

## Первые результаты обработки данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024

В. В. Тихонов<sup>1,2,3</sup>, Д. М. Ермаков<sup>1,4</sup>, А. В. Кузьмин<sup>1</sup>, Т. А. Алексеева<sup>2,1</sup>,  
С. С. Сероветников<sup>2</sup>, Е. В. Афанасьева<sup>2,1</sup>, В. Д. Котельников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*  
*E-mails: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru, d.m.ermakov@cosmos.ru,*  
*Alexey.Kuzmin@asp.iki.rssi.ru*

<sup>2</sup> *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт*  
*Санкт-Петербург, 199397, Россия*  
*E-mail: taa@aari.ru*

<sup>3</sup> *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия*

<sup>4</sup> *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники*  
*им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия*

Представлены первые результаты обработки данных собственного микроволнового излучения ледяного покрова, открытой морской поверхности и атмосферы, полученных во время комплексной экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 в Карском море. Измерения выполнялись с борта атомного ледокола «Ямал» в мае 2024 г. с помощью микроволнового радиометрического комплекса на частотах 5,5; 19; 22,2; 36 и 92 ГГц. Параллельно с этими измерениями проводились наблюдения за основными характеристиками ледяного покрова (сплочённость, возраст, торосистость, толщина льда, высота снежного покрова и т.д.) и метеорологическими параметрами (температура воздуха, давление, скорость и направление ветра, наличие и тип осадков). В эксперименте были реализованы два основных режима наблюдения: под углом 53 и 65° к нормали, что соответствует геометрии наблюдения основных спутниковых радиометров. Измерение собственного микроволнового излучения атмосферы выполнялось в зенит, а также под углами, зеркальными к измерению поверхности (53 и 65° к направлению в зенит). Результаты обработки экспериментальных данных показали, что излучательная способность сплошного морского ледяного покрова и открытой водной поверхности, вычисленная по измеренным значениям яркостной температуры, полностью совпадает с результатами, полученными ранее в «классических» экспериментах NORSEX (*англ.* Norwegian Remote Sensing Experiment) в 1979 г. и MIZEX (*англ.* Marginal Ice Zone Experiment) в 1983–1984 гг. Это свидетельствует о надёжности полученных экспериментальных данных и даёт основание для их привлечения к анализу и моделированию сложных условий состояния морского ледяного покрова.

**Ключевые слова:** подспутниковый эксперимент, микроволновая радиометрия, яркостная температура, излучательная способность, морской лёд

Одобрена к печати: 24.09.2025  
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-231-240

### Введение

В мае 2024 г. сотрудники Института космических исследований РАН и Арктического и антарктического научно-исследовательского института приняли участие в комплексной арктической экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 (Алексеева и др., 2024; Ермаков и др., 2024). В рамках этой экспедиции с борта атомного ледокола «Ямал» по пути следования судна в Карском море проводились специальные наблюдения за основными характеристиками ледяного покрова (сплочённость, возраст, торосистость и т.д.). Кроме этого, выполнялись измерения толщины льда и высоты снега с помощью судового телевизионного комплекса (Афанасьева и др., 2022; Сероветников и др., 2018). Также велась запись метеорологических параметров: температуры воздуха, давления, скорости и направления ветра, наличия и типа осадков.

Одной из основных задач экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 было осуществление подспутниковых измерений собственного микроволнового излучения подстилающей поверхности (ледяной покров и открытая вода) и атмосферы (Ермаков и др., 2024). Измерения выполнялись с борта ледокола с помощью микроволнового радиометрического комплекса на частотах 5,5 ГГц (попеременно на вертикальной V (*англ.* vertical) и горизонтальной H (*англ.* horizontal) поляризации), 19, 22,2 ГГц (только V-поляризация), 36 ГГц (одновременно на V- и H-поляризации) и 92 ГГц (только V-поляризация). Радиометрические измерения сопровождалась видеозаписью поверхности в районе пятна наблюдений с частотой один кадр в две секунды и записью навигационной информации для точной координатной привязки. В эксперименте были реализованы два основных режима наблюдения: под углом  $53^\circ$  к нормали, что соответствует геометрии наблюдения спутниковых радиометров SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager Sounder) и AMSR-2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) (Тихонов и др., 2016), и под углом  $65^\circ$  к нормали, что соответствует геометрии наблюдения спутникового радиометра МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) (Чернявский и др., 2020). При измерении собственного микроволнового излучения атмосферы выставлялись зеркальные к измерению поверхности углы, составляющие  $53$  и  $65^\circ$  к направлению в зенит соответственно. В процессе проведения подспутникового эксперимента было получено в общей сложности около 112 ч микроволновых измерений. Подробнее о проведении измерений, ледовых условиях в период эксперимента, микроволновой аппаратуре и калибровочных процедурах изложено в статьях (Алексеева и др., 2024; Ермаков и др., 2024).

В настоящей работе описана методика обработки полученных в ходе подспутникового эксперимента данных, а также представлены первые результаты этой обработки.

### Обработка экспериментальных данных

Микроволновые измерения проводились непрерывно в период с 16 по 20 мая, а также 23 и 24 мая. При этом в период с 16 мая 13:30 по 18 мая 17:00 (по московскому времени) измерения выполнялись в режиме SSMIS/AMSR-2, а остальное время — в режиме МТВЗА-ГЯ.

К сожалению, во время монтирования и настройки микроволнового радиометрического комплекса выяснилось, что вышел из строя радиометр на 5,5 ГГц. Кроме того, в дальнейшем стало понятно, что существуют большие проблемы с калибровкой радиометра на 92 ГГц, которые в настоящее время решаются. В связи с этим в настоящей работе пока представлены только результаты обработки экспериментальных микроволновых радиометрических измерений на частотах 19; 22,2 ГГц (V-поляризация) и 36 ГГц (V- и H-поляризация).

На *рис. 1* (см. с. 233) представлена часовая запись подобных измерений, выполненная для угла зондирования  $53^\circ$  — режим SSMIS/AMSR-2 (*рис. 1а*) и угла зондирования  $65^\circ$  — режим МТВЗА-ГЯ (см. *рис. 1б*). Верхний график показывает изменение угла зондирования, а нижний — динамику яркостной температуры каждого канала. На графиках выделяются области резких изменений угла зондирования (около 00:40 и 08:24 на *рис. 1а* и *б* соответственно), отражающие процесс наблюдения атмосферы и калибровки. На графиках угол зондирования отсчитывается от положения в надир. Углы  $53$  и  $127^\circ$ , а также  $65$  и  $115^\circ$  являются зеркальными относительно горизонта. Угол  $180^\circ$ , при котором достигаются минимальные значения яркостной температуры для всех каналов, соответствует наблюдениям в зенит.

Из рисунка видно, что яркостная температура очень чувствительна к изменению состояния поверхности (сплошной лёд, битый лёд, открытая вода и т.п.). Поскольку пятно радиометра при измерениях находилось в 20–30 м от борта ледокола (Ермаков и др., 2024), то в поле зрения радиометрического комплекса периодически попадали различные типы поверхности: вывороченный лёд, битый лёд, сплошной ледяной покров, начальные формы льда, открытая водная поверхность и т.д. Этим и определяются сильные колебания яркостной температуры каждого канала (см. *рис. 1*). Постоянное значение яркостной температуры 17.05.2024 в интервале времени с 00:30 до 00:45, за исключением периода калибровки

(см. рис. 1а), связано с подготовкой атомного ледокола «Ямал» к буксировке теплохода «Мыс Флора» (ледокол в это время не двигался). Идентификация каждого типа поверхности осуществлялась по видеокамере, которая фиксировала состояние поверхности в районе пятна наблюдений с частотой один кадр в две секунды (рис. 2).

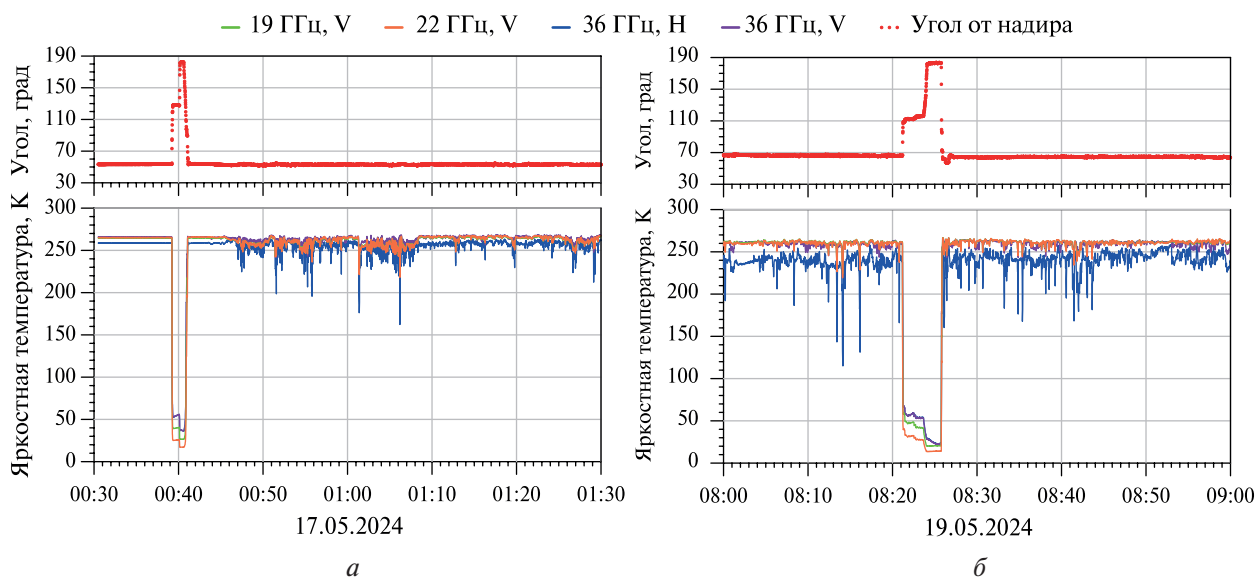


Рис. 1. Часовая запись изменения яркостной температуры по всем работающим каналам радиометрического комплекса (сверху) и изменение угла зондирования (снизу), полученные в режиме: а — SSMIS/AMSR-2; б — МТВЗА-ГЯ

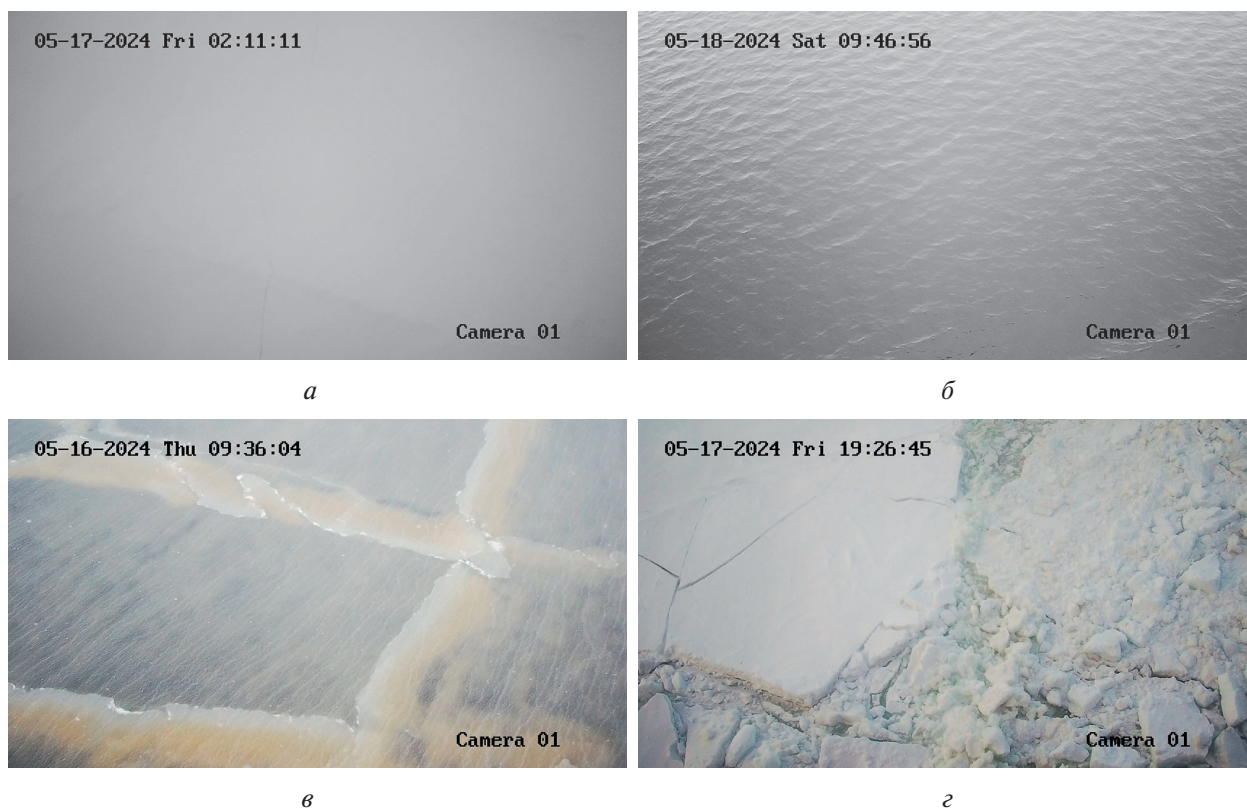
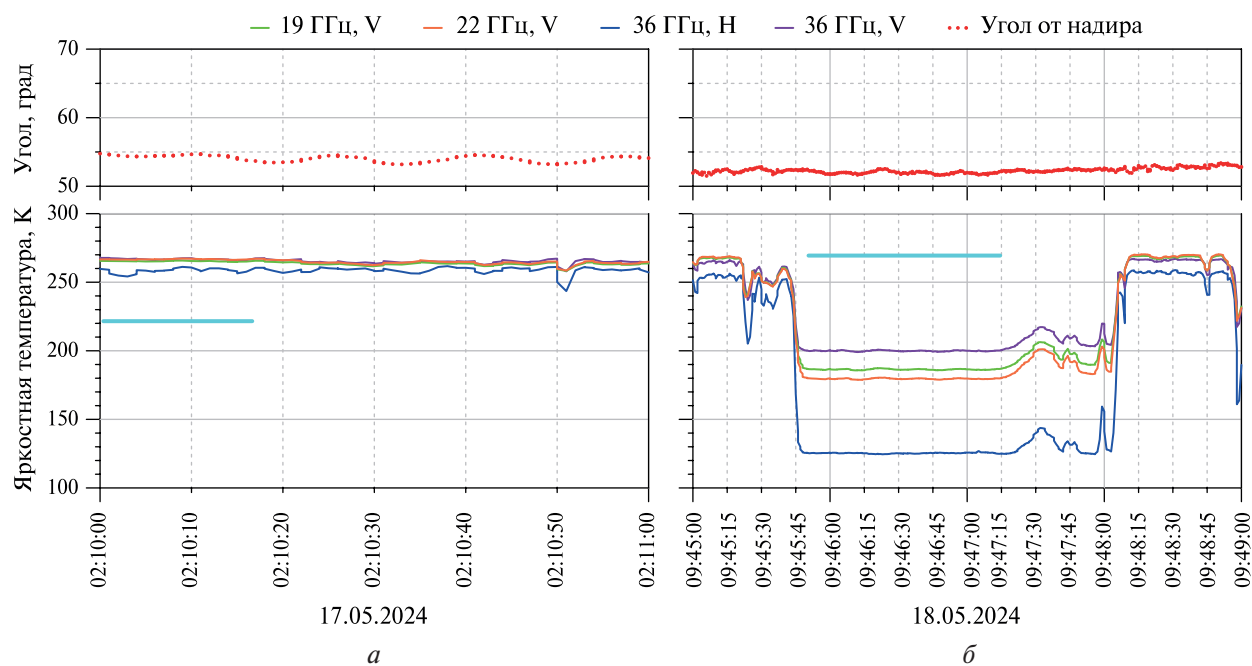


Рис. 2. Снимки видеокамеры: а — сплошной ледяной покров; б — открытая водная поверхность; в — нилас; г — битый лед, каша. Слева вверху каждого кадра указана дата и время наблюдения

По видеокамере определялся период наблюдения однотипной поверхности. Исходя из этого периода, выделялся временной промежуток радиометрических измерений, когда в поле зрения радиометра попадала только выбранная поверхность. Первоначально обрабатывались данные микроволновых измерений сплошного ледяного покрова и открытой воды. Такой выбор был обусловлен необходимостью сравнить данные, полученные в экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024, с «классическими» результатами норвежского эксперимента 1979 г. NORSEX (*англ.* Norwegian Remote Sensing Experiment) (NORSEX Group, 1983) и международного эксперимента 1983–1984 гг. MIZEX (*англ.* Marginal Ice Zone Experiment) (Onstott et al., 1987).

На *рис. 3, 4* (см. с. 235) представлены результаты измерений яркостной температуры каждого канала для сплошного морского ледяного покрова и открытой морской поверхности, выполненных в режиме SSMIS/AMSR-2 (см. *рис. 3*) и в режиме МТВЗА-ГЯ (см. *рис. 4*).



*Рис. 3.* Запись изменения яркостной температуры по всем рабочим каналам радиометрического комплекса (*снизу*) и угла зондирования (*сверху*) в режиме SSMIS/AMSR-2: *a* — для сплошного ледяного покрова; *б* — открытой водной поверхности. Голубой линией показан промежуток времени наблюдения однотипной поверхности

Анализ графиков на *рис. 3, 4* показывает, что для сплошного ледяного покрова (*рис. 3, 4a*) яркостная температура на канале 36 ГГц горизонтальной поляризации (36 ГГц Н) ведёт себя менее стабильно, чем каналы на вертикальной поляризации (19; 22,2; 36 ГГц V). Это объясняется тем, что горизонтальная поляризация в микроволновом диапазоне наиболее чувствительна к изменению структуры слоёв снега и льда (Matzler et al., 1984). Поскольку ледяной и снежный покров на пути движения судна не может иметь стабильные характеристики (толщина, структура, плотность, влажность), то этим и объясняются небольшие колебания канала 36 ГГц Н по сравнению с другими каналами. Каналы на вертикальной поляризации показывают достаточно стабильные значения яркостной температуры в периоды измерения собственного микроволнового излучения сплошного морского льда. На *рис. 3a* видно, что отличия яркостной температуры по всем каналам очень малы для периода сплошного и несплошного льда. На рисунке обозначен период (голубая линия), когда в пятно радиометров попадала только однородная поверхность ледяного покрова. Дальше, по времени, в область измеряемой поверхности стали попадать трещины, небольшие разрывы ледяного покрова и т.п. Излучательная способность этих областей мало отличается

друг от друга (см. рис. 3а), однако мы исключали такие области из рассмотрения. В период наблюдения открытой водной поверхности все каналы показывают достаточно стабильные значения, так как глубина формирования излучения на этих частотах составляет величину меньше одного миллиметра (Ulaby, Long, 2014), а волнение в этот период практически отсутствовало. Необходимо отметить небольшие изменения угла зондирования как в режиме SSMIS/AMSR-2 (см. рис. 3), так и в режиме МТВЗА-ГЯ (см. рис. 4). Они связаны с движением ледокола. Микроволновый радиометрический комплекс жёстко крепился на борту атомного ледокола «Ямал», при этом выставлялся определённый угол зондирования (Алексеева и др., 2024; Ермаков и др., 2024). При движении ледокола этот угол немного менялся в зависимости от интенсивности движения, качки и ледовых условий. Однако данные изменения угла зондирования были незначительны (см. рис. 3 и 4) и не могли повлиять на качество эксперимента.

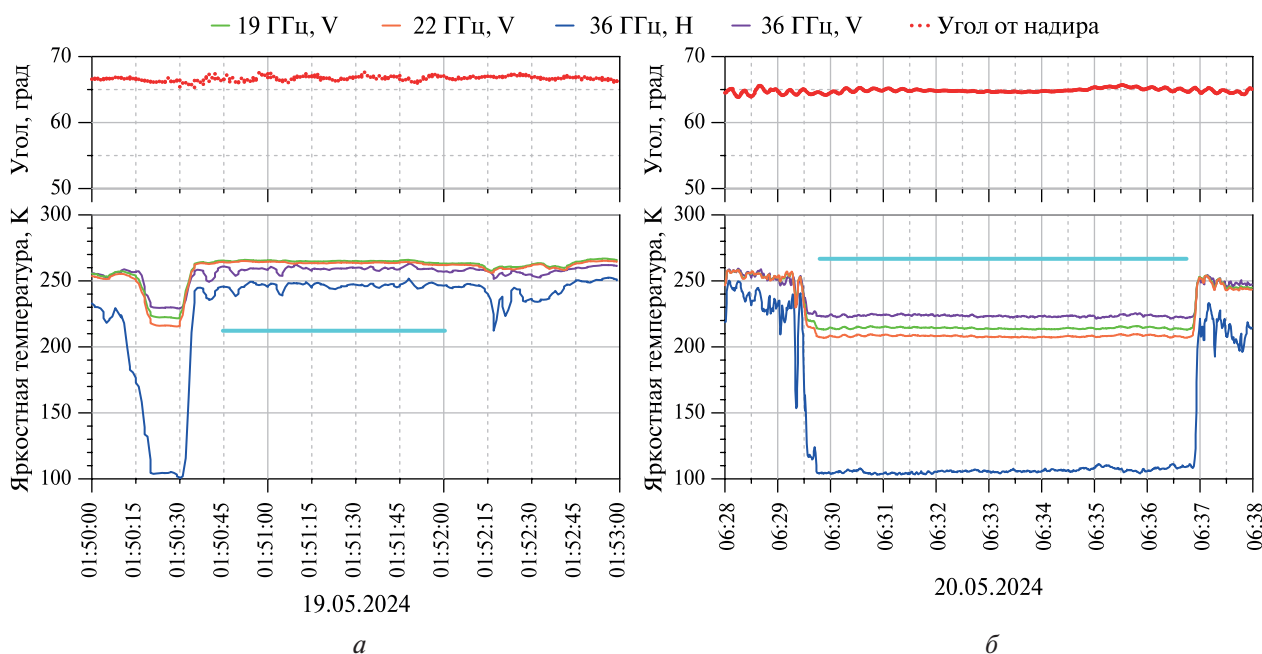


Рис. 4. Запись изменения яркостной температуры по всем рабочим каналам радиометрического комплекса (снизу) и угла зондирования (сверху) в режиме МТВЗА-ГЯ: а — для сплошного ледяного покрова; б — открытой водной поверхности. Голубой линией показан промежуток времени наблюдения однотипной поверхности

Измеренная радиометрами яркостная температура  $T_{я}$  на V- и H-поляризации представляет собой сумму излучения поверхности и отражённого поверхностью излучения неба (см., например, публикацию (NORSEX Group, 1983)):

$$T_{я}^{V,H} = \chi^{V,H} T_{эф} + (1 - \chi^{V,H}) T_a^{V,H}, \quad (1)$$

где  $\chi$  — излучательная способность поверхности, которая является функцией от угла зондирования;  $T_{эф}$  — эффективная температура излучающего слоя поверхности;  $T_a$  — яркостная температура нисходящего излучения атмосферы, которая также является функцией от угла зондирования. Излучательную способность поверхности, исходя из уравнения (1), можно определить из следующего выражения:

$$\chi^{V,H} = \frac{T_{я}^{V,H} - T_a^{V,H}}{T_{эф} - T_a^{V,H}}. \quad (2)$$

При вычислении  $\chi$  из выражения (2) для водной поверхности  $T_{эф}$  принималась равной температуре замерзания морской воды ( $-1,8\text{ }^\circ\text{C}$ ), а для сплошного морского льда  $T_{эф}$  вычислялась как среднее значение между температурой морской воды и температурой воздуха. Измерения с помощью судового телевизионного комплекса показали, что во время проведения микроволнового радиометрического эксперимента толщина льда не превышала, как правило, 80 см, а снежного покрова — 10 см. Температура воздуха в это время изменялась в пределах от  $-1$  до  $-7^\circ$  (Ермаков и др., 2024). В связи с чем подобный подход к выбору  $T_{эф}$  морского ледяного покрова представляется оправданным и находится в согласии с работой (NORSEX Group, 1983). Яркостная температура атмосферы под необходимым углом зондирования определялась экспериментально, в периоды калибровки и измерения излучения атмосферы (см. рис. 1). Продолжительность каждого сеанса калибровки составляла до 10 мин. Сеансы осуществлялись несколько раз в сутки и были приурочены к пролётам над районом наблюдений спутниковых микроволновых радиометрических комплексов: SSMIS на спутниках DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program) F16, F17, F18 и AMSR-2 на космическом аппарате GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission — Water), либо МТВ3А-ГЯ на спутниках «Метеор-М» № 2-3 и «Метеор-М» № 2-4. При вычислении  $\chi$  поверхности принималось значение  $T_a$ , полученное при ближайшем ко времени измерения поверхности сеансе калибровки.

### Полученные результаты и их обсуждение

Результаты расчёта излучательной способности сплошного ледяного покрова и открытой водной поверхности по экспериментальным измерениям яркостной температуры для каждого канала представлены на рис. 5. Для сравнения на графике показаны классические результаты по определению излучательной способности морского льда в конце лета и водной поверхности, полученные в ряде экспериментов и представленные в работах (NORSEX Group, 1983; Onstott et al., 1987).

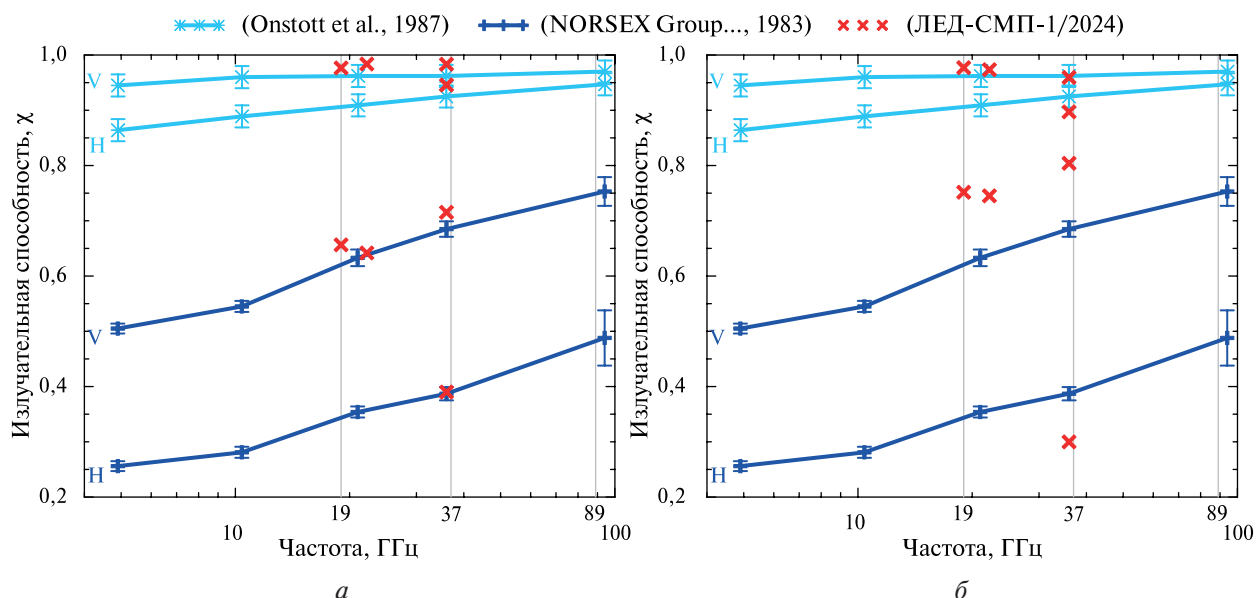


Рис. 5. Излучательная способность сплошного льда и открытой морской поверхности под углом зондирования  $50^\circ$ , представленная в работах (NORSEX Group, 1983; Onstott et al., 1987), а также определённая по результатам микроволновых радиометрических измерений в экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024: а — в режиме SSMIS/AMSR-2 (угол зондирования  $53^\circ$ ), б — в режиме МТВ3А-ГЯ (угол зондирования  $65^\circ$ ). Вертикальными отрезками указаны погрешности измерений в экспериментах NORSEX и MIZEX

Норвежский эксперимент по дистанционному зондированию NORSEX проводился в прикромочной зоне к северу от Шпицбергена осенью 1979 г. (NORSEX Group, 1983). В эксперименте были выполнены координированные пассивные и активные микроволновые измерения на месте, а также с помощью корабельных, авиационных и спутниковых приборов. Наземные микроволновые радиометрические измерения осуществлялись с помощью датчиков, разработанных Бернским университетом (*нем.* Universität Bern), на частотах 4,9; 10,4; 21; 36 и 94 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации под различными углами зондирования. Кроме того, выполнялись измерения собственного микроволнового излучения атмосферы под углами, зеркальными к измерению поверхности. Особое внимание было акцентировано на зондировании поверхности под углом  $50^\circ$ , под которым изучал поверхность Земли микроволновый радиометр SMMR (*англ.* Scanning Multichannel Microwave Radiometer) на борту искусственного спутника Земли Nimbus-7 (Тихонов и др., 2016). В эксперименте исследовались многолетние и однолетние льды, а также открытая морская поверхность. Параллельно с дистанционными измерениями проводился анализ характеристик льда и снежного покрова, фиксировались метеорологические характеристики.

Международный эксперимент MIZEX проводился в проливе Фрама в июне и июле 1983 и 1984 гг. (Onstott et al., 1987). Собственное микроволновое излучение различных морских льдов в диапазоне 5–94 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации измерялось в прикромочной зоне. Радиометры были установлены на судах, санях и вертолётах. Исследования проводились под углами зондирования  $20\text{--}60^\circ$ , однако наибольшее внимание также было уделено углу  $50^\circ$ . В эксперименте был выполнен анализ изменения яркостной температуры и излучательной способности основных классов арктического морского льда, их связи с физическими свойствами снега и льда, особенно в период таяния и разрушения ледяного покрова.

Микроволновые радиометрические измерения с борта атомного ледокола «Ямал» в комплексной экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 в Карском море проводились во второй половине мая 2024 г. В этот период ледовитость Карского моря начинает уменьшаться, максимум приходится на март–апрель (Карандашева и др., 2024). Температура воздуха во время экспедиции изменялась в пределах от  $-1$  до  $-7^\circ$ . На маршруте плавания преобладал очень сплочённый лёд (9–10 баллов по 10-балльной шкале), состоящий в основном из однолетнего тонкого льда (30–70 см) с включением однолетнего среднего льда (70–120 см). На отдельных участках отмечалось увеличение количества молодых (10–30 см) и ниласовых ( $<10$  см) льдов, как например в районе выхода из Обской губы, а также вблизи мыса Желания (Ермаков и др., 2024). Исходя из метеоусловий и ледовой обстановки, а также сезона проведения подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024, полученные результаты сравнивались с данными экспериментов NORSEX и MIZEX, измеренными для открытой водной поверхности, однолетнего льда и льда в конце лета. На *рис. 5а* представлены результаты сравнения  $\chi$  льда в конце лета, определённой по данным экспедиции MIZEX, и  $\chi$  открытой морской поверхности, полученной по результатам экспедиции NORSEX, с  $\chi$ , вычисленной из выражения (2), по данным экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024, измеренным в режиме SSMIS/AMSR-2. На *рис. 5б* подобное сравнение показано для  $\chi$ , полученной по данным экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024, измеренным в режиме МТВЗА-ГЯ.

Излучательная способность сплошного льда и морской поверхности, определённая по данным экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024, измеренным в режиме SSMIS/AMSR-2, хорошо совпадает с результатами «классических» экспериментов MIZEX и NORSEX (см. *рис. 5а*). Полученный результат позволяет приступить к дальнейшей обработке микроволновых радиометрических данных, полученных в экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024.

К сожалению, для режима МТВЗА-ГЯ в настоящее время не существует эталонных подспутниковых измерений яркостной температуры морского ледяного покрова и открытой водной поверхности. Однако, основываясь на изменении угловой зависимости излучательной способности морских льдов (см., например, книгу (Microwave..., 1992)) и морской поверхности (см., например, работу (Ulaby, Long, 2014)), можно сделать вывод, что полученные результаты хорошо отражают реальную картину. Для сплошного морского льда на частотах

от 18 до 90 ГГц излучательная способность (яркостная температура) Н- и V-поляризации должна уменьшаться при увеличении угла зондирования от 50 до 65° (Microwave..., 1992). Для морской поверхности на этих же частотах, при увеличении угла зондирования от 50 до 65°, излучательная способность (яркостная температура) на вертикальной поляризации увеличивается, а на горизонтальной уменьшается (Ulaby, Long, 2014). Подобные изменения и демонстрирует *рис. 5б* по сравнению с *рис. 5а*.

## Заключение

В работе представлены первые результаты обработки данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента, проведённого в рамках комплексной экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 в Карском море. Анализ обработки экспериментальных данных показал, что излучательная способность сплошного льда и открытой водной поверхности, вычисленная по измеренным в режиме SSMIS/AMSR-2 (угол зондирования 53°) значениям яркостной температуры, хорошо соответствует результатам, полученным ранее в классических экспериментах NORSEX и MIZEX. Полученные результаты позволяют приступить к дальнейшей обработке экспериментальных данных — определению излучательной способности ниласа, начальных форм льда, битого льда, каши, а также антропогенного льда, образовавшегося после разрушения под воздействием ледоколов, и повторного замерзания (Алексеева и др., 2024). В таком же направлении будет осуществляться дальнейшая обработка и анализ микроволновых радиометрических данных, полученных в режиме МТВЗА-ГЯ. Использование экспериментальных результатов, полученных в двух режимах (SSMIS/AMSR-2 и МТВЗА-ГЯ), позволит определить диэлектрические свойства различных льдов на рабочих частотах и в дальнейшем использовать данные спутникового радиометра МТВЗА-ГЯ для анализа ледовой обстановки морей Российской Арктики.

Обработка и анализ экспериментальных данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента выполнены в рамках темы государственного задания Института космических исследований РАН «Мониторинг», гос. регистрация № 122042500031-8 (В. В. Тихонов, Д. М. Ермаков, А. В. Кузьмин). Подспутниковые микроволновые радиометрические измерения с борта ледокола выполнены в рамках темы государственного задания Института космических исследований РАН «Мониторинг», гос. регистрация № 122042500031-8 (Д. М. Ермаков, А. В. Кузьмин). Организация и выполнение комплексных ледовых и метеорологических наблюдений в рамках экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 поддержаны Российским научным фондом, грант № 23-17-00161 (<https://rscf.ru/project/23-17-00161/>) (Т. А. Алексеева, С. С. Сероветников, Е. В. Афанасьева, В. Д. Котельников, В. В. Тихонов). При разработке микроволнового радиометрического комплекса частично использованы программно-аппаратные решения, полученные в рамках темы государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН) «Космос-2», гос. регистрация № 0030-2019-0008.

Авторы благодарят сотрудников ИРЭ РАН М. Т. Смирнова, В. П. Саворского и Б. Г. Кутузу за содействие в подготовке подспутникового эксперимента.

## Литература

1. Алексеева Т. А., Сероветников С. С., Макаров Е. И. и др. Влияние интенсивного судоходства на изменение строения и динамики ледяного покрова в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 3. С. 323–337. <https://doi.org/10.30758/05552648-2024-70-3-323-337>.
2. Афанасьева Е. В., Сероветников С. С., Алексеева Т. А. и др. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 2. С. 96–117. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>.

3. *Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Тихонов В. В. и др.* Данные микроволновых радиометрических измерений комплексных подспутниковых наблюдений морского льда с атомного ледокола «Ямал» в мае 2024 года // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21. № 5. С. 275–287. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-275-287.
4. *Карандашева Т. К., Иванов Б. В., Ревина А. Д., Илющенко И. А.* Тенденции ледовитости Баренцева и Карского морей в период современных изменений климата // *Российская Арктика*. 2024. Т. 6. № 4. С. 6–18. <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-4-06-18>.
5. *Сероветников С. С., Фролов С. В., Клейн А. Э.* Судовой телевизионный комплекс — реализация автоматизированной системы натуральных измерений толщины морского льда // *Российская Арктика*. 2018. № 2. С. 41–55. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00017>.
6. *Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А. и др.* Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов: Обзор // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 4. С. 65–84. DOI: 10.7868/S0205961416040072.
7. *Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П. и др.* Моделирование яркостной температуры 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.
8. *Matzler C., Ramseier R., Svendsen E.* Polarization effects in sea ice signatures // *IEEE J. Oceanic Engineering*. 1984. V. 9. No. 5. P. 333–338. DOI: 10.1109/JOE.1984.1145646.
9. *Microwave remote sensing of sea ice / ed. F. D. Carse.* American Geophysical Union, 1992. 462 p. DOI: 10.1029/GM068.
10. *NORSEX Group.* Norwegian remote sensing experiment in a marginal ice zone // *Science*. 1983. V. 220. No. 4599. P. 781–787. <https://doi.org/10.1126/science.220.4599.781>.
11. *Onstott R. G., Grenfell T. C., Matzler C., Luther C. A., Svendsen E. A.* Evolution of microwave sea ice signatures during early summer and midsummer in the marginal ice zone // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1987. V. 92. No. C7. P. 6825–6835. <https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06825>.
12. *Ulaby F. T., Long D. G.* Microwave radar and radiometric remote sensing. Univ. of Michigan Press, 2014. 984 p.

## First results of data processing from emulated satellite microwave radiometric experiment of the LED-SMP-1/2024 expedition

**V. V. Tikhonov<sup>1,2,3</sup>, D. M. Ermakov<sup>1,4</sup>, A. V. Kuzmin<sup>1</sup>, T. A. Alekseeva<sup>2,1</sup>,  
S. S. Serovetnikov<sup>2</sup>, E. V. Afanasyeva<sup>2,1</sup>, V. D. Kotelnikov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*  
*E-mails: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru, d.m.ermakov@cosmos.ru*  
*Alexey.Kuzmin@asp.iki.rssi.ru*

<sup>2</sup> *Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg 199397, Russia*  
*E-mail: taa@aari.ru*

<sup>3</sup> *Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia*

<sup>4</sup> *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch*  
*Fryazino, Moscow Region 141190, Russia*

The paper presents initial results of processing the data of microwave emissions of ice cover, open sea surface and atmosphere obtained during the LED-SMP-1/2024 expedition in the Kara Sea. Measurements were conducted aboard the Yamal nuclear icebreaker in May 2024 using a microwave radiometric system operating at frequencies of 5.5, 19, 22.2, 36, and 92 GHz. These measurements were accompanied by observations of key ice cover characteristics (concentration, age, hummocking, ice thickness, snow depth, etc.) and meteorological parameters (air temperature, pressure, wind speed and direction, and the presence and type of precipitation). The experiment utilized two main observation modes: at 53 and 65° to the normal, which corresponds to the observation geometry of the main satellite radiometers. Measurements of microwave emission of the atmosphere were performed at the zenith and at angles mirroring the surface measurements (53 and 65° relative to the zenith).

The results of experimental data processing showed that the emissivity of consolidated sea ice cover and open water, calculated from measured brightness temperatures, is completely consistent with the results obtained previously in the classic NORSEX (Norwegian Remote Sensing Experiment) of 1979 and MIZEX (Marginal Ice Zone Experiment) of 1983–1984 experiments. This demonstrates the reliability of the obtained experimental data and provides grounds for their use in the analysis and modeling of complex sea ice cover conditions.

**Keywords:** field and emulated satellite experiment, microwave radiometry, brightness temperature, emissivity, sea ice

Accepted: 24.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-231-240

## References

1. Alekseeva T.A., Serovetnikov S.S., Makarov E.I. et al., Influence of intensive shipping traffic on changes in the structure and dynamics of the ice cover in the southwestern part of the Kara Sea, *Arctic and Antarctic Research*, 2024, V. 70, No. 3, pp. 323–337 (in Russian), <https://doi.org/10.30758/05552648-2024-70-3-323-337>.
2. Afanasyeva E. V., Serovetnikov S. S., Alekseeva T. A. et al., Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities, *Arctic and Antarctic Research*, 2022, V. 68, No. 2, pp. 96–117 (in Russian), <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>.
3. Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Tikhonov V. V., Alekseeva T. A., Serovetnikov S. S., Afanasyeva E. V., Kotelnikov V. D., The sea ice microwave radiometer data measured in May 2024 from Yamal nuclear ice-breaker concurrent with satellite observations, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 5, pp. 275–287 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-275-287.
4. Karandasheva T. K., Ivanov B. V., Revina A. D., Ilyushchenkova I. A., Ice extent trends in the Barents and Kara Seas during recent climate change. *Russian Arctic*, 2024, V. 6, No. 4, pp. 6–18 (in Russian), <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-4-06-18>.
5. Serovetnikov S. S., Frolov S. V., Kleyn A. E., Ship television complex — implementation of an automated system for in-kind measurements of sea ice thickness, *Russian Arctic*, 2018, V. 1, No. 2, pp. 41–55 (in Russian), <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2018-00017>.
6. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A. et al., Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions: A review, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2016, V. 52, No. 9, pp. 1012–1030, <https://doi.org/10.1134/S0001433816090267>.
7. Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P. et al., Brightness temperature modeling and first results derived from the MTVZA-GY radiometer of the Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 3, pp. 51–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
8. Matzler C., Ramseier R., Svendsen E., Polarization effects in sea ice signatures, *IEEE J. Oceanic Engineering*, 1984, V. 9, No. 5, pp. 333–338, DOI: 10.1109/JOE.1984.1145646.
9. *Microwave remote sensing of sea ice*, F. D. Carse (ed.), American Geophysical Union, 1992, 462 p., DOI: 10.1029/GM068.
10. NORSEX Group, Norwegian remote sensing experiment in a marginal ice zone, *Science*, 1983, V. 220, No. 4599, pp. 781–787. <https://doi.org/10.1126/science.220.4599.781>.
11. Onstott R. G., Grenfell T. C., Matzler C., Luther C. A., Svendsen E. A., Evolution of microwave sea ice signatures during early summer and midsummer in the marginal ice zone, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1987, V. 92, No. C7, pp. 6825–6835. <https://doi.org/10.1029/JC092iC07p06825>.
12. Ulaby F. T., Long D. G., *Microwave radar and radiometric remote sensing*, Univ. of Michigan Press, 2014, 984 p.