
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ**

**АНАЛИЗ СЕЗОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЯРКОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ЛЕДОВОГО ЩИТА АНТАРКТИДЫ ПО МИКРОВОЛНОВЫМ
СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

© 2019 г. В. В. Тихонов^{1,2*}, М. Д. Раев¹, И. В. Хвостов³, Д. А. Боярский¹, А. Н. Романов³,
Е. А. Шарков¹, Н. Ю. Комарова¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва*

² *Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный*

³ *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул*

*E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 25.07.2018 г.

В работе представлен анализ сезонных зависимостей яркостной температуры различных областей Антарктиды по данным радиометров MIRAS (спутник SMOS) и SSMIS (спутники серии DMSP). В качестве региона исследования выбрана Земля Королевы Мод, включающая в себя основные зоны Антарктиды: купол, зону стоковых ветров и прибрежную зону. Рассмотрена взаимосвязь временной динамики яркостной температуры от изменения климатических характеристик регионов. Выявлены основные факторы, влияющие на изменение яркостной температуры в разных областях ледникового щита Антарктиды.

Ключевые слова: спутниковая микроволновая радиометрия, яркостная температура, Антарктида, глубина формирования излучения, климатические характеристики

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019114-28>

ВВЕДЕНИЕ

Антарктида является составной частью климатической системы Земли и, в значительной степени, индикатором глобальных климатических процессов. Изменение климата в Антарктиде может привести к существенному изменению в массовом балансе ледников и, — как следствие этого, — изменению уровня мирового океана (Котляков, 2000). Большая протяженность территории Антарктиды, сложный географический ландшафт и суровый климат делают проведение полевых исследований очень сложными, дорогостоящими и во многих случаях невозможными. Учитывая эти факторы, а также крайне разреженную сеть антарктических научных станций, значительная часть которых расположена в прибрежных районах (Antarctic, 2017), большое значение приобретают дистанционные методы исследования антарктического материка (Lubin, Massom, 2007). Эти методы применяются для анализа снегонакопления, баланса массы ледника, изменения границ континента и пр. (Williams et al., 1995; Ferrigno et al., 1998). Начиная с 1999 г., международный проект GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) проводит непрерывный мониторинг состояния ледников во всем мире, используя данные различных диапазонов (Kieffer et al., 2000).

Несмотря на большое пространственное разрешение, данные пассивного микроволнового зондирования также играют значительную роль при изучении Антарктиды, поскольку их результаты не зависят от погодных условий, и они обладают хорошим и регулярным временным разрешением (Das et al., 2002; Shuman, Comiso, 2002).

Исследование Антарктиды с помощью спутниковой микроволновой радиометрии было начато 23 сентября 1968 г. с выводением на орбиту Земли советского спутника «Космос-243». На спутнике был размещен четырехканальный радиометр, принимающий излучение в надир на длинах волн 0.8, 1.35, 3.4 и 8.5 см. На спутнике был установлен также узкополосный приемник инфракрасного (ИК) излучения, работающий в диапазоне 10–11 мкм в том же телесном угле, что и антенны радиометров. Наклон орбиты спутника к экватору составлял 71.3° град, что позволяло обследовать полярные районы вплоть до 71° широты. Небольшая высота орбиты (перигей 210, апогей 319 км) обеспечивала пространственное разрешение в несколько десятков километров на поверхности Земли. Информация записывалась в запоминающее устройство и по команде передавалась на Землю по радиотелеметрической линии при прохождении спутника над территорией СССР (Башаринов, Гурвич, 1970; Гурвич, Кутуза, 2010). Этот

космический эксперимент был повторен в 1970 г. на искусственном спутнике Земли «Космос-384». Полученные со спутника «Космос-243» данные позволили выявить четко выраженный минимум яркостной температуры на волне 3.4 см для шельфовых ледников и на более коротких волнах — для материковых ледников Антарктиды. Наличие этих минимумов было объяснено рассеянием излучения на неоднородностях среды (ледяные корки, ледяные гранулы и т.п.). Это предположение было подтверждено модельными расчетами (Гурвич и др., 1973).

В настоящее время данные пассивного микроволнового зондирования применяются для определения температуры поверхности антарктического ледника (van der Veen, Jezek, 1993; Das et al., 2002), свойств снега и фирна (West et al., 1996; Shuman, Comiso, 2002), выявления зон поверхностного таяния (Ridley, 1993; Zwally, Fiegles, 1994), а также для оценки скорости накопления снега (Zwally, Giovinetto, 1995; Arthern et al., 2006). С развитием методов спутниковой микроволновой радиометрии в последнее время начались исследования вариаций яркостной температуры ледового щита Антарктиды в низкочастотном диапазоне (1.4 ГГц) (Macelloni et al., 2013, 2014). Однако большинство применяемых методов основано на эмпирических соотношениях между яркостной температурой и плотностью снежно-фирновых слоев, размером зерен фирна и снега, а также скоростью снегонакопления (Zwally, Giovinetto, 1995; Arthern et al., 2006).

Для интерпретации данных спутниковой микроволновой радиометрии ледника Антарктиды (определения снегонакопления, зон таяния, структуры фирна и т.п.) необходима однозначная связь вариаций яркостной температуры с изменениями структуры и физических характеристик поверхностных снежно-фирновых слоев (Koenig et al., 2007; Picard et al., 2009). Существует целый ряд моделей, описывающих взаимодействие микроволнового излучения со снежно-фирновой средой поверхностного слоя ледникового покрова Антарктиды (Zwally, 1977; Chang et al., 1980; van der Veen, Jezek, 1993; Picard et al., 2009; Leduc-Leballeur et al., 2015). Однако теоретические расчеты не всегда соответствуют спутниковым измерениям, что связано со сложностью учета в моделях всех факторов (температура, слоистость, размер ледяных зерен, плотность, рассеяние Ми и т.д.), влияющих на изменение яркостной температуры поверхности (Bingham, Drinkwater, 2000; Chang et al., 1980; Koenig et al., 2007; Picard et al., 2009).

В работе (Тихонов и др., 2017) была представлена электродинамическая модель собственного

микроволнового излучения системы «ледниково-ый покров—снежно-фирновые слои—атмосфера». Модель была адаптирована к реальной снежно-фирновой толще Антарктиды. В ней учитывались: слоистость и структурные особенности снежно-фирновых слоев (ледяные корки, плотность, средний размер ледяных гранул, дисперсия их размеров, влажность и т.п.), а также эффекты рассеяния (рассеяние Ми) микроволнового излучения на ледяных частицах. Сравнение теоретических расчетов яркостной температуры различных областей Антарктиды (купол, зона стоковых ветров, прибрежная зона) с данными радиометра SSMIS показало работоспособность предложенной модели. При вычислениях в качестве входных параметров модели (температура воздуха и физико-структурные характеристики слоев) были использованы данные Шведско-Японской экспедиции 2007–2008 гг., проводившейся по обширной территории Земли Королевы Мод (Sugiyama et al., 2010; Sugiyama et al., 2012). Проведенные теоретические исследования выявили необходимость более тщательного анализа зависимости собственного микроволнового излучения от изменений климатических характеристик (температуры воздуха, атмосферного давления, осадков и т.п.) для различных областей Антарктиды. В данной статье приводятся результаты такого анализа за период 2012–2013 гг.

РЕГИОН ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве региона исследования была выбрана Земля Королевы Мод. Для привязки выбраны точки маршрута Шведско-Японской экспедиции 2007–2008 гг. (Sugiyama et al., 2010; Sugiyama et al., 2012), которые использовались при сравнении модельных расчетов со спутниковыми данными (Тихонов и др., 2017). Область проведения этой

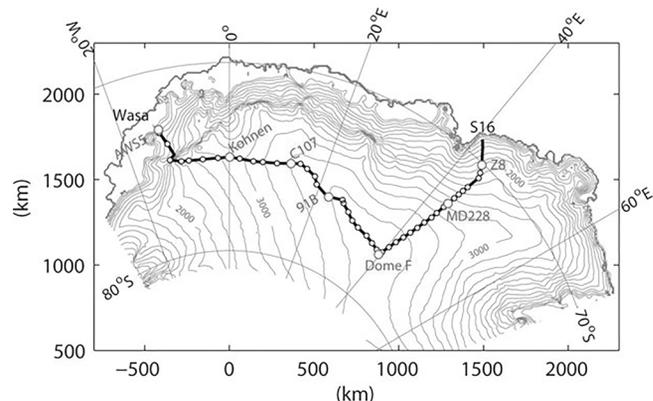


Рис. 1. Район и маршрут проведения Шведско-Японской экспедиции 2007–2008 гг. Точками указаны места исследований структуры слоев (Sugiyama et al., 2012).

экспедиции и маршрут показаны на рис. 1. В таблице представлены координаты центра и высота над уровнем моря областей, по которым исследовалась динамика яркостных температур.

Таблица. Характеристики исследуемых областей

Место	Широта	Долгота	Высота, м	Зона
S16	69.03°S	40.05°E	589	Прибрежная зона
Z8	70.08°S	43.24°E	1991	Зона стоковых ветров
MD228	72.79°S	43.52°E	2960	То же
Dome F	77.32°S	39.70°E	3800	Купол
AWS5	73.11°S	13.17°W	365	Прибрежная зона

Названа область в честь норвежской королевы Мод (Maud Charlotte Mary Victoria). Это обширная территория на атлантическом побережье Антарктиды, занимающая сектор между 20° западной и 45° восточной долготы. Площадь ее составляет около 2.5 млн. км². Поверхность ледникового покрова поднимается на юге до 3500 м. В прибрежной полосе отдельные горные хребты и вершины возвышаются над поверхностью ледника, достигая высоты 3000 м и более. Данный регион включает в себя все Антарктические зоны: купол, зону стоковых ветров и прибрежную зону. Территория Земли Королевы Мод омывается морями Уэдделла, Лазарева, Рисер-Ларсена и Космонавтов (Котляков, 2006; Herzfeld, 2004; Stewart, 2011). В регионе работают научные станции: Новолазаревская (Россия), Georg-von-Neumayer (Германия), Dakshin Gangotri (Индия), SANAE (ЮАР), Syowa и Dome F (Япония) и др. (Antarctic, 2017). В районе постоянно проводятся научно-исследовательские экспедиции (Karkas et al., 2005; Sato, Hirasawa, 2007; Sugiyama et al., 2010; Sugiyama et al., 2012; Gorodetskaya et al., 2015; Souverijns et al., 2018).

ДАННЫЕ

По исследуемому региону имеется достаточно подробная информация, — как по климатическим особенностям различных областей (Sato, Hirasawa, 2007; Gorodetskaya et al., 2015; Souverijns et al., 2018; <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/data.html>; <https://legacy.bas.ac.uk/dms/full-record.php?id=GB/NERC/BAS/PDC/00794>), так и по параметрам снежно-фирновой толщи (Karkas et al., 2005; Sugiyama et al., 2010; Sugiyama et al., 2012; Jarvinen et al., 2014; Carlsen et al., 2017).

В качестве источника спутниковой информации были использованы данные многочастотного комплекса SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder) программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) (Sun, Weng, 2008) и данные радиометра MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis), установленного на спутнике SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (Kerr et al., 2010).

Для этого была задействована база SSM/I и SSMIS изображений полярных районов POLE-RT-Fields, созданная на основе разработанной в отделе «Исследование Земли из космоса» ИКИ РАН базы данных GLOBAL-RT (Ермаков и др., 2007; Sharkov, 2003). В базу входят данные непрерывных измерений, выполненных на аппаратах F10–F17 серии DMSP. Разработанный в ИКИ РАН алгоритм межвиткового и кросс-аппаратного выравнивания и дополнения позволяет на основе полосовых данных базы GLOBAL-RT сформировать по два полных глобальных радиотепловых поля Земли в сутки (с использованием данных всех аппаратов серии DMSP для заполнения лагун). База данных POLE-RT-Fields включает в себя радиотепловые поля Северной и Южной полярной шапок Земли — от широты 85° до широты 60° за период с 1995 г. по настоящее время на частотах 19.35, 22.24, 37.00 и 85.5 ГГц (91.655 ГГц для SSMIS). Для обработки использованы исходные данные в виде яркостных температур, получаемых многочастотными комплексами SSM/I и SSMIS. Эти данные предоставлены организацией The National Snow and Ice Data Center для свободного доступа на сайте <http://sidacs.colorado.edu/pub/datasets/>. Данные представлены в полярной системе координат, отдельно для Северного полушария, отдельно — для Южного. Разрешение для высокочастотных каналов 85 (91) ГГц — 12.5 км, для частотных каналов 19–37 ГГц — 25 км.

Радиометр MIRAS производит измерения на частоте 1.41 ГГц при углах зондирования от 0° до 65° на вертикальной и горизонтальной поляризации не реже двух раз в сутки. Непрерывный архив данных за период с 2012 г. по настоящее время хранится на серверах космического агентства ESA и доступен по подписке. В работе использованы значения яркостной температуры при угле зондирования 42.5° с пространственным разрешением 35 км × 50 км и заявленной разработчиком погрешностью не более 5 К. Данные извлечены из продукта L1C SMOS версии v620 (Gutierrez et al., 2014), привязаны к дискретной гексагональной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 (Sahr et al., 2003) с линейным размером ячейки 15 км.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Использование диапазона радиометра MIRAS было обусловлено тем, что он разрешает «заглянуть» вглубь снежно-фирновой толщи. В этом диапазоне глубина формирования излучения значительно больше, что позволяет принимать излучение от более глубоких (по сравнению с SSMIS) слоев. Глубина формирования излучения (penetration depth) — это толщина слоя среды, при котором амплитуда электромагнитной волны, проходящая через слой, уменьшается в e раз. Считается, что глубина формирования излучения определяет толщину эффективно излучающего слоя среды. Она вычисляется из следующего выражения (Sharkov, 2003):

$$h_{PD} = \frac{\lambda}{4\pi \text{Im}(\sqrt{\epsilon})},$$

где λ — длина волны излучения, а ϵ — комплексная диэлектрическая проницаемость среды.

На рис. 2 представлены результаты расчета глубины формирования излучения для снега с плотностью 0.3 и для фирна с плотностью 0.7 г/см³. Расчет проводился для температуры -20°C по двум моделям, позволяющим определить эффективную диэлектрическую проницаемость дисперсной среды, каковыми являются снег и фирн. Первая модель — модель Polder-van Santen (PVSM)

(Polder and van Santen, 1946). Она позволяет вычислить эффективную диэлектрическую проницаемость дисперсной среды в электростатическом приближении, т.е. тогда, когда можно пренебречь эффектами рассеяния излучения на структурных неоднородностях среды (в данном случае ледяные зерна). Вторая — квазиволновая модель (QWM), разработанная авторами статьи (Boyarskii et al., 1994; Tikhonov et al., 2014). В этой модели эффекты рассеяния электромагнитного излучения на структурных неоднородностях среды рассчитываются по теории Ми (Борен, Хафмен, 1986). Вертикальными пунктирными линиями на рисунке показаны частоты приборов MIRAS и SSMIS. Для наглядности на нем также показана частотная зависимость глубины формирования излучения для сплошного пресноводного льда. Из рисунка видно, что, при теоретическом моделировании собственного излучения снежно-фирновых слоев, для частот радиометра SSMIS необходимо учитывать рассеяние излучения на ледяных зернах. Разница глубины формирования излучения для модели с учетом рассеяния и без учета (QWM и PVSM соответственно), составляет несколько порядков. Для частоты радиометра MIRAS рассеяние излучения не существенно и его можно не учитывать. Точно определить глубину формирования излучения для снежно-фирновых слоев практически невозможно, так как каждый слой имеет свои толщину и физические и структурные характеристики. Однако, используя рис. 2, можно качественно рассмотреть, какая толщина слоя снежно-фирнового покрова эффективно излучает на данной частоте. Так, для частот прибора SSMIS на частоте 91.655 ГГц эта толщина составляет несколько миллиметров, на частоте 37 ГГц — несколько сантиметров, на частотах 19.35 и 22.24 ГГц — несколько десятков сантиметров. Для частоты 1.4 ГГц (MIRAS) толщина эффективно излучающего слоя составляет величину несколько сотен метров. Таким образом, используя несколько диапазонов можно отслеживать изменения, происходящие в различных по глубине снежно-фирновых слоях.

SSMIS

На рис. 3 показана динамика яркостных температур снежно-фирнового покрова выбранных областей (см. табл.) для всех частот SSMIS (19.35, 22.24, 37, 91.655 ГГц), а также температуры воздуха за период 2012–2013 гг. Анализ рисунков показывает, что динамика яркостных температур всех областей для всех частот в большей или меньшей степени соответствует динамике температуры

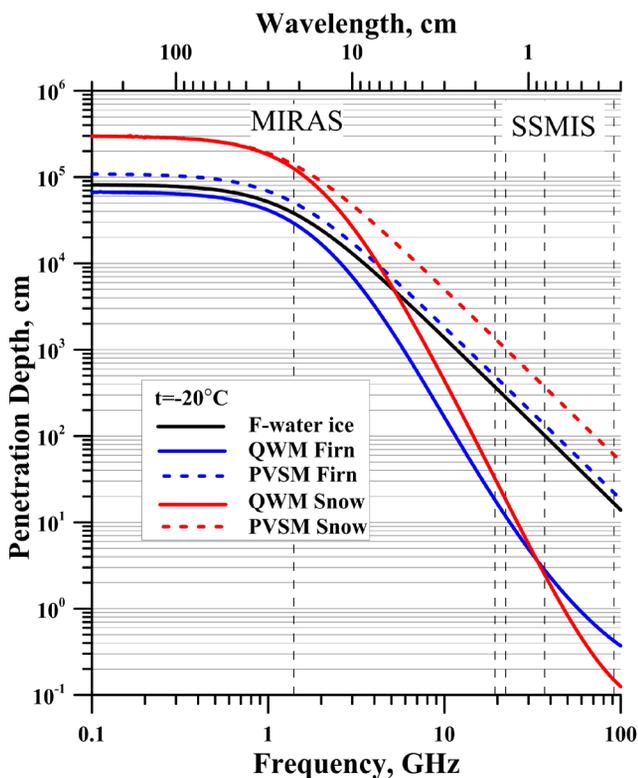


Рис. 2. Глубина формирования излучения.

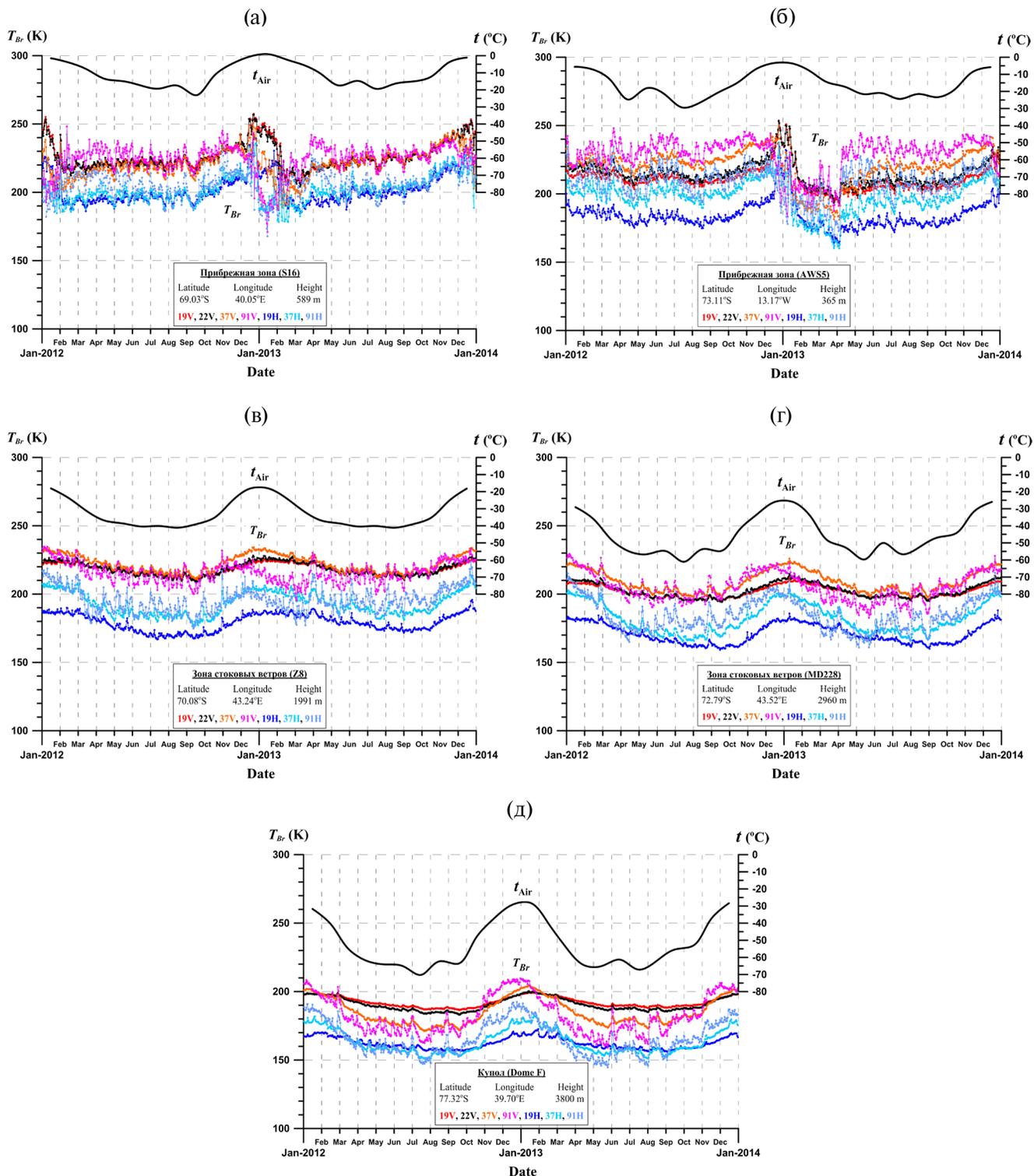


Рис. 3. Динамика температуры воздуха и яркостной температуры областей Земли Королевы Мод для частот SSMIS (19.35, 22.24, 37, 91.655 ГГц вертикальной и горизонтальной поляризации).

воздуха. В большей степени это относится к областям с более холодным и устойчивым климатом (рис. 3 в–д). Причем, чем меньше частота

излучения, тем сильнее проявляется соответствие. Объясняется это тем, что на более высоких частотах принимается излучение с поверхностных

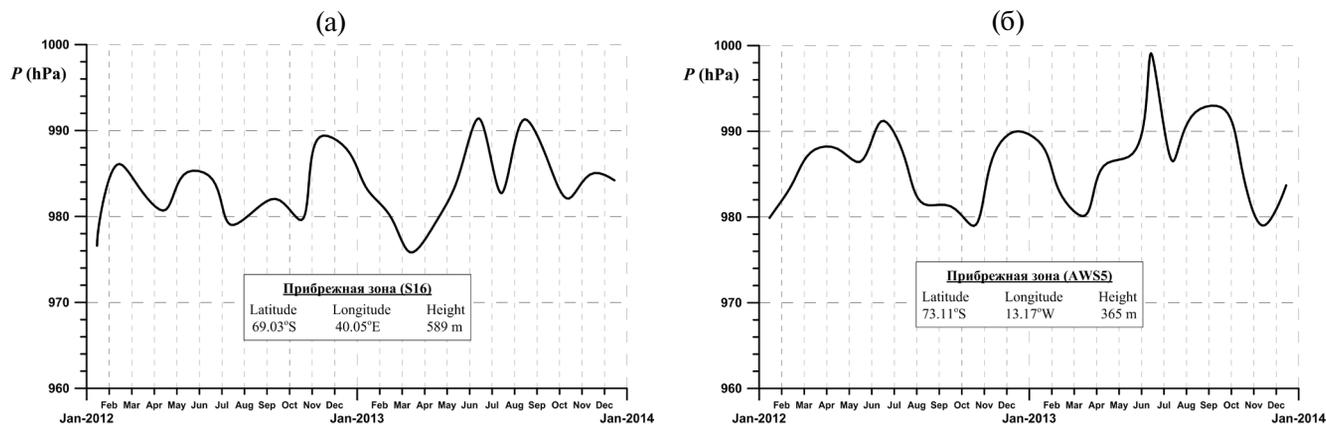


Рис. 4. Динамика атмосферного давления прибрежных зон Земли Королевы Мод.

слоев снежно-фирновой толщи (см. рис. 2). Верхние слои сильнее подвержены различным локальным климатическим изменениям (температура, осадки, ветровой перенос снега и т.п.). Этим объясняется и более стабильный сезонный ход (без «всплесков») яркостной температуры на частотах 19 и 22 ГГц по сравнению с другими частотами. Хорошо прослеживается инерция изменения яркостной температуры на различных частотах при изменении температуры воздуха. Первой на изменение температуры воздуха «реагирует» самая высокая частота (91.655 ГГц), поскольку это излучение соответствует самому верхнему слою (несколько мм). Далее происходит изменение яркостной температуры на частоте 37 ГГц, и только потом на частоте 19 ГГц.

Динамика яркостной температуры прибрежной зоны (рис. 3 а, б) нестабильна, хотя зависимость от изменения температуры воздуха также прослеживается. Прибрежная зона подвержена более резким климатическим изменениям из-за близости океана. Помимо этого, климат в прибрежной зоне более теплый (см. рис. 3 а, б). Здесь в летнее время бывают температуры воздуха около 0° и выше, что вызывает таяние снега и соответственно резкое изменение яркостной температуры (Tedesco, 2015). Количество осадков, выпадающих в прибрежной зоне значительно больше, чем в зоне стоковых ветров и на куполе (Котляков, 2000), что также может повлиять на изменение яркостной температуры. Особый интерес вызвал сильный «провал», начиная с января по апрель месяц 2013 г. и последующий резкий «подъем» яркостных температур на всех частотах в обеих прибрежных зонах, (рис. 3а, б). Этот провал никак не связан с изменением температуры воздуха в этот же период (рис. 3а, б). Для объяснения такого резкого и достаточно длительного понижения яркостной температуры с последующим

быстрым ее возрастанием была рассмотрена динамика других климатических характеристик этих регионов, а именно изменения атмосферного давления, скорости и направления ветра.

Анализ динамики атмосферного давления (рис. 4) показал, что область сильного понижения яркостной температуры в январе-апреле соответствует области понижения атмосферного давления, т.е. приходу циклона и соответственно выпадению осадков (снега). Однако другие области пониженного давления не вызвали такого резкого спада яркостной температуры.

На рис. 5 показана динамика скорости ветра (рис. 5 а, б) и его направления (рис. 5 в, г) в двух рассматриваемых прибрежных зонах. Скорость ветра выражена в узлах ($1 \text{ узел} = 0.514 \text{ м/с}$). Анализ изменения скорости ветра (рис. 5 а, б) показал, что она в период резкого падения яркостной температуры увеличивалась в обоих районах. Этот факт согласуется с данными о падении давления (приходом циклона), однако в другие периоды, увеличение скорости ветра не вызывало такого сильного понижения яркостной температуры. Анализ изменения направления ветра (рис. 5 в, г) не выявил какой-либо корреляции с изменением яркостной температуры.

Для более наглядного представления на рис. 6 показана роза ветров двух рассматриваемых областей прибрежных зон. Из рисунка видно, что для района S16 направление ветра на протяжении двух лет практически ограничивалось сектором в 40° . Ветер все время дул со стороны океана (см. рис. 1). Напротив, в районе AWS5 направление ветра практически всегда было с материка (см. рис. 1). Таким образом, обнаружить корреляцию направления ветра и сильного понижения яркостной температуры в январе-апреле 2013 г. не удалось.

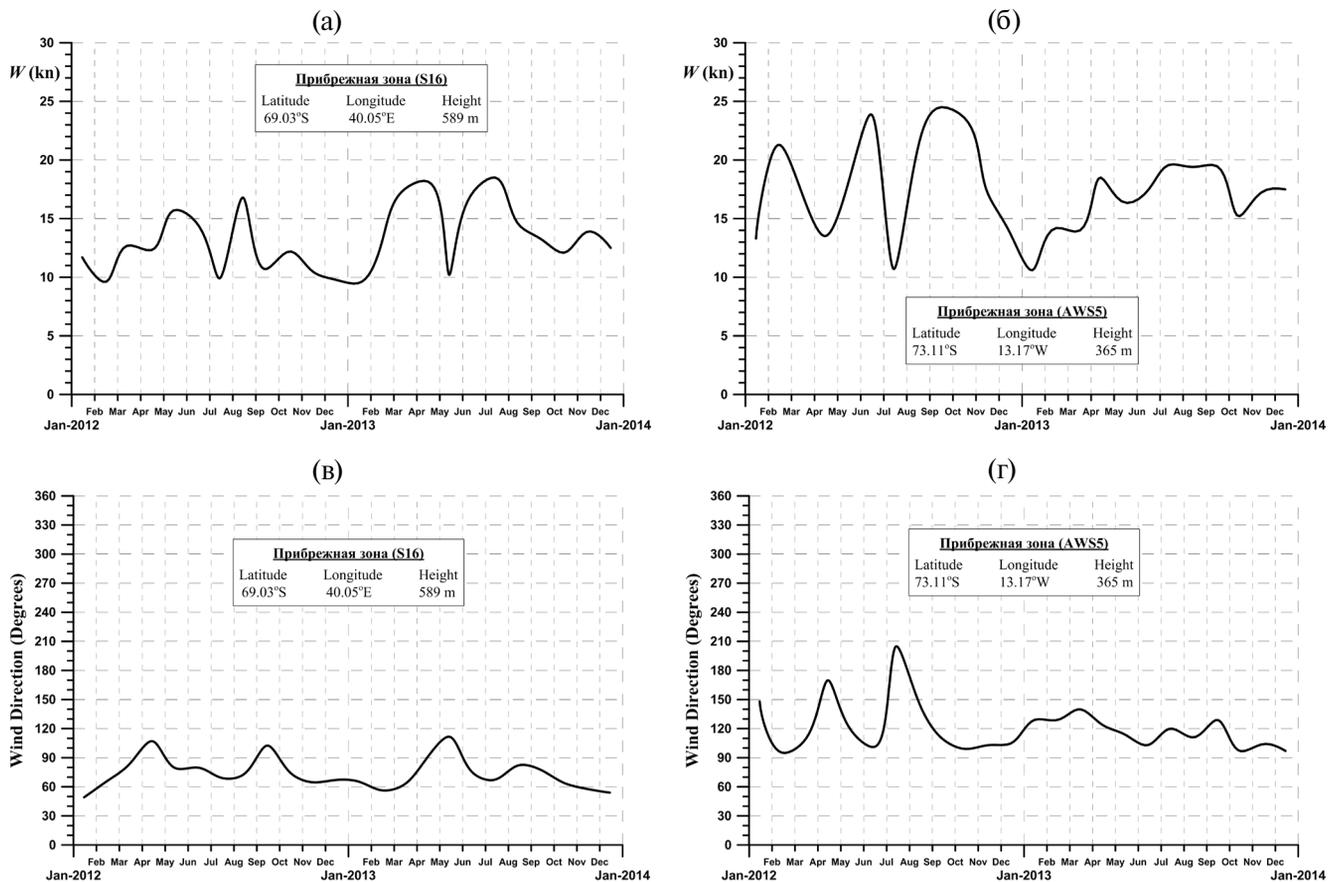


Рис. 5. Динамика скорости ветра в узлах (а), (б) и направления ветра (в), (г) прибрежных зон Земли Королевы Мод.

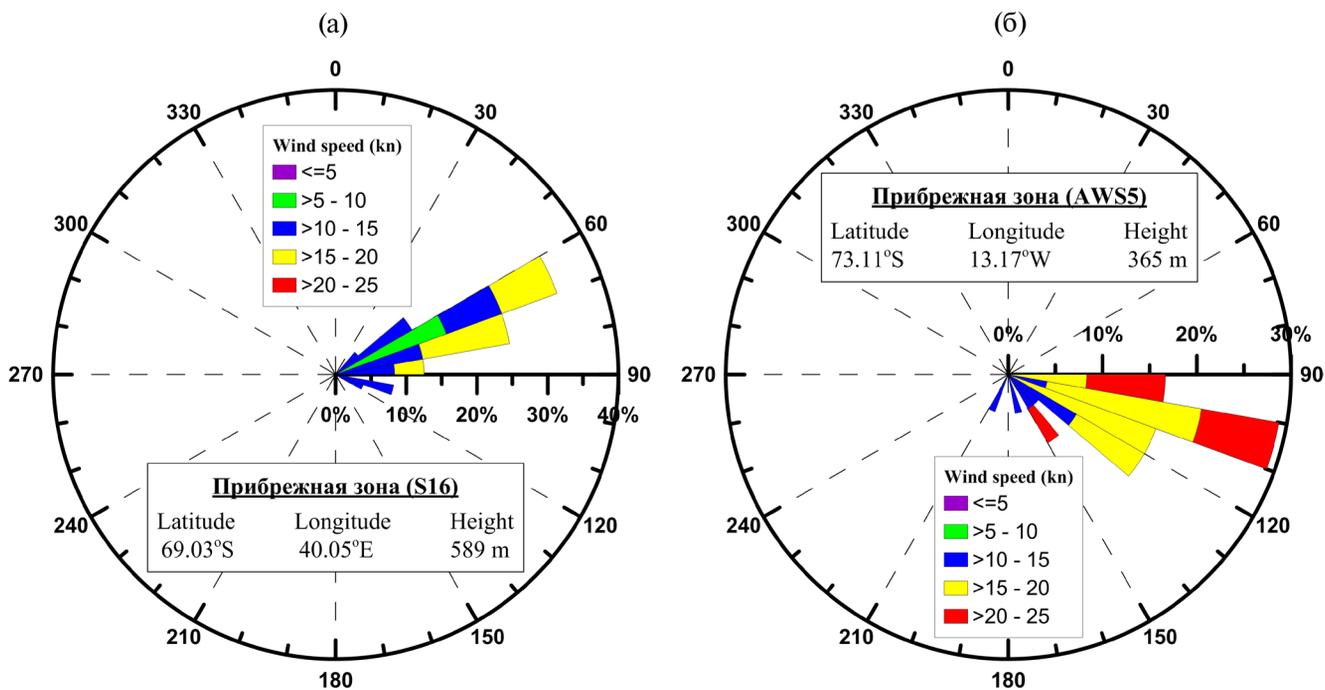


Рис. 6. Роза ветров прибрежных зон Земли Королевы Мод.

Провести достаточно подробный анализ соответствия динамики яркостной температуры и осадков для различных областей и зон, к сожалению, не удалось. Измерение осадков в Антарктиде очень сложный и трудоемкий процесс, который не всегда удается выполнить однозначно. Помимо выпадения осадков из атмосферы, как правило, снега, большое значение имеет его ветровой перенос (Котляков, 2000). Очень часто бывает невозможно отделить одно накопление снега от другого (Gorodetskaya et al., 2015). Обнаруженные среднестатистические данные по выпадению осадков в области S16 прибрежной зоны (рис. 7) показывают полное соответствие возрастания осадков приходу циклона (понижению давления) и усилению ветра в рассматриваемом временном промежутке (январь–апрель 2013 г.), когда произошло сильное падение яркостной температуры (сравн. с рис. 3 а, б; рис. 4; рис. 5 а, б).

Однако само выпадение снега не может быть связано с понижением яркостной температуры, наоборот появление свежеснежавшего снежного покрова должно вызвать ее повышение (Tikhonov et al., 2013; Tikhonov et al., 2014), что и происходит в апреле, когда выпадает достаточное количество снега (сравн. рис. 3 а, б и рис. 7). Вероятнее всего, такое сильное понижение яркостной температуры связано с таянием снега в летний период и появлением поверхности влажного грунта (Боярский, Тихонов, 2003). Две рассматриваемые области S16 и AWS5 расположены рядом с антарктическими станциями Syowa (Япония) и Wasa (Швеция) соответственно. В летнее время на этих станциях в некоторых местах сходит снежный покров и оголяется грунт (Antarctic, 2017). Далее циклон принес сильный снегопад, который и вызвал резкое повышение яркостной температуры сначала для частоты 91 ГГц, когда толщина снега превысила глубину формирования излучения для этого

диапазона (несколько мм — см. рис. 2). В дальнейшем, по мере увеличения толщины снежного покрова стали повышаться яркостные температуры и других диапазонов, сначала 37, а потом и 19 ГГц.

Еще один фактор, который мог оказать влияние на столь сильное (порядка 50 К) и продолжительное (более месяца) изменение яркостной температуры, это близость океана. Размер пятна радиометра SSMIS на поверхности Земли зависит от диапазона и составляет величину от 16 км × 14 км на частоте 91.655 ГГц до 70 км × 45 км на частоте 19.35 ГГц (Гранков, Мильшин, 2004). Вполне вероятно, что часть пятна радиометра попала в область океана. В данном регионе в этот период (январь–март) морской лед начинает таять и на нем образуются снежицы (области мокрого снега и талой воды). В этом случае яркостная температура исследуемого региона могла сильно понизиться за счет собственного излучения снежиц, или открытой водной поверхности. Подтверждением этого служит рис. 8, на котором показана сплоченность морского льда Южного океана (рис. 8 а, в) и удельная площадь снежиц на поверхности льда (рис. 8 б, г) в 2013 г., вычисленные по алгоритму VASIA2 (Tikhonov et al., 2015). Из рисунков видно, что в феврале месяце в районе S16 и AWS5 океан практически полностью освобождается ото льда, а оставшийся лед покрыт снежицами (рис. 8 а, б). В апреле месяце в данных областях, вдоль берега, уже наблюдается достаточно сплоченный лед, а снежицы практически отсутствуют (рис. 8 в, г).

Также влияние на изменение яркостной температуры прибрежных зон в рассматриваемый период мог оказать эффект, описанный в работе (Бордонский и др., 2014). Согласно этим исследованиям, при температурах, близких к 0°C, во льду возникает уменьшение электромагнитных потерь до нескольких десятков процентов, связанное с возникновением течения среды под действием внутренних механических напряжений. Из-за этого эффекта (уменьшение электромагнитных потерь) в январе месяце происходит возрастание яркостной температуры, а затем, по мере таяния поверхностного слоя ледника, — ее падение (рис. 3 а, б). Далее выпадение снежного покрова приведет к повышению яркостной температуры.

Вероятнее всего, на обнаруженное сильное понижение яркостной температуры с последующим резким ее ростом оказывает влияние три предложенных фактора.

Резкие кратковременные всплески (вверх и вниз) яркостной температуры для всех областей и на всех частотах, связаны, скорее всего, с локальными погодными изменениями (изменение температуры,

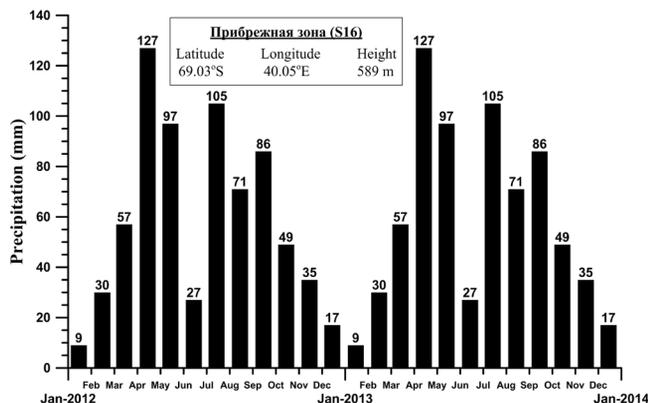


Рис. 7. Среднестатистическая динамика выпадения осадков в области S16 прибрежной зоны Земли Королевы Мод.

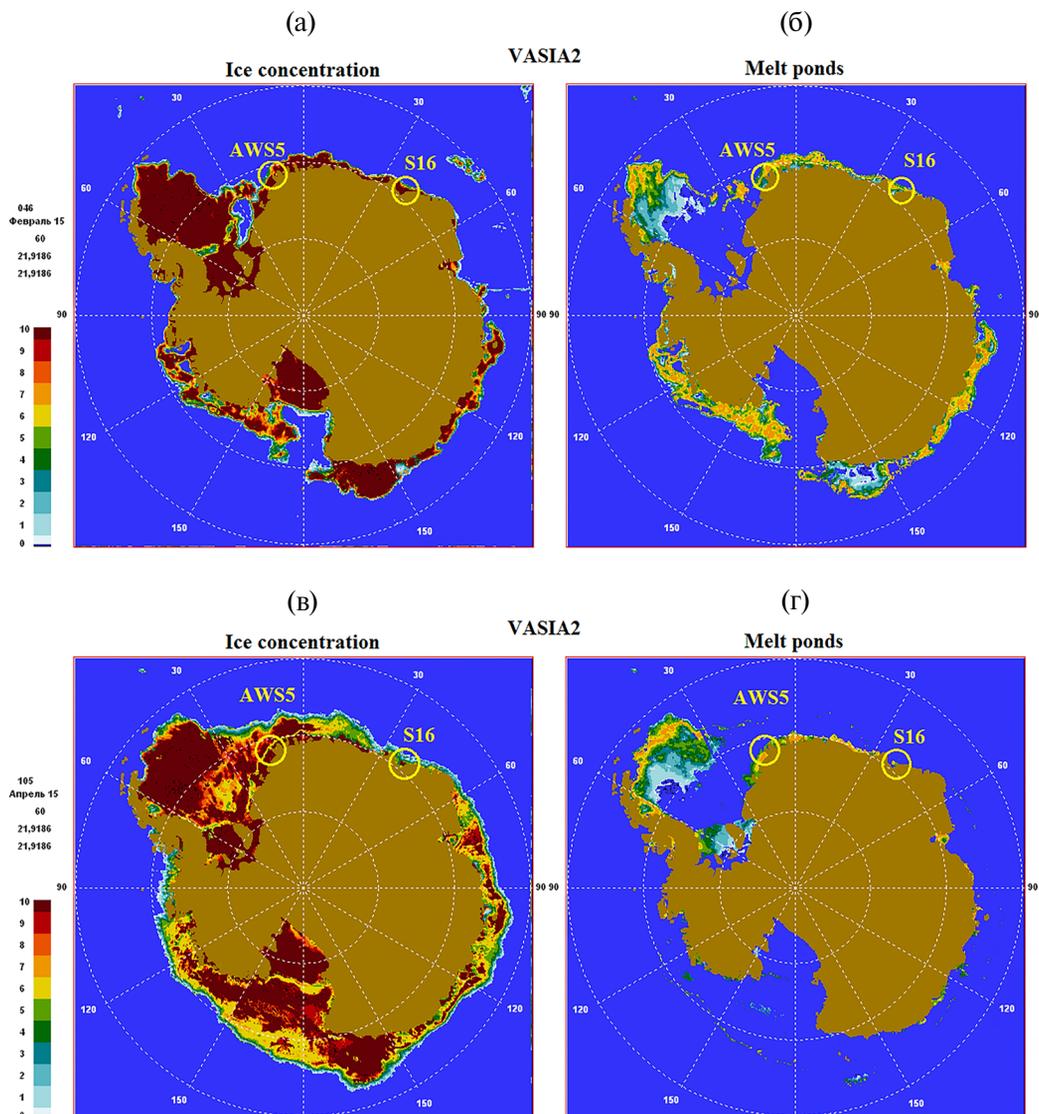


Рис. 8. Сплоченность морского льда Южного океана (а), (в) и удельная площадь снежниц на поверхности льда (б), (г), вычисленные по алгоритму VASIA2.

ветра, осадки, ветровой перенос снега). Причем наиболее чувствительным к таким локальным изменениям является канал 91 ГГц, так как он отражает состояние тонкого поверхностного слоя снежно-фирновой толщи.

MIRAS

Был выполнен анализ сезонной и межгодовой (2012–2013 гг.) динамики яркостных температур снежно-фирновых слоев тех же областей Антарктиды по данным радиометра MIRAS (1.4 ГГц) спутника SMOS (рис. 9). Как уже отмечалось, глубина формирования излучения снежно-фирновой толщи для данной частоты составляет величину порядка нескольких сотен метров (см. рис. 2). На такой глубине какие-либо сезонные изменения метеоусловий не

должны чувствоваться. Это и подтверждает рис. 9. Для купола и зоны стоковых ветров (рис. 9 в–д), где толщина льда превышает величину 2 км (Котляков, 2000), не наблюдается никаких сезонных и межгодовых изменений яркостной температуры. Яркостная температура в этих зонах постоянна в пределах, заявленной авторами продукта LIC SMOS ошибки (5K). На такой глубине (несколько сот метров) работает своего рода «холодильник», поддерживающий постоянную физическую температуру в течение всего года. В данном случае величина яркостной температуры зависит только от термодинамической температуры глубоких слоев, которая определяется высотностью области. Чем выше область, тем холоднее, тем ниже термодинамическая температура глубоких слоев и соответственно ниже яркостная

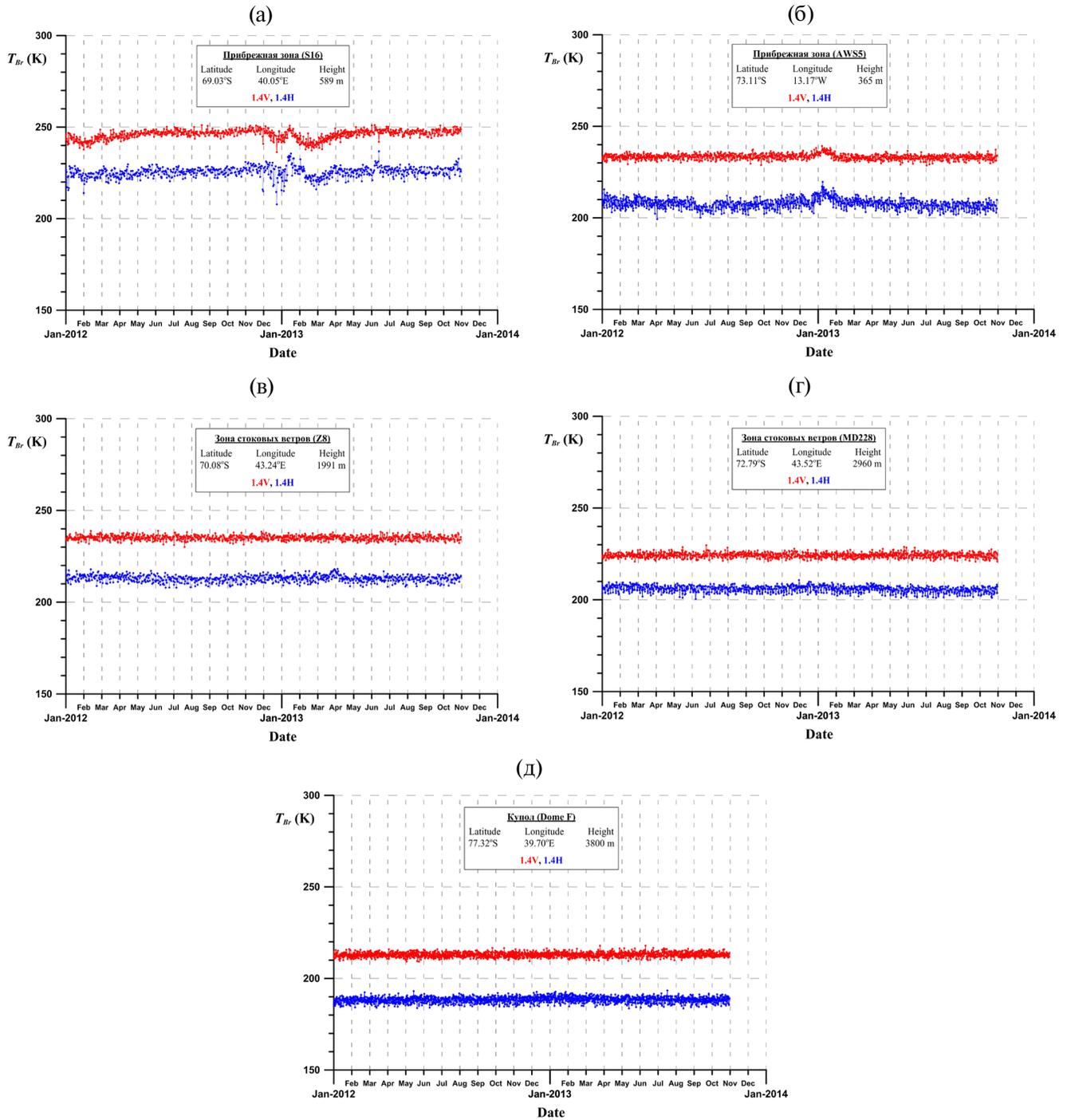


Рис. 9. Динамика яркостной температуры областей Земли Королевы Мод для частоты MIRAS (1.4 ГГц вертикальная и горизонтальная поляризация).

температура области. Для зоны стоковых ветров яркостная температура выше для области Z8, чем для области MD228, которая расположена на 1000 м выше области Z8 (рис. 9 в, г). Небольшая динамика яркостной температуры наблюдается в прибрежной зоне (рис. 9 а, б). Она связана с тем, что толщина ледникового покрова в некоторых участках

области пятна радиометра, может быть меньше глубины формирования излучения. В этом случае радиометр будет принимать излучение, как от грунта, так и от снежно-фирновой толщи. Также заметно колебание яркостной температуры в начале 2013 г., которое может быть объяснено теми же причинами, что и для прибора SSMIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена сезонная и межгодовая динамика яркостных температур снежно-фирновых слоев различных зон Антарктиды на частотах 1.4, 19.35, 22.24, 37, 91.655 ГГц. Представлен анализ сезонных изменений различных климатических характеристик исследуемых регионов (температуры воздуха, атмосферного давления, скорости ветра, направления ветра, осадков, процессов таяния, для прибрежных зон — динамики морского льда). Показано, что динамика яркостных температур всех областей для всех частот прибора SSMIS, в большей или меньшей степени, соответствует динамике температуры воздуха. На частоте 1.4 ГГц (MIRAS) какая-либо динамика яркостной температуры для внутренних материковых областей отсутствует, а величина ее определяется термодинамической температурой глубоких фирновых слоев ледникового щита. Для прибрежных зон яркостная температура на частоте 1.4 ГГц определяется процессами таяния снежного покрова и выпадением осадков. В результате проведенных исследований было обнаружено резкое понижение яркостной температуры в январе-апреле 2013 г. с последующим ее повышением на всех частотах SSMIS в обеих прибрежных зонах. Это понижение не связано с изменением температуры воздуха в этот же период. Были предложены три причины, вызывающие столь резкое понижение и последующее повышение яркостной температуры. Однако этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Накопленный материал и полученные результаты позволят выполнить теоретическое моделирование зависимости яркостной температуры снежно-фирновой толщи Антарктиды от климатических характеристик разных зон и разработать методы оценки снегонакопления по данным спутниковой микроволновой радиометрии.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16–05–00164.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башаринов А.Е., Гурвич А.С. Исследование радиоизлучения поверхности Земли и атмосферы на спутнике «Космос-243» // Вестн. АН СССР. 1970. № 10. С. 37–42.
- Бордонский Г.С., Гурулев А.А., Крылов С.Д. Электромагнитные потери пресного льда в микроволновом диапазоне при 0 °С // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 6. С. 587–592.
- Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
- Боярский Д.А., Тихонов В.В. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мерзлых почв: Препринт ИКИ РАН, Пр-2084, 2003, 48 стр.
- Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на грани раздела. М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2004. 168 с.
- Гурвич А.С., Кутуза Б.Г. «Космос-243» — первый в мире эксперимент по исследованию земли из космоса радиофизическими методами // Исслед. Земли из Космоса. 2010. № 2. С. 14–25.
- Гурвич А.С., Калинин В.И., Матвеев Д.Т. Влияние внутренней структуры ледников на их тепловое радиоизлучение // Физика атмосферы и океана. 1973. Т. IX. № 12. С. 1247–1256.
- Ермаков Д.М., Раев М.Д., Сулов А.И., Шарков Е.А. Электронная база многолетних данных глобального радиотеплового поля Земли в контексте многомасштабного исследования системы океан-атмосфера // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 1. С. 7–13.
- Котляков В.М. Избранные сочинения. Кн. 1. Гляциология Антарктиды. М.: Наука, 2000. 432 с.
- Котляков В.М. (ред.). Словарь современных географических названий. Екатеринбург: У-Фактория, 2006.
- Тихонов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Модель собственного микроволнового излучения снежно-фирновых слоев Антарктиды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 200–204.
- Antarctic station catalogue. New Zealand, Christchurch: COMNAP and contributors. 2017. 154 p.
- Arthern R.J., Winebrenner D.P., Vaughan D.G. Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. № D06107. 10 p.
- Boyaraskii D.A., Tikhonov V.V., Kleeorin N.I., Mirovskii V.G. Inclusion of scattering losses in the models of the effective permittivity of dielectric mixtures and applications to wet snow // Electromagnetic Waves and Applications. 1994. V. 8. № 11. P. 1395–1410.
- Carlsen T., Birnbaum G., Ehrlich A., Freitag J., Heygster G., Istomina L, Kipfstuhl S., Orsi A., Schafer M., Wendisch M. Comparison of different methods to retrieve optical-equivalent snow grain size in central Antarctica // Cryosphere. 2017. V. 11. P. 2727–2741.
- Chang A.T.C., Choudhury B.J., Gloersen P. Microwave Brightness of Polar Firn as Measured by Nimbus 5 and 6 ESMR // Glaciology. 1980. V. 25. № 91. P. 85–92.
- Das S.B., Alley R.B., Reusch D.B., Shuman C.A. Temperature variability at Siple Dome, West Antarctica, derived from ECMWF re-analyses, SSM/I and SMMR brightness temperatures and AWS records // Ann. Glaciol. 2002. V. 34. P. 106–112.
- Ferrigno J.G., Williams R.S., Rosanova E., Lucchitta B.K., Swithbank C. Analysis of coastal change in Marie Byrd Land and Ellsworth Land, West Antarctica, using Landsat imagery // Ann. Glaciol. 1998. V. 27. P. 33–40.
- Gorodetskaya I.V., Kneifel S., Maahn M., Tricht K., Thiery W., Schween J.H., Mangold A., Crewell S., Lipzig N.P.M. Cloud

- and precipitation properties from ground-based remote-sensing instruments in East Antarctica // *Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 285–304.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. DEIMOS Engenharia. Lisboa, Portugal. 2014. https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models
- Herzfeld U.C.* Atlas of Antarctica. Topographic Maps from Geostatistical Analysis of Satellite Radar Altimeter Data. Springer. 2004. 364 p.
- Jarvinen O., Mattila O.-P., Sinisalo A., Lepparanta M.* Snow Research in the Dronning Maud Land within the Finnish Antarctic Research Program in 1989–2014 // *Geophysica*. 2014. V. 50. № 2. P. 27–48.
- Karkas E., Martma T., Sonninen E.* Physical properties and stratigraphy of surface snow in western Dronning Maud Land, Antarctica // *Polar Res.* 2005. V. 24. № 1–2. P. 55–67.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. № 5. P. 666–687.
- Kieffer H., Kargel J.S., Barry R., et al.* New Eyes in the Sky Measure Glaciers and Ice Sheets // *Eos*. 2000. V. 81. № 24. P. 265–271.
- Koenig L.S., Steig E.J., Winebrenner D.P., Shuman C.A.* A link between microwave extinction length, firn thermal diffusivity, and accumulation rate in West Antarctica // *Geophys. Res.* 2007. V. 112. № F03018. 10 p.
- Leduc-Leballeur M., Picard G., Mialon A., Arnaud L., Lefebvre E., Possenti P., Kerr Y.* Modeling L-band brightness temperature at Dome C, Antarctica and comparison with SMOS observations. // *EEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2015. V. 53. № 7. P. 1–11.
- Lubin D., Massom R.* Remote Sensing of Earth's Polar Regions: Opportunities for Computational Science // *Computing in Science & Engineering*. 2007. V. 9. № 1. P. 58–71.
- Macelloni G., Brogioni M., Pettinato S., Zasso R., Crepaz A., Zaccaria J., Padovan B., Drinkwater M.R.* Ground-Based L-Band Emission Measurements at Dome-C Antarctica: The DOME-X-2 Experiment // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2013. V. 51. № 9. P. 4718–4730.
- Macelloni G., Brogioni M., Aksoy M., Johnson J.T., Jezek K.C., Drinkwater M.R.* Understanding SMOS data in Antarctica // *IEEE Int. Geosci. Rem. Sens. Symp. (IGARSS)*. 2014. P. 3606–3609.
- Polder D., van Santen J.H.* The effective permeability of mixtures of solids // *Physica*. 1946. V. 12. № 5. P. 257–271.
- Picard G., Brucker L., Fily M., Gallee H., Krinner G.* Modeling time series of microwave brightness temperature in Antarctica // *Glaciology*. 2009. V. 55. № 191. P. 537–551.
- Ridley J.K.* Surface melting on Antarctic Peninsula ice shelves detected by passive microwave sensors // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. № 23. P. 2639–2642.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J.* Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. № 2. P. 121–134.
- Sato K., Hirasawa N.* Statistics of Antarctic surface meteorology based on hourly data in 1957–2007 at Syowa Station // *Polar Science*. 2007. № 1. P. 1–15.
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Springer/PRAXIS. Berlin, Heidelberg, London, New York etc. 2003.
- Shuman C.A., Comiso J.C.* In situ and satellite surface temperature records in Antarctica // *Ann. Glaciol.* 2002. V. 34. P. 113–120.
- Souvereinjs N., Gossart A., Gorodetskaya I.V., Lhermitte S., Mangold A., Laffineur Q., Delcloo A., Lipzig N.P.M.* How does the ice sheet surface mass balance relate to snowfall? Insights from a ground-based precipitation radar in East Antarctica // *Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 1987–2003.
- Stewart J.* (Ed.). Antarctica. An Encyclopedia. V. 1, 2. North Carolina: McFarland & Company Inc. Publishers. 2011. 1758 p.
- Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S.* Dielectric permittivity of snow measured along the route traversed in the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08 // *Ann. Glaciol.* 2010. V. 51. № 55. P. 9–15.
- Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S.* Snow density along the route traversed by the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08 // *Glaciology*. 2012. V. 58. № 209. P. 529–539.
- Sun N., Weng F.* Evaluation of Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) Environmental Data Records // *EEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2008. V. 46. № 4. P. 1006–1016.
- Tedesco M.* Remote sensing of the cryosphere. Oxford: JohnWiley & Sons. 2015. 404 p.
- Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Alexeeva T.A.* Snow Cover Effect on Brightness Temperature of Arctic Ice Fields Based on SSM/I Data // *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings, Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013*. P. 514–518.
- Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N. Yu.* Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean-atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions // *Progress Electromagnetics Research B*. 2014. V. 59. P. 123–133.
- Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N. Yu.* A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. № 8. P. 1578–1589.
- Van der Veen C.J., Jezek K.C.* Seasonal variations in brightness temperature for central Antarctica. // *Ann. Glaciol.* 1993. V. 17. P. 300–306.
- West R., Winebrenner D., Tsang L., Rott H.* Microwave emission from density-stratified Antarctic firn at 6 cm wavelength // *Glaciology*. 1996. V. 42. P. 63–76.

- Williams R.S., Ferrigno J.G., Swithinbank C., Lucchitta B.K., Seekins B.A.* Coastal-change and glaciological maps of Antarctica // *Ann. Glaciol.* 1995. V. 21. P. 284–290.
- Zwally H.J.* Microwave emissivity and accumulation rate of polar firn // *Glaciology.* 1977. V. 18. № 79. P. 195–215.
- Zwally H.J., Giovinetto M.B.* Accumulation in Antarctica and Greenland derived from passive-microwave data: A comparison with contoured complications // *Ann. Glaciol.* 1995. V. 21. P. 123–130.
- Zwally H.J., Fiegles S.* Extent and duration of Antarctic surface melt // *Glaciology.* 1994. V. 40. № 136. P. 463–476.

Analysis of the Seasonal Dependence of the Brightness Temperature of the Ice Sheet of Antarctica by Microwave Satellite Data

V. V. Tikhonov^{1,2*}, M. D. Raev¹, I. V. Khvostov³, D. A. Boyarskii¹, A. N. Romanov³,
E. A. Sharkov¹, N. Yu. Komarova¹

¹ *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow*

³ *Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul*

*E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

The paper presents an analysis of seasonal brightness temperature variations of different regions of Antarctica according to the data of MIRAS (SMOS satellite) and SSMIS (DMSP series satellites) radiometers. As a region of study, the Dronning Maud Land was chosen which includes the main zones of Antarctica: the dome, the zone of runoff winds and the coastal zone. The interrelation of time dynamics of brightness temperature from the change of climatic characteristics of regions is considered. The main factors influencing the change of brightness temperature in different regions of the Antarctic ice sheet are revealed.

Keywords: satellite microwave radiometry, brightness temperature, Antarctica, penetration depth, climatic characteristic

REFERENCES

- Basharinov A.E., Gurvich A.S.* Issledovanie radioizlucheniya poverkhnosti Zemli i atmosfery na sputnik "Kosmos-243" [A study of the radio emission of the atmosphere and Earth's surface to the satellite "Kosmos-243"] // *Vestnik AN USSR.* 1970. № 10. P. 37–42. (In Russian).
- Bordonskii G.S., Gurulev A.A., Krylov S.D.* Elektromagnitnyye poteri presnogo l'da v mikrovolnovom diapazone pri 0 °C [Electromagnetic loss of fresh ice in microwave range at a temperature of 0 °C] // *Radiotekhnika I Elekttonika.* 2014. T. 59. № 6. S. 536–540. (In Russian).
- Bohren C.F., Huffman D.R.* Absorption and Scattering of Light by Small Particles. N.Y.: Wiley-Interscience, 1983. 530 p.
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V.* Vliyanie svyazannoy vody na dielektricheskuyu pronitsaemost' vlazhnykh i merzlykh pochv [Influence of the Bound Water on Dielectric Permeability Wet and Frozen Soil]: Preprint IKI RAN, Pr-2084, 2003. 48 p. (In Russian).
- Grankov A.G., Mil'shin A.A.* Vzaimosvyaz radioizlucheniya sistemi okean-atmosfera s teplovimi i dinamicheskimi processami na grin razdela [The relationship of the radio emission of the ocean-atmosphere with thermal and dynamic processes on the verge of partition]. M.: FIZMATLIT, 2004. 168 p. (In Russian).
- Gurvich A.S., Kutuza B.G.* "Kosmos-243" — pervii v mire eksperiment po icledovaniyu Zemli iz kosmosa radiofizicheskimi metodami ["Kosmos-243" — the world's first experiment to study the Earth from space radiophysical methods] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2010. № 2. P. 14–25. (In Russian).
- Gurvich A.S., Kalinin V.I., Matveev D.T.* Vliyanie vnutrennej struktury lednikov na ikh teplovoe radioizluchenie [Influence of internal structure of glaciers on their thermal radio emission] // *Fizika atmosfery i okeana.* 1973. V. IX. № 12. P. 1247–1256. (In Russian).
- Ermakov D.M., Raev M.D., Suslov A.I., Sharkov E.A.* Ehlektronnaya baza mnogoletnikh dannykh global'nogo radioteplovogo polya Zemli v kontekste mnogomasshtabnogo issledovaniya sistemy okean-atmosfera [Electronic Long-Standing Database for the Global Radiothermal Field of the Earth in Context of Multy-Scale Investigation of the Atmosphere–Ocean System] // *Issled. Zemli iz kosmosa.* 2007. № 1. P. 7–13. (In Russian).
- Kotlyakov V.M.* Izbrannyye sochineniya. Kn. 1. Glyatsiologiya Antarktity [Selected works in six books. Book 1. Glaciology of Antarctica]. M.: Nauka, 2000. 432 p. (In Russian).
- Kotlyakov V.M.* (Ed.) Slovar' sovremennykh geograficheskikh nazvaniy [Dictionary of modern geographical names]. Yekaterinburg: U-Faktoriya, 2006. (In Russian).
- Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N. Yu.* Model' sobstvennogo mikrovolnovogo izlucheniya snezhno-firnovykh sloev Antarktity [A model of microwave emission of Antarctic snow-firn layers] // *Sovr. probl. dist. zondir. Zemli iz kosmosa.* 2017. V. 14. № 1. P. 200–204. (In Russian).
- Antarctic station catalogue. New Zealand. Christchurch: COMNAP and contributors, 2017. 154 p.

- Arthern R.J., Winebrenner D.P., Vaughan D.G.* Antarctic snow accumulation mapped using polarization of 4.3-cm wavelength microwave emission // *Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D06107. 10 p.
- Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Kleorin N.I., Mirovskii V.G.* Inclusion of scattering losses in the models of the effective permittivity of dielectric mixtures and applications to wet snow // *Electromagn. Waves and Appl.* 1994. V. 8. № 11. P. 1395–1410.
- Carlsen T., Birnbaum G., Ehrlich A., Freitag J., Heygster G., Istomina L., Kipfstuhl S., Orsi A., Schafer M., Wendisch M.* Comparison of different methods to retrieve optical-equivalent snow grain size in central Antarctica // *Cryosph.* 2017. № 11. P. 2727–2741.
- Chang A.T.C., Choudhury B.J., Gloersen P.* Microwave Brightness of Polar Firn as Measured by Nimbus 5 and 6 ESMR // *Glaciology.* 1980. V. 25. № 91. P. 85–92.
- Das S.B., Alley R.B., Reusch D.B., Shuman C.A.* Temperature variability at Siple Dome, West Antarctica, derived from ECMWF re-analyses, SSM/I and SMMR brightness temperatures and AWS records // *Ann. Glaciol.* 2002. V. 34. P. 106–112.
- Ferrigno J.G., Williams R.S., Rosanova E., Lucchitta B.K., Swithinbank C.* Analysis of coastal change in Marie Byrd Land and Ellsworth Land, West Antarctica, using Landsat imagery // *Ann. Glaciology*, 1998, Vol. 27, pp. 33–40.
- Gorodetskaya I.V., Kneifel S., Maahn M., Tricht K., Thierry W., Schween J.H., Mangold A., Crewell S., Lipzig N.P.M.* Cloud and precipitation properties from ground-based remote-sensing instruments in East Antarctica // *Cryosph.* 2015. № 9. P. 285–304.
- Gutierrez A., Castro R., Vieira P.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. DEIMOS Engenharia. Lisboa, Portugal, 2014. https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models (August 24, 2018)
- Herzfeld U.C.* Atlas of Antarctica. Topographic Maps from Geostatistical Analysis of Satellite Radar Altimeter Data. Springer, 2004. 364 p.
- Jarvinen O., Mattila O.-P., Sinisalo A., Lepparanta M.* Snow Research in the Dronning Maud Land within the Finnish Antarctic Research Program in 1989–2014 // *Geophys.* 2014, V. 50. № 2. P. 27–48.
- Karkas E., Martma T., Sonninen E.* Physical properties and stratigraphy of surface snow in western Dronning Maud Land, Antarctica // *Polar Res.* 2005. V. 24. № 1–2. P. 55–67.
- Kerr Y.H., Waldteufel P., Wigneron J.-P., Delwart S., Cabot F., Boutin J., Escorihuela M.J., Font J., Reul N., Gruhier C., Juglea S.E., Drinkwater M.R., Hahne A., Martin-Neira M., Mecklenburg S.* The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle // *Proc. IEEE.* 2010. V. 98. № 5. P. 666–687.
- Kieffer H., Kargel J.S., Barry R. and co-auth.* New Eyes in the Sky Measure Glaciers and Ice Sheets // *Eos.* 2000. V. 81. № 24. P. 265–271.
- Koenig L.S., Steig E.J., Winebrenner D.P., Shuman C.A.* A link between microwave extinction length, firn thermal diffusivity, and accumulation rate in West Antarctica // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № F03018. 10 p.
- Leduc–Leballeur M., Picard G., Mialon A., Arnaud L., Lefebvre E., Possenti P., Kerr Y.* Modeling L-band brightness temperature at Dome C, Antarctica and comparison with SMOS observations // *EEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2015. V. 53. № 7. P. 1–11.
- Lubin D., Massom R.* Remote Sensing of Earth's Polar Regions: Opportunities for Computational Science // *Com. Sci. & Engin.* 2007. V. 9. № 1. P. 58–71.
- Macelloni G., Brogioni M., Pettinato S., Zasso R., Crepaz A., Zaccaria J., Padovan B., Drinkwater M.R.* Ground-Based L-Band Emission Measurements at Dome-C Antarctica: The DOMEX-2 Experiment // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2013. V. 51. № 9. P. 4718–4730.
- Macelloni G., Brogioni M., Aksoy M., Johnson J.T., Jezek K.C., Drinkwater M.R.* Understanding SMOS data in Antarctica // *IEEE Int. Geosci. Rem. Sens. Symp. (IGARSS).* 2014. P. 3606–3609.
- Polder D., van Santen J.H.* The effective permeability of mixtures of solids // *Phys.* 1946. V. 12. № 5. P. 257–271.
- Picard G., Brucker L., Fily M., Gallee H., Krinner G.* Modeling time series of microwave brightness temperature in Antarctica // *Glaciology.* 2009. V. 55. № 191. P. 537–551.
- Ridley J.K.* Surface melting on Antarctic Peninsula ice shelves detected by passive microwave sensors // *Geophys. Res. Lett.* 1993. V. 20. № 23. P. 2639–2642.
- Sahr K., White D., Kimerling A.J.* Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartogr. and Geogr. Inform. Sci.* 2003. V. 30. № 2. P. 121–134.
- Sato K., Hirasawa N.* Statistics of Antarctic surface meteorology based on hourly data in 1957–2007 at Syowa Station // *Polar Sci.* 2007. № 1. P. 1–15.
- Sharkov E.A.* Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Berlin, Heidelberg, L., N.Y. etc.: Springer/PRAXIS, 2003. 613 p.
- Shuman C.A., Comiso J.C.* In situ and satellite surface temperature records in Antarctica // *Ann. Glaciol.* 2002. V. 34. P. 113–120.
- Souvereinjs N., Gossart A., Gorodetskaya I.V., Lhermitte S., Mangold A., Laffineur Q., Delcloo A., Lipzig N.P.M.* How does the ice sheet surface mass balance relate to snowfall? Insights from a ground-based precipitation radar in East Antarctica // *Cryosph.* 2018. V. 12. P. 1987–2003.
- Stewart J. (Ed.).* Antarctica. An Encyclopedia. V. 1, 2. North Carolina: McFarland & Company Inc. Publishers, 2011. 1758 p.
- Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S.* Dielectric permittivity of snow measured along the route traversed in the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08 // *Ann. Glaciol.* 2010. V. 51. № 55. P. 9–15.
- Sugiyama S., Enomoto H., Fujita S., Fukui K., Nakazawa F., Holmlund P., Surdyk S.* Snow density along the route traversed by the Japanese–Swedish Antarctic Expedition 2007/08 // *Glaciology.* 2012. V. 58. № 209. P. 529–539.

- Sun N., Weng F.* Evaluation of Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) Environmental Data Records // *EEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2008. V. 46. № 4. P. 1006–1016.
- Tedesco M.* Remote sensing of the cryosphere. Oxford: JohnWiley & Sons, 2015. 404 p.
- Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Alexeeva T.A.* Snow Cover Effect on Brightness Temperature of Arctic Ice Fields Based on SSM/I Data // *Progr. in Electromagn. Res. Symp. (PIERS) Proc.* Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013. P. 514–518.
- Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Sharkov E.A., Raev M.D., Repina I.A., Ivanov V.V., Alexeeva T.A., Komarova N. Yu.* Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean-atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions // *Progr. in Electromagn. Res. B.* 2014. V. 59. P. 123–133.
- Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Ivanov V.V., Boyarskii D.A., Alexeeva T.A., Komarova N. Yu.* A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Adv. in Sp. Res.* 2015. V. 56. № 8. P. 1578–1589.
- Van der Veen C.J., Jezek K.C.* Seasonal variations in brightness temperature for central Antarctica // *Ann. Glaciol.* 1993. V. 17. P. 300–306.
- West R., Winebrenner D., Tsang L., Rott H.* Microwave emission from density-stratified Antarctic firn at 6 cm wavelength // *Glaciology.* 1996. V. 42. P. 63–76.
- Williams R.S., Ferrigno J.G., Swithinbank C., Lucchitta B.K., Seekins B.A.* Coastal-change and glaciological maps of Antarctica // *Ann. Glaciol.* 1995. V. 21. P. 284–290.
- Zwally H.J.* Microwave emissivity and accumulation rate of polar firn // *Glaciology.* 1977. V. 18. № 79. P. 195–215.
- Zwally H.J., Giovinetto M.B.* Accumulation in Antarctica and Greenland derived from passive-microwave data: A comparison with contoured complications // *Ann. Glaciol.* 1995. V. 21. P. 123–130.
- Zwally H.J., Fiegles S.* Extent and duration of Antarctic surface melt // *Glaciology.* 1994. V. 40. № 136. P. 463–476.