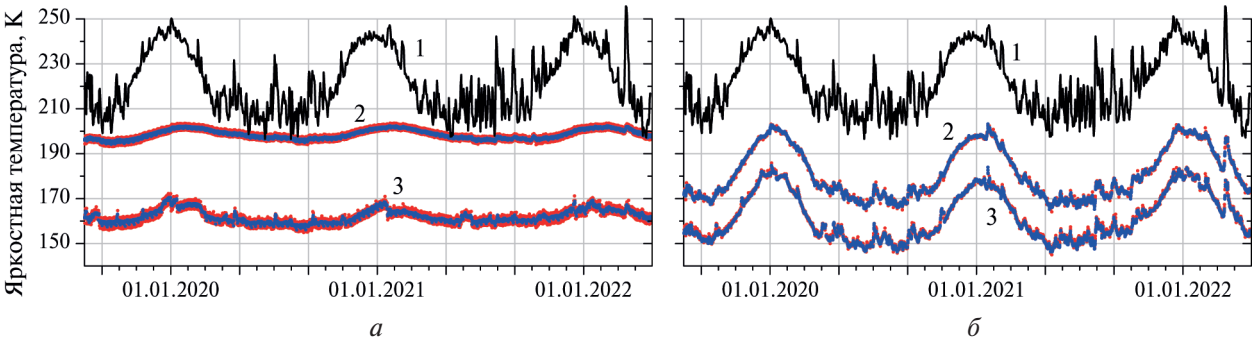


Рис. 3. Временные ряды температуры воздуха у поверхности (скользящее среднее за одни сутки, кривая 1) и яркостной температуры на частотах 10,65 ГГц (*а*) и 36,5 ГГц (*б*) на вертикальной (кривая 2) и горизонтальной (кривая 3) поляризации по измерениям AMSR2 на восходящих (синие точки) и нисходящих (красные точки) витках с 1 августа 2019 г. по 31 марта 2022 г.

Временные ряды T_0 и $T_я(89\text{B})$ при переходе от лета (январь) к зиме (апрель) (*рис. 4*) показывают и суточные вариации, и потепление в середине марта. Средние значения $T_я$ всех пикселей в тестовой области за одни сутки на восходящих витках отмечают синие точки, а на нисходящих — красные. Значения T_0 измерялись через 1 ч. Вариации $T_я^{\text{В,Г}}(\nu)$ зависят от теплофизических и радиофизических характеристик фирна и от изменений температуры поверхности, которая следует за T_0 с некоторым запозданием. При продолжительности светового дня на ст. Concordia 16–25 марта ~12 ч изменения T_0 за сутки находятся обычно в пределах ~5–10 K, а $T_я^{\text{B}}$ на $\nu = 89$–92 ГГц — ~3–7 K, что следует из анализа данных AMSR2 и МТВЗА-ГЯ без временного усреднения.

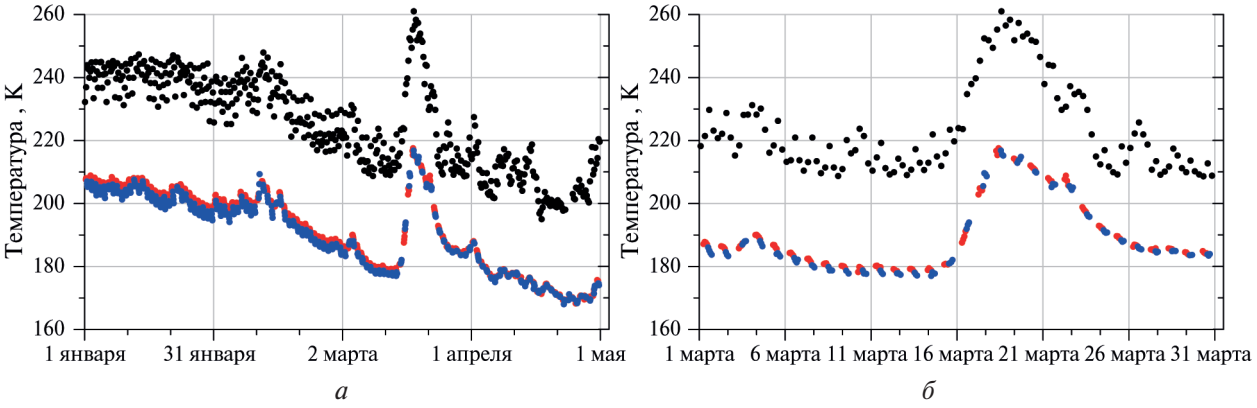
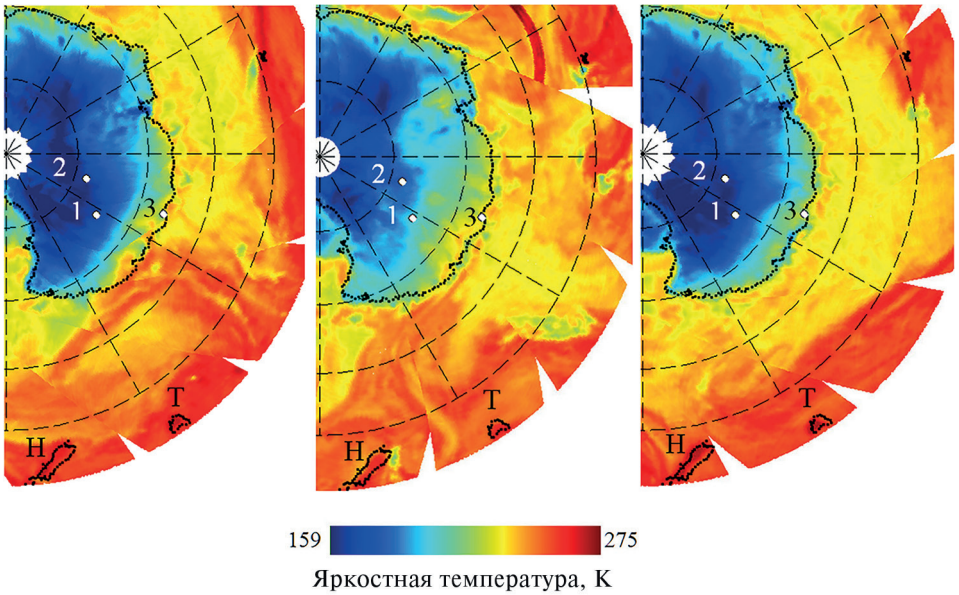


Рис. 4. Временные ряды яркостной температуры на частоте 89 ГГц на В-поляризации по измерениям AMSR2 на восходящих (синие точки) и нисходящих (красные точки) витках над районом ст. Concordia и температуры воздуха по данным AWS (чёрные точки) с 1 января по 1 мая 2022 г. (*а*) и с 1 по 31 марта 2022 г. (*б*)

Близкое подобие двух временных рядов означает возможность оценки температуры воздуха по $T_я(89\text{B})$. Коэффициент корреляции между усреднёнными за сутки значениями T_0 и $T_я(89\text{B})$, рассчитанный по временным рядам за 2019–2022 гг. (854 точки), равен ~0,84, а среднеквадратичное отклонение значений T_0 относительно линии линейной регрессии составляет ~4,6 °C. Поскольку временная изменчивость коэффициента излучения мала, вари-

ации $T_я$ на ν = 89–92 ГГц определяются в основном изменением температуры поверхности. (В окраинных зонах с высотой <1,5 км иногда наблюдаются осадки и таяние (Johnson et al., 2022), существенно влияющие на коэффициент излучения. По данным МВ-радиометров осадки 16–18 марта не отмечались.)

На *рис. 5* приведены поля $T_я$(91В) по измерениям МТВЗА-ГЯ до, во время и после потепления, вызванного мощным потоком воздуха из субтропической зоны Индийского океана. От побережья Антарктиды (ст. Casey 3) поток распространился к югу и захватил обширную центральную область континента, включая станции Concordia 1 и «Восток-2» (белые кружки на *рис. 5*). Атмосферная река выделяется по повышенным значениям $T_я$(91В) и над океаном, и над материком. Над океаном рост $T_я$(91В) обусловлен повышенным паросодержанием атмосферы и водозапаса облаков, а над Антарктидой — в основном повышением температуры поверхности. С удалением от побережья температура и влажность воздуха в АР, температура фирна, а следовательно, и $T_я$ снижаются (см. *рис. 5б*).



а *б* *в*

Рис. 5. Яркостная температура на частоте 91,65 ГГц на В-поляризации по измерениям радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 над Южным океаном и Восточной Антарктидой: *а* — 15 марта 2022 г.; *б* — 18 марта 2022 г.; *в* — 25 марта 2022 г. Белые кружки отмечают положение станций: 1 — Concordia, 2 — «Восток», 3 — Casey; Н — Новая Зеландия, Т — о. Тасмания

Для оценки вклада атмосферы в измеряемую из космоса яркостную температуру применим модель, учитывающую как излучение поверхности Антарктиды, так и излучение и поглощение атмосферы. Временные ряды $T_я^{В,Г}$ можно представить в виде следующей суммы:

$$T_я^{В,Г}(\nu,\theta) = \chi^{В,Г}(\nu,\theta) T_{фирн\ эф} e^{-\tau(\nu)\cdot\sec\theta} + T_я^{\uparrow}(\nu,\theta) + \\ + T_я^{\downarrow}(\nu,\theta)\left[1-\chi^{В,Г}(\nu,\theta)\right]\cdot e^{-\tau(\nu)\cdot\sec\theta} + T_р\left[1-\chi^{В,Г}(\nu,\theta)\right]e^{-2\tau(\nu)\cdot\sec\theta}, \quad (1)$$

где θ — угол падения; $\chi^{В,Г}(\nu, \theta)$ — коэффициент излучения поверхности; $T_{фирн\ эф}(\nu)$ — эффективная температура слоя фирна; $\tau(\nu) = \int\gamma(h)\, dh$ — интегральное поглощение в атмосфере при θ = 0° (надир); $\gamma(h)$ — вертикальный профиль погонного поглощения в атмосфере; h — высота над поверхностью (интегрирование ведётся от поверхности $h_п$ до высоты $h_{атм}(\nu)$, выше которой вклад атмосферы в τ(ν) можно не учитывать); $T_я^{\uparrow}(\nu,\theta)$ и $T_я^{\downarrow}(\nu,\theta)$ — яркостная температура восходящего и нисходящего излучения атмосферы соответственно; $T_р = 2{,}73$ K — яркостная температура космического реликтового излучения.

Интегральное поглощение складывается из поглощений в водяном паре $\tau_{вп}(\nu)$, кислороде $\tau_к(\nu)$ и облаках. Величина $\tau_{вп}(\nu)$ пропорциональна паросодержанию атмосферы. Значения V над Восточной Антарктидой по данным радиозондов и наземных МВ-наблюдений, как правило, меньше 1 кг/м^2 (Mo et al., 2021; Ricaud et al., 2015; Sims et al., 2012). Погонное поглощение в кислороде пропорционально давлению и спадает с высотой по экспоненциальному закону: $\gamma_к(h) = \gamma_к(0)\cdot\exp\left(-h/H_к\right)$, где $H_к \approx 5$ км — характеристическая высота поглощения в кислороде. Поглощение $\tau_к(\nu)$ от уровня ст. Concordia ($h_{ст} = 3{,}25$ км) будет примерно вдвое меньше, чем от уровня моря. Поглощение в изредка наблюдаемых переохлаждённых водяных облаках малó из-за низких значений их водозапаса (Ricaud et al., 2020b). Поглощение в ледяных облаках и ледяном тумане намного меньше, чем в водяных облаках. Их интегральная лёдность, как правило, ниже 0,01 кг/м^2, и на частотах $\nu < 100$ ГГц они практически прозрачны.

В горизонтально-стратифицированной атмосфере при $\tau(\nu)\cdot\sec\theta < 0{,}1$ имеем:

$$T_я^{\uparrow}(\nu,\theta) = T_я^{\downarrow}(\nu,\theta) \approx T_{атм\ эф}\tau(\nu)\cdot\sec\theta, \qquad (2)$$

где $T_{атм\ эф}$ — эффективная температура атмосферы, зависящая от вертикальных профилей температуры воздуха и погонного поглощения.

Из анализа радиозондовых профилей $T(h)$ следует, что эффективную температуру атмосферы над ст. Concordia можно принять равной ~230–250 K. В условиях холодной и сухой ($V < 1$ кг/м^2) атмосферы (Ricaud et al., 2020a) влияние вариаций поглощения в водяном паре на $\tau(\nu)$, $T_я^{\uparrow}(\ )$ и $T^{\downarrow}(\nu)$ невелико и интегральное поглощение определяется в основном поглощением в кислороде $\tau_к(\nu)$. При $\tau \approx 0{,}04$ и $\theta = 55–65°$ имеем $T_{я\,атм}^{\uparrow} \approx 14$ K.

Полагая, что в области угла Брюстера ($\theta = 55–65°$) коэффициент излучения $\chi^В$ максимален и равен ~0,8, $\chi^Г = 0{,}6$ (Kar et al., 2022; Picard et al., 2014), а эффективная температура фирна $T_{фирн\ эф}$ на $\nu > 10$ ГГц составляет ~230–250 K (Kar et al., 2022; Macelloni et al., 2007; Picard et al., 2014; Surdyk, 2002), находим по формуле (1): $T_я^В(91) = 190$ K и $T_я^Г(91) = 170$ K. Эти значения близки к усреднённым величинам $T_я$ на $\nu = 37$ ГГц, полученным радиометрами SSM/I (*англ*. Special Sensor Microwave/Imager) и WindSat, а также в наземных измерениях после усреднения. До усреднения на масштабах от единиц до сотни метров вариации $T_я^В(37)$ достигали 10 K на разрезах длиной до 8 км и были обусловлены изменением плотности снега под действием ветра (Picard et al., 2014).

Значения $T_я^В$ по измерениям AMSR2 в январе – марте 2022 г. на $\nu = 36{,}5$ ГГц (см. *рис. 3б*) и $\nu = 89$ ГГц (см. *рис. 4*) над ст. Concordia близки к расчётным значениям (Brucker et al., 2011; Kar et al., 2022; Picard et al., 2014). Близки к ним и измерения МТВЗА-ГЯ в марте на $\nu = 91{,}65$ ГГц (см. *рис. 5*). Из совместного анализа временных рядов температуры воздуха и яркостной температуры системы «атмосфера – фирн», найденных при интегрировании уравнения переноса излучения с использованием радиозондовых профилей давления, температуры и влажности воздуха за 14–25 марта (https://www.climantartide.it/dataaccess/rds), следует, что временная изменчивость $T_я^В(\nu)$ на $\nu > 36$ ГГц обусловлена в основном изменением температуры поверхности фирна $T_{фирн}$. Значения $T_{фирн}$ тесно связаны с температурой воздуха, что использовано для её определения по измерениям температуры поверхности спектрорадиометром MODIS (*англ*. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) со спутников Terra и Aqua (Meyer et al., 2016). Поля температуры поверхности LST (*англ*. Land Surface Temperature) — ежедневный продукт NASA (*англ*. National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства — НАСА). по дневным и ночным измерениям (https://modis-land.gsfc.nasa.gov/temp21.html). Поля LST при отсутствии облаков (не показаны) и $T_я^В(91)$ на *рис. 5* хорошо согласуются.

Изменчивость $T_я^В(91)$ также определяется вариациями температуры фирна, зависящей от T_0 как при обычных, так и при высоких значениях паросодержания. В максимуме экстремального потепления 18 марта ($T_0 = -17{,}6$ °C и $V \approx 4{,}5$ кг/м^2) яркостная температура $T_я^В(91)$ была на 35,5 K выше уровня за 14 марта ($T_0 = -56{,}1$ °C, $V \approx 0{,}12$ кг/м^2, причём основной вклад в это приращение (23,5 K) был вызван ростом температуры фирна на 38,5 °C (см. первое слагаемое в формуле (1)). Вклад атмосферных составляющих в $T_я^В(91)$ больше, чем уменьше-

ние $T_я$ фирна из-за поглощения в атмосфере. Атмосфера над Восточной Антарктидой сухая и холодная: зимой $V \approx 0{,}1$ кг/м^2, $T_0 \approx 205$ K, а летом $V \approx 0{,}6$–$0{,}8$ кг/м^2, $T_0 \approx 250$ K. Летом значения V могут быть >1,0 кг/м^2, а иногда достигать 1,7 кг/м^2. При $V < 1{,}3$ кг/м^2 (~99 % многолетних данных (Ricaud et al., 2014, 2020b)) вклад атмосферы в вариации $T_я^B(91)$ может быть скорректирован по вариациям паросодержания.

Атмосферная река над Антарктидой

Снег, приносимый атмосферными реками, поддерживает баланс массы ледяного щита Антарктиды, компенсируя её потерю из-за таяния.

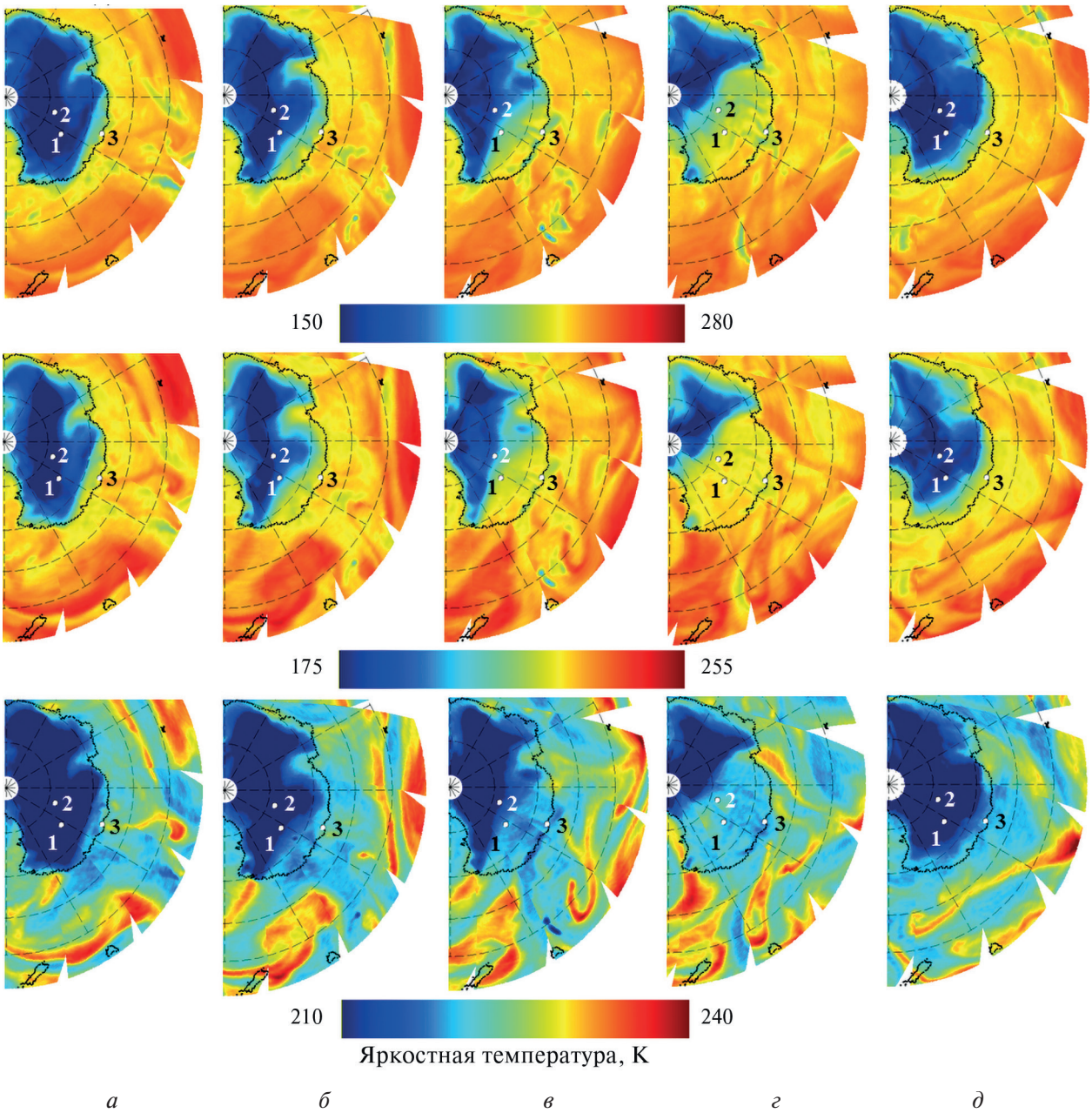


Рис. 6. Яркостная температура Восточной Антарктиды и областей Южного океана на частотах 183,31±7 ГГц (верхний ряд), 183,31±3 ГГц (средний ряд) и 183,31±1,4 ГГц (нижний ряд) по данным радиометра МТВЗА-ГЯ: *а–г* — 14–17 марта 2022 г.; *д* — 25 марта 2022 г. Белые кружки отмечают положение станций: 1 — Concordia, 2 — «Восток», 3 — Casey

Пространственно-временные вариации температуры и влажности атмосферы, содержания парообразной и капельной влаги в АР могут быть изучены по данным сканирующих МВ-радиометров на частотах в окнах прозрачности атмосферы и в диапазонах поглощения кислорода 52–58 ГГц и водяного пара 176–190 ГГц (Чернявский и др., 2018, 2020; Matrosov, 2013; Mitnik et al., 2021, 2022; Moradi et al., 2015). Для оценки характеристик влажности воздуха и поглощения, а также калибровки спутниковых радиометров особый интерес представляют измерения $T_я$ на частотах вблизи резонанса $\nu_0 = 183{,}31$ ГГц, рассмотренные по данным экспериментов и моделирования в работах (Buehler et al., 2007, 2020; Chen, Bennartz, 2020; Chung et al., 2013; Moradi et al., 2015). Поглощение на $\nu = \nu_0 \pm 1{,}4$ ГГц и $\nu = \nu_0 \pm 3$ ГГц даже при весьма малой влажности атмосферы настолько велико, что уходящее МВ-излучение формируется в основном в верхней и средней тропосфере, а излучение фирна практически не влияет на $T_я$ (Chung et al., 2013; Moradi et al., 2015; Payne et al., 2008). Наблюдения вблизи 183,31 ГГц использовались при исследовании характеристик и структуры внетропических циклонов и внезапных стратосферных потеплений в обоих полушариях (Митник и др., 2020, 2021; Mitnik et al., 2018, 2022).

На *рис. 6* (см. с. 252) приведена последовательность полей яркостной температуры Восточной Антарктиды и Южного океана, полученных МТВЗА-ГЯ 14–17 и 25 марта 2022 г. на частотах $\nu_0 = \nu_0 \pm 7$ ГГц, $\nu_0 = \nu_0 \pm 3$ ГГц и $\nu_0 = \nu_0 \pm 1{,}4$ ГГц. На частоте $183{,}31 \pm 7$ ГГц поглощение меньше, чем на частотах, расположенных ближе к ν_0, и яркостная температура растёт с увеличением как температуры поверхности T_0, так и излучения нижней тропосферы (Chung et al., 2013; Moradi et al., 2015). Такая ситуация наблюдалось 14–17 марта, когда сухой холодный воздух над Антарктидой замещался влажным и тёплым воздухом атмосферной реки. На $\nu = \nu_0 \pm 3$ ГГц и $\nu_0 = \nu_0 \pm 1{,}4$ ГГц поглощение в средней и верхней тропосфере полностью экранирует излучение поверхности, и рост $T_я$ на этих частотах обусловлен увеличением влажности и температуры воздуха. 17–20 марта площадь, занятая тёплым и влажным воздухом, была максимальна. После 22 марта восстановилось состояние, типичное для середины осеннего периода, которому соответствуют поля $T_я$ за 14 и 25 марта на *рис. 6*, значения T_0 и V на *рис. 2* и временные ряды $T_я$ и T_0 на *рис. 3б* и *4*.

Поля $T_я$ на частотах в области 176–190 ГГц визуализируют положение тёплых и холодных воздушных масс и разделяющих их фронтов. Временные ряды $T_я$ на нескольких частотах позволяют следить за развитием циклонических образований и атмосферных фронтов на различных высотах, что следует из анализа экспериментальных данных и моделирования спектра яркостной температуры. Яркостный контраст фронта зависит от распределения температуры и влажности воздуха с высотой, водности (лёдности) облаков в зоне фронта и окружающих областях. Так, узкие полосы и пятна пониженных значений $T_я(\nu)$ на *рис. 6* свидетельствуют о рассеянии излучения на крупных каплях дождя и ледяных частицах в облаках.

Атмосферная река над океаном

Интегральные параметры — паросодержание атмосферы V и водозапасоблаков Q — могут быть восстановлены над океаном по яркостной температуре $T_я(\nu)$, измеренной AMSR2, и МТВЗА-ГЯ в диапазоне 10–45 ГГц. Высокая чувствительность к вариациям содержания водяного пара в атмосфере наблюдается на $\nu = 23{,}8$ ГГц, а к вариациям содержания воды в облаках — на $\nu = 36{,}5$ ГГц (*рис. 7*, см. с. 254). В полях $T_я$ за 16 и 17 марта хорошо видна атмосферная река АР, протянувшаяся от о. Тасмания Т до побережья Антарктиды. Для сравнения на *рис. 7г*, *и* приведены поля $T_я$ за 25 марта, когда у Антарктиды и над океаном значения V были малы, облачность отсутствовала и яркостная температура была заметно ниже, чем 16–17 марта над областью АР.

По яркостной температуре, измеренной спутниковыми радиометрами AMSR2, GMI и МТВЗА-ГЯ, были восстановлены поля паросодержания атмосферы, водозапаса облаков и скорости ветра в атмосферной реке над Южным океаном от Австралии до Антарктиды. Поля V, Q и W по данным AMSR2 за 16 и 17 марта 2022 г., найденные по алгоритмам

(Митник, Митник, 2006, 2011; Mitnik et al., 2009), приведены на *рис. 8* и *9* (см. с. 255). Значения V в области АР от 40 до 60° ю. ш. составляют 20 кг/м^2 и более (см. *рис. 8а*, *д*, *9а*). Ширина атмосферной реки достигает 500–600 км, о чём можно судить по полям паросодержания атмосферы и яркостной температуры на частоте 89,0 ГГц (на *рис. 8г*, *и* показаны изображения только на вертикальной поляризации). В центральной части реки водозапас облаков превышает 0,5 кг/м^2, что свидетельствует о выпадении осадков. Из сравнения измерений за 16 и 17 марта следует, что область с интенсивными осадками растёт. Так, 17 марта ширина полосы с $Q \geqslant 0{,}5$ кг/м^2 между 47 и 54° ю. ш. равна ~300 км (см. *рис. 9б*). Скорость потока влажного воздуха, направленного в южном направлении, а ближе к Антарктиде — в юго-западном, составляет 13–15 м/с (см. *рис. 8в*, *ж*, *9в*), что находится в согласии с определениями ветра по измерениям скаттерометра ASCAT (*англ.* Advanced SCATterometer).

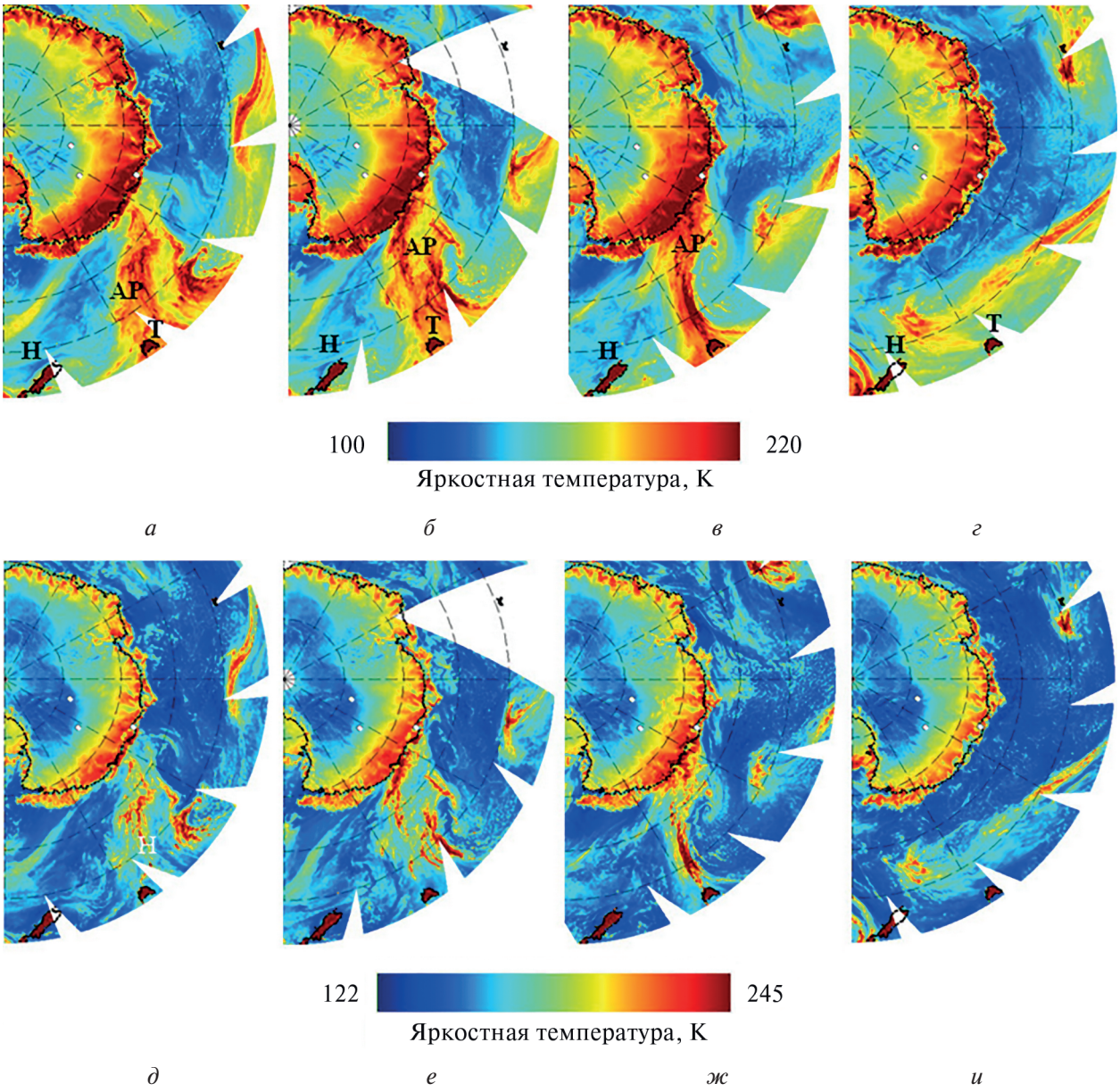


Рис. 7. Яркостная температура над Южным океаном и Восточной Антарктидой по данным радиометра AMSR2 на частотах 23,8 ГГц (*а–г*) и 36,5 ГГц (*д–и*) на горизонтальной поляризации, полученная: 16 марта 2022 г. на восходящих (*а*, *д*) и нисходящих (*б*, *е*) витках; 17 марта 2022 г. на восходящих витках (*в*, *ж*) и 25 марта 2022 г. на нисходящих витках (*г*, *и*). АР — атмосферная река; Н — Новая Зеландия, о. Южный; Т — о. Тасмания

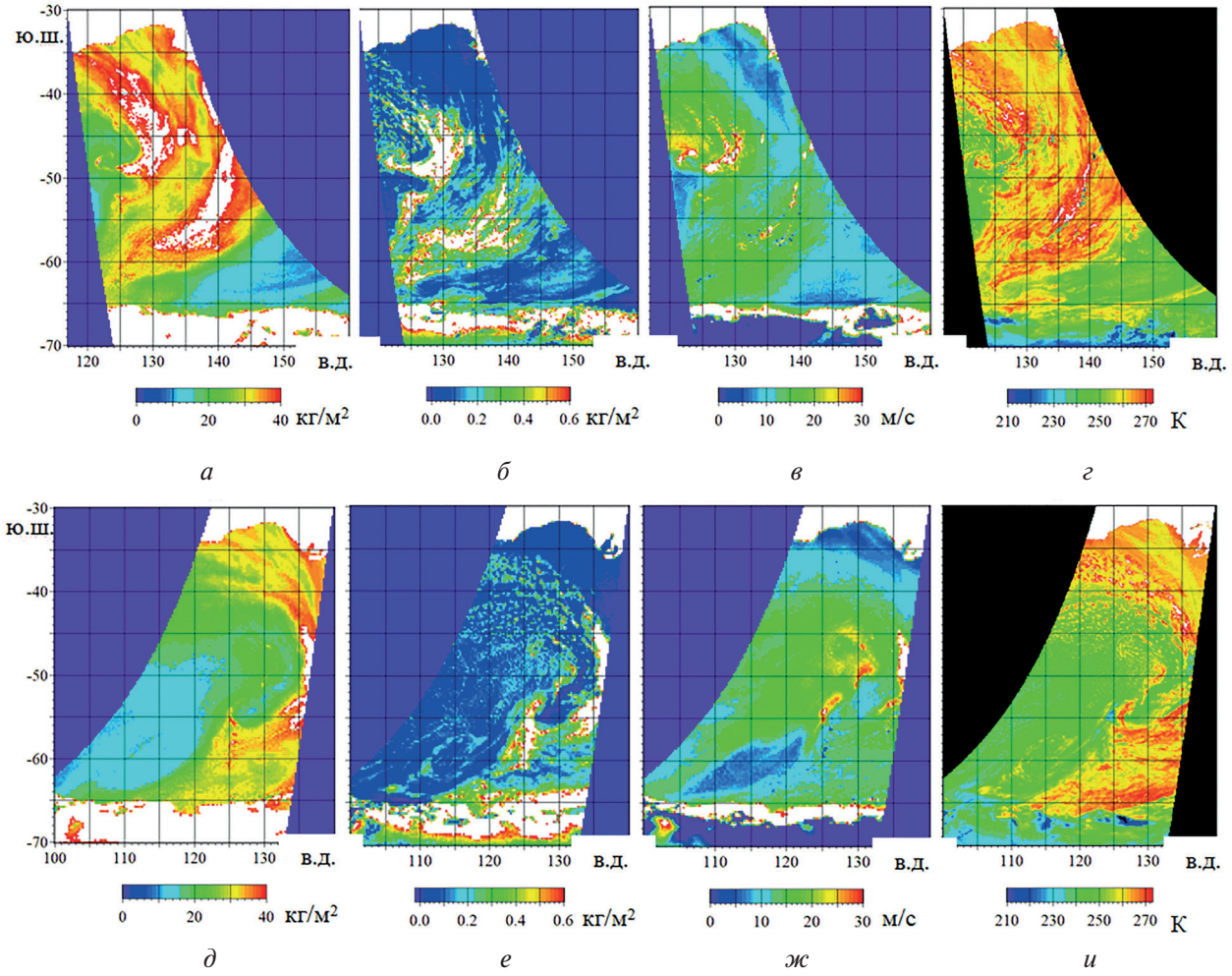


Рис. 8. Паросодержание атмосферы (*а*, *д*), водозапас облаков (*б*, *е*), скорость ветра (*в*, *ж*) и яркостная температура на частоте 89,0 ГГц на вертикальной поляризации (*г*, *и*) в области атмосферной реки над Южным океаном по данным радиометра AMSR2 за 05:15 UTC (*а–г*) и 15:55 UTC (*д–и*) 16 марта 2022 г.

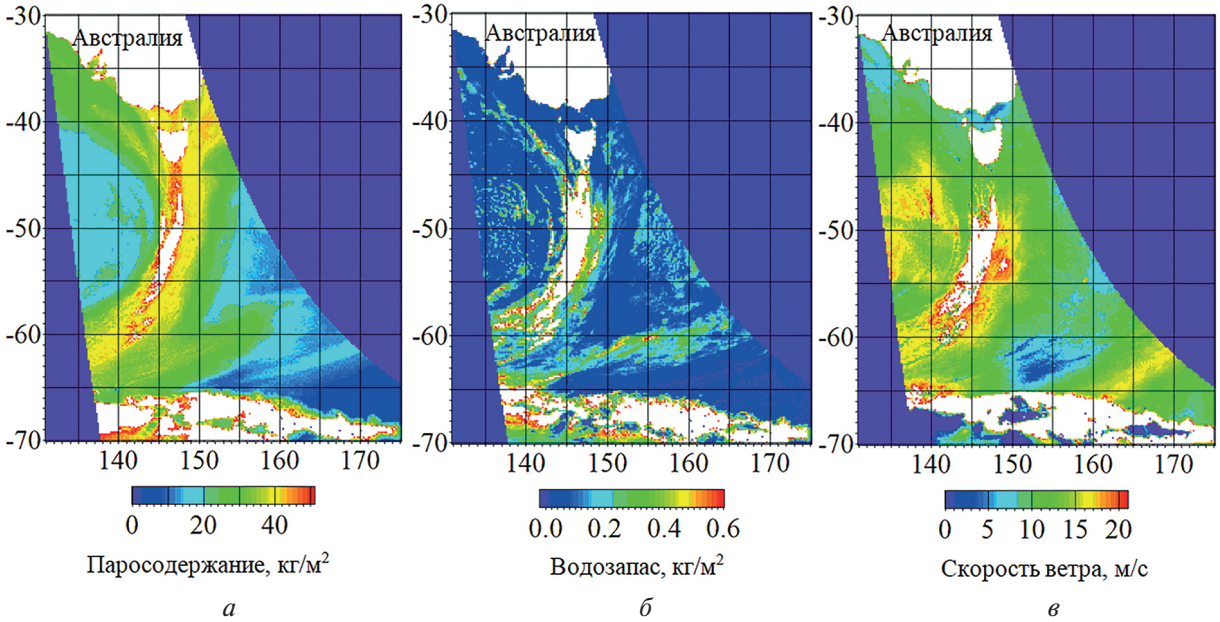


Рис. 9. Паросодержание атмосферы (*а*), водозапас облаков (*б*) и скорость ветра (*в*), восстановленные по измерениям радиометра AMSR2, в 04:17 UTC 17 марта 2022 г.

Заключение

В работе по данным спутниковых сканирующих микроволновых радиометров AMSR2, GMI и МТВЗА-ГЯ рассмотрено уникальное повышение температуры воздуха над Восточной Антарктидой 15–25 марта 2022 г. Благоприятная синоптическая ситуация обусловила формирование атмосферной реки в районе юго-западнее Австралии и Новой Зеландии. Тропическая влажная воздушная масса АР стремительно сместилась к Восточной Антарктиде и распространилась вглубь материка на сотни километров. Автоматические станции погоды на побережье и на ледяном щите Антарктиды зарегистрировали скачок температуры воздуха у поверхности T_0 в 35–40 °С. Приращения яркостной температуры $T_я(\nu)$ на частотах ν = 36–42 и 89–92 ГГц вблизи франко-итальянской научной ст. Concordia составили в максимуме 30 К. Амплитуда приращений снижалась с уменьшением частоты (с увеличением глубины проникновения электромагнитной волны в слой фирна). Малая (<1–2 см) глубина проникновения излучения на $\nu \approx 90$ ГГц в фирн и быстрое изменение температуры тонкого поверхностного слоя фирна под воздействием T_0 позволили картировать температурную волну над Антарктидой по $T_я(90)$ и ИК-измерениям спектрорадиометра MODIS (при ясном небе). Показано, что пространственно-временная изменчивость $T_я(\nu)$ Восточной Антарктиды в типичных условиях, наблюдаемых в 99 % случаев, обусловлена вариациями температуры поверхности фирна, что служит основой для всепогодного мониторинга. При редких аномальных условиях необходима небольшая коррекция, зависящая от паросодержания атмосферы. Изменчивость характеристик атмосферной реки над океаном изучена по яркостным температурам, измеренным радиометрами AMSR2 и GMI, и восстановленным по ним полям паросодержания атмосферы, водозапаса облаков и скорости приводного ветра. Временные ряды $T_я(\nu)$ и параметров V, Q и W служат источником количественной информации при анализе возникновения и эволюции циклонов и атмосферных рек и их воздействия на ледяной материк. Продолжительность жизненного цикла большинства циклонов и атмосферных рек мала, однако в это время происходят сложные процессы взаимодействия между океаном, атмосферой, морским и материковым льдом, для изучения которых необходимо проведение комплексных исследований, включая судовые работы.

Авторы благодарят доктора технических наук И. В. Чёрного (АО «Российские космические системы») за предоставленные данные радиометра МТВЗА-ГЯ и Японское аэрокосмическое исследовательское агентство JAXA (*англ*. Japan Aerospace Exploration Agency) за предоставленные данные радиометров AMSR2 и GMI. Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 20-17-00179).

Литература

1. *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 // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 34–41.
2. *Митник Л. М.*, *Митник М. Л.* Алгоритм восстановления скорости приводного ветра по измерениям микроволнового радиометра AMSR-E со спутника Aqua // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 34–44.
3. *Митник Л. М.*, *Кулешов В. П.*, *Митник М. Л.* Внезапное стратосферное потепление над Антарктидой в сентябре 2019 г. по данным радиометра МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 229–242. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-229-242.
4. *Митник Л. М.*, *Кулешов В. П.*, *Митник М. Л.* Внезапное стратосферное потепление в январе 2021 года по микроволновым измерениям со спутника «Метеор-М»» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 139–148. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-288-297.
5. *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 // Совре-

менные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 78–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
6. *Чернявский Г. М.*, *Митник Л. М.*, *Кулешов В. П.*, *Митник М. Л.*, *Стрельцов А. М.*, *Евсеев Г. Е.*, *Черный И. В.* Моделирование яркостных температур и первые результаты, полученные микроволновым радиометром МТВЗА-ГЯ со спутника «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 51–65. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
7. *Brucker L.*, *Picard G.*, *Arnaud L.*, *Barnola J.-M.*, *Schneebel M.*, *Brunail 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.
8. *Buehler S. A.*, *Kuvatov M.*, *Sreerekha T. R.*, *John V. O.*, *Rydberg B.*, *Eriksson P.*, *Notholt J.* A cloud filtering method for microwave upper tropospheric humidity measurements // Atmospheric Chemistry and Physics. 2007. V. 7. P. 5531–5542.
9. *Buehler S. A.*, *Prange M.*, *Mrziglod J.*, *John V. O.*, *Burgdorf M.*, *Lemke O.* Opportunistic constant target matching — A new method for satellite intercalibration // Earth and Space Science. 2020. V. 7. Art. No. e2019EA000856. https://doi.org/10. 1029/2019EA000856.
10. *Chen R.*, *Bennartz R.* Sensitivity of 89–190-GHz microwave observations to ice particle scattering // J. Applied Meteorology and Climatology. 2020. V. 59. P. 1195–1215. DOI: 10.1175/JAMC-D-19-0293.1.
11. *Chung E.*, *Soden B.*, *John V. O.* Intercalibrating microwave satellite observations for monitoring long-term variations in upper and midtropospheric water vapor // J. Atmospheric and Oceanic Technology. 2013. V. 30. P. 2303–2319. DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00001.1.
12. *Comiso J. C.* Polar Oceans from Space. N. Y.: Springer Publishing, 2010. 507 p.
13. *Johnson A.*, *Hock R.*, *Fahnestock M.* Spatial variability and regional trends of Antarctic ice shelf surface melt duration over 1979–2020 derived from passive microwave data // J. Glaciology. 2022. V. 68. Iss. 269. P. 533–546. https://doi.org/10.1017/jog.2021.112.
14. *Kar R.*, *Aksoy M.*, *Kaurejo D.*, *Atrey P.*, *Devadason J. A.* Antarctic firn characterization via wideband microwave radiometry // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 9. Art. No. 2258. https:// doi.org/10.3390/rs14092258.
15. *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 and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 7. P. 2029–2039. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.890805.
16. *Matrosov S. Y.* Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific Ocean // Monthly Weather Review. 2013. V. 141. No. 11. P. 3757–3768.
17. *Melsheimer C.*, *Spreen G.*, *Ye Y.*, *Shokr M.* Antarctic sea ice types from active and passive microwave remote sensing: preprint // Cryosphere: Discussion. 2022. 23 p. https://doi.org/10.5194/tc-2021-381.
18. *Meyer H.*, *Katurji M.*, *Appelhans T.*, *Müller M. U.*, *Nauss T.*, *Roudier P.*, *Zawar-Reza P.* Mapping daily air temperature for Antarctica based on MODIS LST // Remote Sensing. 2016. V. 8. Iss. 9. Art. No. 732. DOI: 10.3390/rs8090732.
19. *Mitnik L. M.*, *Mitnik M. L.*, *Zabolotskikh E. V.* Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E // J. Remote Sensing Society of Japan. 2009. V. 29. No. 1. P. 156–165.
20. *Mitnik L.*, *Kuleshov V.*, *Mitnik M.*, *Streltsov A. M.*, *Cherniavsky G.*, *Cherny I.* Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: modeling, calibration and measurements // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2017. V. 10. No. 7. P. 3036–3045. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2695224.
21. *Mitnik L. M.*, *Kuleshov V. P.*, *Mitnik M. L.*, *Baranyuk A. V.* Passive microwave observations of South America and surrounding oceans from Russian Meteor-M No. 2 and Japan GCOM-W1 satellites // Intern. J. Remote Sensing. 2018. V. 39. No. 13. P. 4513–4530. DOI: 10.1080/01431161.2018.1425569.
22. *Mitnik L.*, *Kuleshov V.*, *Panfilova M.*, *Karaev V.*, *Mitnik M.*, *Baranyuk A.* Satellite study of atmospheric cyclones and rivers around Antarctica // Proc. IGARSS. 2021. P. 7071–7074. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553258.
23. *Mitnik L. M.*, *Kuleshov V. P.*, *Mitnik M. L.*, *Chernyavski G. M.*, *Cherny I. V.*, *Streltsov A. M.* Microwave radiometer MTVZA-GY on new Russian satellite Meteor-M No. 2-2 and sudden stratospheric warming over Antarctica // IEEE J. Selected Topics of Applied Remote Sensing. 2022. V. 15. P. 820–830. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3133425.
24. *Mo Z.*, *Zeng Z.*, *Huang L.*, *Liu L.*, *Zhou L.*, *Huang L.*, *Zhou L.*, *Ren C.*, *He H.* Investigation of Antarctic precipitable water vapor variability and trend from 18 year (2001 to 2018) data of four reanalyses based on radiosonde and GNSS observations // Remote Sensing. 2021. V. 13. Iss. 19. Art. No. 3901. https://doi.org/10.3390/rs13193901.
25. *Moradi I.*, *Ferraro R.*, *Eriksson P.*, *Weng F.* Intercalibration and validation of observations from ATMS and SAPHIR microwave sounders // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2015. V. 53. No. 11. P. 5915–5925.

26. *Narvekar P. S.*, *Heygster G.*, *Jackson T. J.*, *Bindlish R.*, *Macelloni G.*, *Notholt J.* Passive polarimetric microwave signatures observed over Antarctica // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48. No. 3. P. 1059–1075.
27. *Pagano T. S.*, *Chahine M. T.*, *Fetzer E. J.* The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on the NASA Aqua spacecraft: A general remote sensing tool for understanding atmospheric structure, dynamics and composition // Proc. SPIE. 2010. V. 7827. DOI: 10.1117/12.865335.
28. *Payne V. H.*, *Delamere J. S.*, *Cady-Pereira K. E.*, *Gamache R. R.*, *Moncet J.-L.*, *Mlawer E. J.*, *Clough S. A.* Air-broadened half-widths of the 22- and 183-GHz water-vapor lines // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 11. P. 3601–3617.
29. *Picard G.*, *Royer A.*, *Arnaud L.*, *Fily M.* Influence of meter-scale wind-formed features on the variability of the microwave brightness temperature around Dome C in Antarctica // Cryosphere. 2014. V. 8. Iss. 3. P. 1105–1119.
30. *Pohl B.*, *Favier V.*, *Wille J.*, *Udy D. G.*, *Vance T. R.*, *Pergaut J.*, *Dutrievoz N.*, *Blanchet J.*, *Kittel C.*, *Amory C.*, *Krinner G.*, *Gordon F.* Relationship between weather regimes and atmospheric rivers in East Antarctica // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2021. V. 126. Iss. 24. Art. No. e2021JD035294. https://doi.org/10.1029/2021JD035294
31. *Pope A.*, *Wagner P.*, *Johnson R.*, *Shutler J. D.*, *Baeseman J.*, *Newman L.* Community review of Southern Ocean satellite data needs // Antarctic Science. 2017. V. 29. No. 2. P. 97–138.
32. *Ricaud P.*, *Carminati F.*, *Courcoux Y.*, *Pellegrini A.*, *Attié J.-L.*, *El Amraoui L.*, *Abida R.*, *Genthon C.*, *August T.*, *Warner J.* Statistical analyses and correlation between tropospheric temperature and humidity at Dome C, Antarctica // Antarctic Science. 2014. V. 26. Iss. 3. P. 290–308.
33. *Ricaud P.*, *Grigioni P.*, *Zbinden R.*, *Attié J.-L.*, *Genoni L.*, *Galeandro A.*, *Moggio L.*, *Montaguti S.*, *Petenko I.*, *Legovini P.* Review of tropospheric temperature, absolute humidity and integrated water vapour from the HAMSTRAD radiometer installed at Dome C, Antarctica, 2009–2014 // Antarctic Science. 2015. V. 27. Iss. 6. P. 598–616.
34. *Ricaud P.*, *Grigioni P.*, *Roehrig R.*, *Durand P.*, *Veron D. E.* (2020a) Trends in atmospheric humidity and temperature above Dome C, Antarctica evaluated from observations and reanalyses // Atmosphere. 2020. V. 11. Iss. 8. Art. No. 836. https://doi.org/10.3390/atmos11080836.
35. *Ricaud P.*, *Del Guasta M.*, *Bazile E.*, *Azouz N.*, *Lupi A.*, *Durand P.*, *Attié J.-L.*, *Veron D.*, *Guidard V.*, *Grigioni P.* (2020b) Supercooled liquid water cloud observed, analysed, and modelled at the top of the planetary boundary layer above Dome C, Antarctica // Atmospheric Chemistry and Physics. 2020. V. 20. P. 4167–4191.
36. *Sims G.*, *Ashley M. C. B.*, *Cui X.*, *Everett J. R.*, *Feng L. L.*, *Gong X.*, *Hengst S.*, *Hu Z.*, *Kulesa C.*, *Lawrence J. S.*, *Luong-Van D. M.*, *Ricaud P.*, *Shang Z.*, *Storey J. W. V.*, *Wang L.*, *Yang H.*, *Yang J.*, *Zhou X.*, *Zhu Z.* Precipitable water vapor above Dome A, Antarctica, determined from diffuse optical sky spectra // Publ. Astronomical Society of the Pacific. 2012. V. 124. P. 74–83.
37. *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.
38. *Turner J.*, *Lu H.*, *King J. C.*, *Carpentier S.*, *Lazzara M.*, *Phillips T.*, *Wille J.* An extreme high temperature event in coastal East Antarctica associated with an atmospheric river and record summer downslope winds // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. Art. No. e2021GL097108. https://doi.org/10.1029/2021GL097108
39. *Ye H.*, *Fetzer E. J.*, *Bromwich D. H.*, *Fishbein E. F.*, *Olsen E. T.*, *Granger S. L.*, *Lee S.-Y.*, *Chen L.*, *Lambrigtsen B. H.* Atmospheric total precipitable water from AIRS and ECMWF during Antarctic summer // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. Art. No. L19701. DOI: 10.1029/2006GL028547.

Satellite microwave radiometric measurements of extreme temperature rise in East Antarctica in March 2022

L. M. Mitnik, V. P. Kuleshov, M. L. Mitnik, A. V. Baranyuk

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru

The results of sensing of East Antarctica and the adjoining areas of the Southern Ocean by microwave satellite radiometers MTVZA-GYa at frequencies $\nu = 10–190$ GHz and AMSR2 at $\nu = 6–89$ GHz during the warm and humid air (atmospheric river — AR) invasion from the Tasmanian area in March 2022 are presented. The surface air warming caused by AR was recorded by the Automatic Weather Station (AWS) at the coast and at the Vostok, Concordia and Dome CII stations in East Antarctica. The variability of atmospheric characteristics above Antarctica was studied using readings of radiosondes launched from Casey station at the coast and Concordia station at a height of 3230 m and time series of brightness temperatures averaged over a circular area 200 km in diameter with the center at a distance of ~200 km from Concordia station. The influence of air and surface temperature and atmospheric water vapor content variations on brightness temperature $T_b(\nu)$ variations was estimated from the results of modeling of microwave radiation transfer in the atmosphere – firn system using radiosonde profiles from Concordia station. It was shown that the increase in the $T_b(\nu)$ at frequencies 89–92 GHz of a large part of East Antarctica was caused mainly by an increase in the firn temperature. The increase at frequencies ~176–190 GHz in the area of the water vapor absorption line was caused by the increase of both the firn temperature and air temperature and humidity. Based on measurements of brightness temperature $T_b(\nu)$ over the open ocean at frequencies in the atmospheric transparency windows ~6–48 and 88–92 GHz, the wind speed W, cloud liquid water content Q and atmospheric water vapor content V were determined and the temporal variability of parameters in the AR area was studied.

Keywords: Antarctica, air temperature anomaly, atmospheric river, microwave radiometry, AMSR2 GCOM-W1, Meteor-M No. 2-2 MTVZA-GYa, brightness temperature, modeling, time series, automatic weather stations

Accepted: 07.12.2022
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-246-261

References

1. Mitnik M. L., Mitnik L. M., Retrieval of total water vapor content and total cloud liquid water content over the ocean by microwave sensing from DMSP, TRMM, Aqua and ADEOS-II satellites, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 4, pp. 34–41 (in Russian).
2. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Algorithm of sea surface wind speed retrieval from Aqua AMSR-E measurements, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 6, pp. 34–44 (in Russian).
3. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Sudden stratospheric warming over Antarctica in September 2019 from the data of the MTVZA-GYa radiometer on the Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 229–242 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-229-242.
4. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Sudden stratospheric warming in January 2021 from microwave measurements from Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 139–148 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-288-297.
5. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Cherny I. V., Microwave sensing of the Ocean, atmosphere and land surface from Meteor-M No. 2 satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 78–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-78-100.
6. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Streltsov A. M., Evseev G. E., Cherny I. V., Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 51–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
7. Brucker L., Picard G., Arnaud L., Barnola J.-M., Schneebel M., Brunail 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, Vol. 57, No. 201, pp. 171–182.

8. Buehler S. A., Kuvatov M., Sreerekha T. R., John V. O., Rydberg B., Eriksson P., Notholt J., A cloud filtering method for microwave upper tropospheric humidity measurements, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, Vol. 7, pp. 5531–5542.
9. Buehler S. A., Prange M., Mrziglod J., John V. O., Burgdorf M., Lemke O., Opportunistic constant target matching — A new method for satellite intercalibration, *Earth and Space Science*, 2020, Vol. 7, Art. No. e2019EA000856, https://doi.org/10. 1029/2019EA000856.
10. Chen R., Bennartz R., Sensitivity of 89–190-GHz microwave observations to ice particle scattering, *J. Applied Meteorology and Climatology*, 2020, Vol. 59, pp. 1195–1215, DOI: 10.1175/JAMC-D-19-0293.1.
11. Chung E., Soden B., John V. O., Intercalibrating microwave satellite observations for monitoring long-term variations in upper and midtropospheric water vapor, *J. Atmospheric and Oceanic Technology*, 2013, Vol. 30, pp. 2303–2319, DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00001.1.
12. Comiso J. C., *Polar Oceans from Space*, New York: Springer Publ., 2010, 507 p.
13. Johnson A., Hock R., Fahnestock M., Spatial variability and regional trends of Antarctic ice shelf surface melt duration over 1979–2020 derived from passive microwave data, *J. Glaciology*, 2022, Vol. 68, Issue 269, pp. 533–546, https://doi.org/10.1017/jog.2021.112.
14. Kar R., Aksoy M., Kaurejo D., Atrey P., Devadason J. A., Antarctic firn characterization via wideband microwave radiometry, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 9, Art. No. 2258, https://doi.org/10.3390/rs14092258.
15. 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 and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 7, pp. 2029–2039, https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.890805.
16. Matrosov S. Y., Characteristics of landfalling atmospheric rivers inferred from satellite observations over the Eastern North Pacific Ocean, *Monthly Weather Review*, 2013, Vol. 141, No. 11, pp. 3757–3768.
17. Melsheimer C., Spreen G., Ye Y., Shokr M., Antarctic sea ice types from active and passive microwave remote sensing: preprint, *Cryosphere: Discussion*, 2022, 23 p., https://doi.org/10.5194/tc-2021-381.
18. Meyer H., Katurji M., Appelhans T., Müller M. U., Nauss T., Roudier P., Zawar-Reza P., Mapping daily air temperature for Antarctica based on MODIS LST, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, Issue 9, Art. No. 732, DOI: 10.3390/rs8090732.
19. Mitnik L. M., Mitnik M. L., Zabolotskikh E. V., Microwave sensing of the atmosphere-ocean system with ADEOS-II AMSR and Aqua AMSR-E, *J. Remote Sensing Society of Japan*, 2009, Vol. 29, No. 1, pp. 156–165.
20. Mitnik L., Kuleshov V., Mitnik M., Streltsov A. M., Cherniavsky G., Cherny I., Microwave scanner sounder MTVZA-GY on new Russian meteorological satellite Meteor-M No. 2: modeling, calibration and measurements, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 3036–3045, https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2695224.
21. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Baranyuk A. V., Passive microwave observations of South America and surrounding oceans from Russian Meteor-M No. 2 and Japan GCOM-W1 satellites, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, Vol. 39, No. 13, pp. 4513–4530, DOI: 10.1080/01431161.2018.1425569.
22. Mitnik L., Kuleshov V., Panfilova M., Karaev V., Mitnik M., Baranyuk A., Satellite study of atmospheric cyclones and rivers around Antarctica, *Proc. IGARSS*, 2021, pp. 7071–7074, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553258.
23. Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L., Chernyavski G. M., Cherny I. V., Streltsov A. M., Microwave radiometer MTVZA-GY on new Russian satellite Meteor-M No. 2-2 and sudden stratospheric warming over Antarctica, *IEEE J. Selected Topics of Applied Remote Sensing*, 2022, Vol. 15, pp. 820–830, DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3133425.
24. Mo Z., Zeng Z., Huang L., Liu L., Zhou L., Huang L., Zhou L., Ren C., He H., Investigation of Antarctic precipitable water vapor variability and trend from 18 year (2001 to 2018) data of four reanalyses based on radiosonde and GNSS observations, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Issue 19, Art. No. 3901, https://doi.org/10.3390/rs13193901.
25. Moradi I., Ferraro R., Eriksson P., Weng F., Intercalibration and validation of observations from ATMS and SAPHIR microwave sounders, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2015, Vol. 53, No. 11, pp. 5915–5925.
26. Narvekar P. S., Heygster G., Jackson T. J., Bindlish R., Macelloni G., Notholt J., Passive polarimetric microwave signatures observed over Antarctica, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 3, pp. 1059–1075.
27. Pagano T. S., Chahine M. T., Fetzer E. J., The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on the NASA Aqua spacecraft: A general remote sensing tool for understanding atmospheric structure, dynamics and composition, *Proc. SPIE*, 2010, Vol. 7827, DOI: 10.1117/12.865335.
28. Payne V. H., Delamere J. S., Cady-Pereira K. E., Gamache R. R., Moncet J.-L., Mlawer E. J., Clough S. A., Air-broadened half-widths of the 22- and 183-GHz water-vapor lines, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 11, pp. 3601–3617.

29. Picard G., Royer A., Arnaud L., Fily M., Influence of meter-scale wind-formed features on the variability of the microwave brightness temperature around Dome C in Antarctica, *Cryosphere*, 2014, Vol. 8, Issue 3, pp. 1105–1119.
30. Pohl B., Favier V., Wille J., Udy D. G., Vance T. R., Pergaut J., Dutrievoz N., Blanchet J., Kittel C., Amory C., Krinner G., Gordon F., Relationship between weather regimes and atmospheric rivers in East Antarctica, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, Vol. 126, Issue 24, Art. No. e2021JD035294, https://doi.org/10.1029/2021JD035294.
31. Pope A., Wagner P., Johnson R., Shutler J. D., Baeseman J., Newman L., Community review of Southern Ocean satellite data needs, *Antarctic Science*, 2017, Vol. 29, No. 2, pp. 97–138.
32. Ricaud P., Carminati F., Courcoux Y., Pellegrini A., Attié J.-L., El Amraoui L., Abida R., Genthon C., August T., Warner J., Statistical analyses and correlation between tropospheric temperature and humidity at Dome C, Antarctica, *Antarctic Science*, 2014, Vol. 26, Issue 3, pp. 290–308.
33. Ricaud P., Grigioni P., Zbinden R., Attié J.-L., Genoni L., Galeandro A., Moggio L., Montaguti S., Petenko I., Legovini P., Review of tropospheric temperature, absolute humidity and integrated water vapour from the HAMSTRAD radiometer installed at Dome C, Antarctica, 2009–2014, *Antarctic Science*, 2015, Vol. 27, Issue 6, pp. 598–616.
34. Ricaud P., Grigioni P., Roehrig R., Durand P., Veron D. E. (2020a), Trends in atmospheric humidity and temperature above Dome C, Antarctica evaluated from observations and reanalyses, *Atmosphere*, 2020, Vol. 11, Issue 8, Art. No. 836, https://doi.org/10.3390/atmos11080836.
35. Ricaud P., Del Guasta M., Bazile E., Azouz N., Lupi A., Durand P., Attié J.-L., Veron D., Guidard V., Grigioni P. (2020b), Supercooled liquid water cloud observed, analysed, and modelled at the top of the planetary boundary layer above Dome C, Antarctica, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, Vol. 20, pp. 4167–4191.
36. Sims G., Ashley M. C. B., Cui X., Everett J. R., Feng L. L., Gong X., Hengst S., Hu Z., Kulesa C., Lawrence J. S., Luong-Van D. M., Ricaud P., Shang Z., Storey J. W. V., Wang L., Yang H., Yang J., Zhou X., Zhu Z., Precipitable water vapor above Dome A, Antarctica, determined from diffuse optical sky spectra, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, Vol. 124, pp. 74–83.
37. Surdyk S., Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica: An analytical approach, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 80, No. 2, pp. 256–271.
38. Turner J., Lu H., King J. C., Carpentier S., Lazzara M., Phillips T., Wille J., An extreme high temperature event in coastal East Antarctica associated with an atmospheric river and record summer downslope winds, *Geophysical Research Letters*, 2022, Vol. 49, Art. No. e2021GL097108, https://doi.org/10.1029/2021GL097108.
39. Ye H., Fetzer E. J., Bromwich D. H., Fishbein E. F., Olsen E. T., Granger S. L., Lee S.-Y., Chen L., Lambrigtsen B. H., Atmospheric total precipitable water from AIRS and ECMWF during Antarctic summer, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, Art. No. L19701, DOI: 10.1029/2006GL028547.