

Излучательная способность ниласа и серого льда. По результатам подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции Лед-СМП-1/2024

В. В. Тихонов^{1,3}, Д. М. Ермаков^{1,4}, А. В. Кузьмин¹, Т. А. Алексеева^{2,1},
С. С. Сероветников², Е. В. Афанасьева^{2,1}, В. Д. Котельников², С. А. Втюрин¹

¹ *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

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

³ *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия*

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

Представлены и проанализированы результаты определения излучательной способности ниласа, наслоённого ниласа и серого льда, полученные в ходе обработки данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции Лед-СМП-1/2024. Измерения яркостной температуры морского льда были выполнены с борта атомного ледокола «Ямал» в мае 2024 г. с помощью микроволнового радиометрического комплекса на частотах 19; 22,2; 36 ГГц. В эксперименте были реализованы два основных режима зондирования: под углом 53 и 65° к нормали, что соответствует геометрии наблюдения основных спутниковых радиометров. Измерение собственного микроволнового излучения атмосферы выполнялось в зенит и под углами, зеркальными к измерению поверхности (53 и 65° к направлению в зенит). Результаты обработки экспериментальных данных показали увеличение значений излучательной способности поверхности по мере формирования и нарастания морского льда от открытой воды до однолетнего льда. Поляризационная разность канала 36 ГГц в обоих режимах зондирования уменьшается по мере изменения ледяного покрова от наслоённого ниласа до однолетнего льда. Поляризационная разность канала 36 ГГц для ниласа при угле зондирования 53° больше, чем для открытой морской поверхности. Также отмечена большая вариативность излучательной способности ниласа, наслоённого ниласа и серого льда, которую необходимо учитывать при анализе данных спутниковых микроволновых радиометров.

Ключевые слова: подспутниковый эксперимент, микроволновая радиометрия, яркостная температура, излучательная способность, морской лёд, нилас, наслоённый нилас, серый лёд

Одобрена к печати: 30.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-346-356

Введение

В работе (Тихонов и др., 2025б) были представлены первые результаты обработки данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента, проведённого в рамках комплексной экспедиции Лед-СМП-1/2024 в Карском море. Измерения выполнялись с борта атомного ледокола «Ямал» с помощью микроволнового радиометрического комплекса на частотах 19 и 22,2 ГГц (только на вертикальной V-поляризации (*англ.* Vertical)), а также на частоте 36 ГГц (одновременно на V- и горизонтальной H-поляризации (*англ.* Horizontal)). Запись яркостной температуры $T_{\text{я}}$ поверхности осуществлялась при двух режимах наблюдения: 53° к нормали, что соответствует геометрии наблюдения спутниковых радиометров SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager Sounder) и AMSR-2 (*англ.* Advanced

Microwave Scanning Radiometer) (Тихонов и др., 2016), и под углом 65° 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). Кроме этого, выполнялись измерения $T_{\text{я}}$ атмосферы под углами, зеркальными к измерению поверхности, т.е. 53° и 65° к направлению в зенит соответственно. Подробнее об экспедиции Лед-СМП-1/2024, а также о методике проведения микроволнового радиометрического эксперимента изложено в работах (Алексеева и др., 2024; Ермаков и др., 2024).

Полученные в процессе обработки экспериментальных данных результаты показали, что излучательная способность χ сплошного морского льда и открытой водной поверхности, определённая по измеренным под углом зондирования 53° (режим SSMIS/AMSR-2) значениям $T_{\text{я}}$, хорошо соответствует данным, полученным ранее в классических экспериментах NORSEX (*англ.* Norwegian Remote Sensing Experiment) и MIZEX (*англ.* Marginal Ice Zone Experiment) (NORSEX Group, 1983; Onstott et al., 1987). Кроме этого, впервые были найдены величины χ однолетнего морского льда и водной поверхности для угла зондирования 65° (режим МТВЗА), косвенное подтверждение которых было представлено в работе (Тихонов и др., 2025б). Полученные результаты позволили приступить к дальнейшей обработке экспериментальных данных микроволнового радиометрического эксперимента, в первую очередь, определению значений χ ниласа и серого льда.

В работе (NORSEX Group, 1983) были представлены данные по величине χ для различных форм морского льда и открытой водной поверхности. Эти результаты были получены в ходе норвежского эксперимента по дистанционному зондированию NORSEX, который проводился в прикромочной зоне к северу от Шпицбергена осенью 1979 г. (NORSEX Group..., 1983). В эксперименте выполнялись пассивные и активные микроволновые измерения на месте, а также с использованием корабельных, авиационных и спутниковых приборов. Микроволновые радиометрические измерения на месте осуществлялись с помощью радиометров, разработанных Бернским университетом (*нем.* Universität Bern), на частотах 4,9; 10,4; 21; 36 и 94 ГГц на Н- и V-поляризации под различными углами зондирования. Также выполнялись измерения собственного микроволнового излучения атмосферы под углами, зеркальными к измерению поверхности. Отдельное внимание было акцентировано на зондировании поверхности под углом 50° , под которым в тот момент исследовал поверхность Земли микроволновый радиометр SMMR (*англ.* Scanning Multichannel Microwave Radiometer), установленный на борту искусственного спутника Земли Nimbus-7 (Тихонов и др., 2016). По итогам выполненных измерений было показано монотонное увеличение χ для Н- и V-поляризации по мере того, как поверхность меняется от спокойной воды к сплошному однолетнему льду. Также отмечено уменьшение поляризационной разности P , т.е. разности между значениями χ на V- и Н-поляризации, по мере формирования ледяного покрова от морской поверхности до однолетнего льда. Однако в качестве итоговых результатов данного эксперимента были представлены усреднённые значения χ на V- и Н-поляризации для однолетнего льда, которые включали χ различных форм льда первого года (начальные виды льдов, нилас, блинчатый лёд, серый лёд и т.д.) (NORSEX Group..., 1983). В дальнейшем именно эти результаты использовались в многочисленных исследованиях и при разработке микроволновых алгоритмов определения сплочённости и площади морского льда (Тихонов и др., 2016, 2025а). Необходимо отметить, что из-за подобного усреднения значения χ однолетнего льда, представленные в работе (NORSEX Group..., 1983), для всех каналов немного меньше, чем значения χ однолетнего льда, полученные по результатам микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции Лед-СМП-1/2024 (Тихонов и др., 2025б).

В настоящей работе представлены результаты определения χ для ниласа и серого льда, полученные в режиме SSMIS/AMSR-2 и МТВЗА в ходе микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции Лед-СМП-1/2024. Выполнен анализ изменения значений χ по мере нарастания морского льда. Показана большая вариативность χ для ниласа и серого льда, которую необходимо учитывать при анализе данных спутниковых микроволновых радиометров.

Объекты исследования

Нилас — это тонкая, эластичная корка льда на воде, легко изгибающаяся на волне и зыби. Нилас подразделяют на два типа: тёмный нилас и светлый нилас (*рис. 1*). Тип ниласа устанавливается по цвету поверхности. Тёмный нилас (толщина 3–5 см) представляет собой рыхлый, матово-тёмного цвета ледяной покров с влажной от рассола поверхностью. Светлый нилас (толщина 5–10 см) — непрозрачный, имеет тёмно-серый цвет (Бородачев и др., 1994; Руководство..., 1981; Производство..., 2025). Свежий снег, появляющийся на поверхности ниласа, быстро пропитывается морской водой и темнеет. При сжатии нилас не торосится, как более толстые льды, а образует зубчатые наслоения. В районах с интенсивной динамикой ледяного покрова наслоения могут быть многократными — подобный лёд называется наслоённым ниласом (см. *рис. 1*).



Рис. 1. Ровные участки тёмного и светлого ниласа, наслоённого ниласа и серого льда (фото сделано на борту сухогруза «Капитан Данилкин» в апреле 2011 г. в Карском море). Тёмные ровные участки — тёмный нилас, участки немного светлее — светлый нилас, самые светлые — серый лёд. Ближе к левому борту сухогруза видны участки наслоённого ниласа



Рис. 2. Однолетний толстый лёд, образованный из многократно наслоённого ниласа и серого льда. Район Обь-Енисейской заприпайной полыни. Фотография сделана 29.04.2026 судовым телевизионным комплексом с борта атомного ледокола «Сибирь» во время экспедиции Лед-СМП-2026

При дальнейшем ледообразовании, при увеличении толщины льда до 10–15 см, из ниласа образуется серый лёд (см. *рис. 1*). Серый лёд менее влажный и эластичный, чем нилас. При сжатии он так же, как нилас, наслаивается, хотя способен уже и тороситься. При волнении такой лёд ломается, в отличие от ниласа, который на волне изгибается. При дальнейшем наложении ниласа и серого льда образуется однолетний лёд. Подобные поля однолетнего льда наблюдались в апреле 2026 г. в Карском море во время экспедиции Лед-СМП-2026 на выходе из Енисейского залива в районе формирования Обь-Енисейской заприпайной полыньи (*рис. 2*).

Идентификация полей ниласа и серого льда по данным дистанционного зондирования необходима для определения начала ледообразования в осенний период. В зимний период среди дрейфующих однолетних и старых льдов образуются разводья, а в прибрежных районах — заприпайные полыньи, которые быстро покрываются ниласом и серым льдом (Карелин, Карклин, 2012). Образование в разводьях и полыньях ниласа и серых льдов указывает на время их существования и означает, что они не только что сформировались, а сохраняются определённое время. В зимний период наличие и идентификация разводий и полыней особенно важна для судоходства, так как маршрут движения судна прокладывается по более тонким льдам (Алексеева и др., 2024).

Обработка экспериментальных данных

Излучательная способность ниласа и серого льда вычислялась из следующего выражения (Тихонов и др., 2025б):

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

где $T_{эф}$ — эффективная температура излучающего слоя поверхности; T_a — яркостная температура нисходящего излучения атмосферы. Верхние индексы V и H у параметров χ , $T_{я}$ и T_a обозначают поляризацию принимаемого излучения — вертикальную и горизонтальную соответственно. Значения $T_{я}$ и T_a измерялись в процессе микроволнового радиометрического эксперимента. Значения $T_{эф}$ для водной поверхности принимались равными температуре замерзания морской воды ($-1,8^\circ\text{C}$), а для сплошного морского льда вычислялись как среднее значение между температурой морской воды и температурой воздуха. Более подробное описание методики обработки экспериментальных данных и вычисления χ поверхности изложено в работе (Тихонов и др., 2025б).

Полученные результаты и их анализ

Режим SSMIS/AMSR-2

В процессе выполнения микроволнового радиометрического эксперимента в режиме SSMIS/AMSR-2 удалось выполнить измерения $T_{я}$ ниласа, наслоённого ниласа и серого льда. При измерении $T_{я}$ ниласа не выполнялось разделение его по типам, так как поля тёмного и светлого ниласа часто перекрывались друг с другом и провести уверенную идентификацию типа ниласа не представлялось возможным. Далее из выражения (1) были вычислены значения χ для этих форм льда. При определении χ принимались значения T_a , полученные при ближайшем ко времени измерения поверхности сеансе калибровки (Тихонов и др., 2025б). Результаты расчёта представлены в *табл. 1, 2*. В этих таблицах показан интервал значений χ и среднее значение χ , определённое из массива измерений $T_{я}$ открытой водной поверхности, ниласа, наслоённого ниласа, серого и однолетнего льда для каналов 19 ГГц на V-поляризации (*табл. 1*), 22,2 ГГц на V-поляризации (*табл. 1*), 36 ГГц на H- и V-поляризации (*табл. 2*). Кроме этого, в *табл. 2* в последней колонке указана величина усреднённой поляризационной разности P канала 36 ГГц для всех форм льда и водной поверхности. Значения χ однолетнего

льда и открытой водной поверхности были получены ранее и представлены в работе (Тихонов и др., 2025б). Анализ *табл. 1, 2* показал, что для однолетнего льда и открытой водной поверхности, в отсутствие сильного ветрового волнения, интервал значений χ небольшой и составляет величину менее 0,04. Объясняется это стабильными диэлектрическими характеристиками морской воды и однолетнего льда. Колебания значений χ для водной поверхности обусловлено незначительным волнением (Кутуза и др., 2016; Raizer, 2017). Однолетний лёд считается уже достаточно установившимся образованием, его толщина составляет более 30 см, поэтому разброс значений χ такого льда при постоянных метеоусловиях определяется, в первую очередь, толщиной снежного покрова и шероховатостью поверхности (NORSEX Group..., 1983; Grenfell, Lohanick, 1985).

Таблица 1. Излучательная способность открытой воды, ниласа, наслоённого ниласа, серого и однолетнего льда: интервал и среднее значение. Режимы SSMIS/AMSR-2, 19 ГГц, V-поляризация; 22,2 ГГц, V-поляризация

Тип поверхности	χ , 19 ГГц, V-поляризация		χ , 22,2 ГГц, V-поляризация	
	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее
Открытая вода	0,653–0,670	0,657	0,638–0,656	0,642
Нилас	0,662–0,748	0,690	0,648–0,737	0,678
Наслоённый нилас	0,693–0,851	0,825	0,684–0,835	0,809
Серый лёд	0,787–0,957	0,876	0,783–0,960	0,876
Однолетний лёд	0,974–0,979	0,977	0,982–0,986	0,984

Таблица 2. Излучательная способность открытой воды, ниласа, наслоённого ниласа, серого и однолетнего льда: интервал и среднее значение. Режим SSMIS/AMSR-2, 36 ГГц, H- и V-поляризация. В последней колонке указана усреднённая поляризационная разность канала 36 ГГц

Тип поверхности	χ , 36 ГГц, H-поляризация		χ , 36 ГГц, V-поляризация		P , 36 ГГц
	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее	
Открытая вода	0,373–0,410	0,390	0,704–0,736	0,715	0,325
Нилас	0,363–0,431	0,390	0,717–0,835	0,746	0,357
Наслоённый нилас	0,413–0,635	0,592	0,735–0,926	0,890	0,298
Серый лёд	0,601–0,915	0,784	0,807–0,966	0,898	0,114
Однолетний лёд	0,923–0,960	0,946	0,975–0,989	0,983	0,037

Интервал значений χ ниласа, наслоённого ниласа и серого льда для всех каналов на V-поляризации достаточно большой: для ниласа он составляет величину порядка 0,1, а для серого льда и наслоённого ниласа более 0,15. Также необходимо отметить, что эти интервалы перекрывают друг друга. Интервал значений χ наслоённого ниласа и серого льда для канала 36 ГГц на H-поляризации очень большой и составляет величину порядка 0,2–0,3. Связано это тем, что горизонтальная поляризация в микроволновом диапазоне наиболее чувствительна к изменению структуры слоёв снега и льда (Matzler et al., 1984). Большой разброс значений χ и перекрытие интервалов этих значений для разных форм льда объясняется их значительной влажностью и малой толщиной (см. разд. «Объект исследования»). Для ниласа и открытой водной поверхности интервалы возможных значений χ достаточно близки между собой (верхние значения для ниласа чуть больше), а усреднённые значения χ либо сравнимы между собой (канал 36 ГГц, H-поляризация), либо чуть больше у ниласа (не более 0,04) (см. *табл. 1, 2*). Связано это с малой толщиной ниласа (менее 10 см) и большой его влажностью. Поскольку H-поляризация более чувствительна к внутреннему состоянию структуры льда, то χ на H-поляризации очень тонкого и пропитанного водой льда, каким является

нилас, сравнима с χ водной поверхности. Усреднённые значения χ увеличиваются с развитием ледяного покрова от водной поверхности до однолетнего льда (табл. 1, 2), что объясняется обсыханием ледяного покрова в процессе его развития.

Поляризационная разность канала 36 ГГц (табл. 2) уменьшается по мере формирования ледяного покрова от морской поверхности до однолетнего льда, как это было отмечено в работе (NORSEX Group, 1983). Исключением является P ниласа, которая чуть больше, чем P морской поверхности. Поскольку, как было отмечено, χ канала 36 ГГц на Н-поляризации ниласа и водной поверхности сравнимы между собой, а χ канала 36 ГГц на V-поляризации у ниласа чуть больше, чем у воды, то P ниласа оказывается больше. Этот факт необходимо учесть при разработке дистанционных микроволновых методов идентификации ниласа на морской поверхности, поскольку данная особенность является характерным индикатором подобной формы ледяного покрова.

Режим МТВ3А

К сожалению, в период проведения микроволнового радиометрического эксперимента в режиме МТВ3А удалось выполнить измерения $T_{\text{я}}$ только наслоённого ниласа и серого льда. Однородных и стабильных полей ниласа в этот период не наблюдалось. Анализ вычисленных значений χ показал в общем случае сходную с режимом SSMIS/AMSR-2 картину (см. табл. 3, 4): малый разброс χ для открытой воды и однолетнего льда, перекрытие интервалов значений χ для наслоённого ниласа и серого льда, большой разброс значений χ наслоённого ниласа и серого льда на канале 36 ГГц на Н-поляризации, увеличение усреднённого значения χ при развитии ледяного покрова от водной поверхности до однолетнего льда.

Однако есть ряд серьёзных отличий. В первую очередь, это существенное различие P для открытой водной поверхности и исследуемых льдов (табл. 4), что объясняется бóльшим углом зондирования поверхности в режиме МТВ3А (65°) по сравнению с углом зондирования в режиме SSMIS/AMSR-2 ($53\text{--}55^\circ$). Увеличение угла зондирования приводит к сильному возрастанию P морской поверхности (Ulaby, Long, 2014) и менее значительному увеличению P морского льда (Microwave..., 1992). Такая особенность может быть очень полезна при создании алгоритмов восстановления параметров морского ледяного покрова по данным МТВ3А. Второе отличие заключается в меньшем разбросе значений χ наслоённого ниласа и серого льда для всех каналов на V-поляризации, определённым в режиме МТВ3А, по сравнению с разбросом значений χ , полученным в режиме SSMIS/AMSR-2 (порядка 0,1 и менее) (см. табл. 3, 4). Этот факт также объясняется бóльшим углом зондирования. При изменении угла зондирования от 55 до 65° излучательная способность однолетнего льда на Н-поляризации уменьшается, а на V-поляризации практически не изменяется (Microwave..., 1992). Для морской водной поверхности увеличение угла зондирования приводит к тому, что на V-поляризации χ увеличивается, а на Н-поляризации χ уменьшается (Ulaby, Long, 2014). Поскольку наслоённый нилас и серый лёд являются промежуточными средами между морской водой и однолетним льдом, это приводит к увеличению средних значений χ и уменьшению интервала этих значений для данных форм льда.

Таблица 3. Излучательная способность открытой воды, наслоённого ниласа, серого и однолетнего льда: интервал и среднее значение. Режимы МТВ3А, 19 ГГц, V-поляризация; 22,2 ГГц, V-поляризация

Тип поверхности	χ , 19 ГГц, V-поляризация		χ , 22,2 ГГц, V-поляризация	
	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее
Открытая вода	0,746–0,775	0,752	0,740–0,771	0,745
Наслоённый нилас	0,863–0,957	0,914	0,868–0,957	0,911
Серый лёд	0,902–0,962	0,941	0,901–0,965	0,942
Однолетний лёд	0,971–0,981	0,977	0,967–0,979	0,973

Таблица 4. Излучательная способность открытой воды, наслоённого ниласа, серого и однолетнего льда: интервал и среднее значение. Режим МТВЗА, 36 ГГц, Н- и V-поляризация. В последней колонке указана усреднённая поляризационная разность канала 36 ГГц

Тип поверхности	χ , 36 ГГц, Н-поляризация		χ , 36 ГГц, V-поляризация		P , 36 ГГц
	Интервал	Среднее	Интервал	Среднее	
Открытая вода	0,285–0,377	0,300	0,787–0,824	0,804	0,504
Наслоённый нилас	0,472–0,911	0,675	0,880–0,999	0,947	0,272
Серый лёд	0,637–0,882	0,811	0,902–0,973	0,951	0,140
Однолетний лёд	0,853–0,929	0,897	0,924–0,988	0,959	0,062

На рис. 3 представлены усреднённые значения χ однолетнего льда, серого льда, наслоённого ниласа, ниласа и открытой водной поверхности, полученные при обработке данных микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции Лед-СМП-1/2024. Для сравнения на рисунке приводятся значения χ однолетнего льда (зелёные символы и линии) и открытой морской поверхности (синие символы и линии), измеренные в эксперименте NORSEX при угле зондирования 50° (NORSEX Group, 1983).

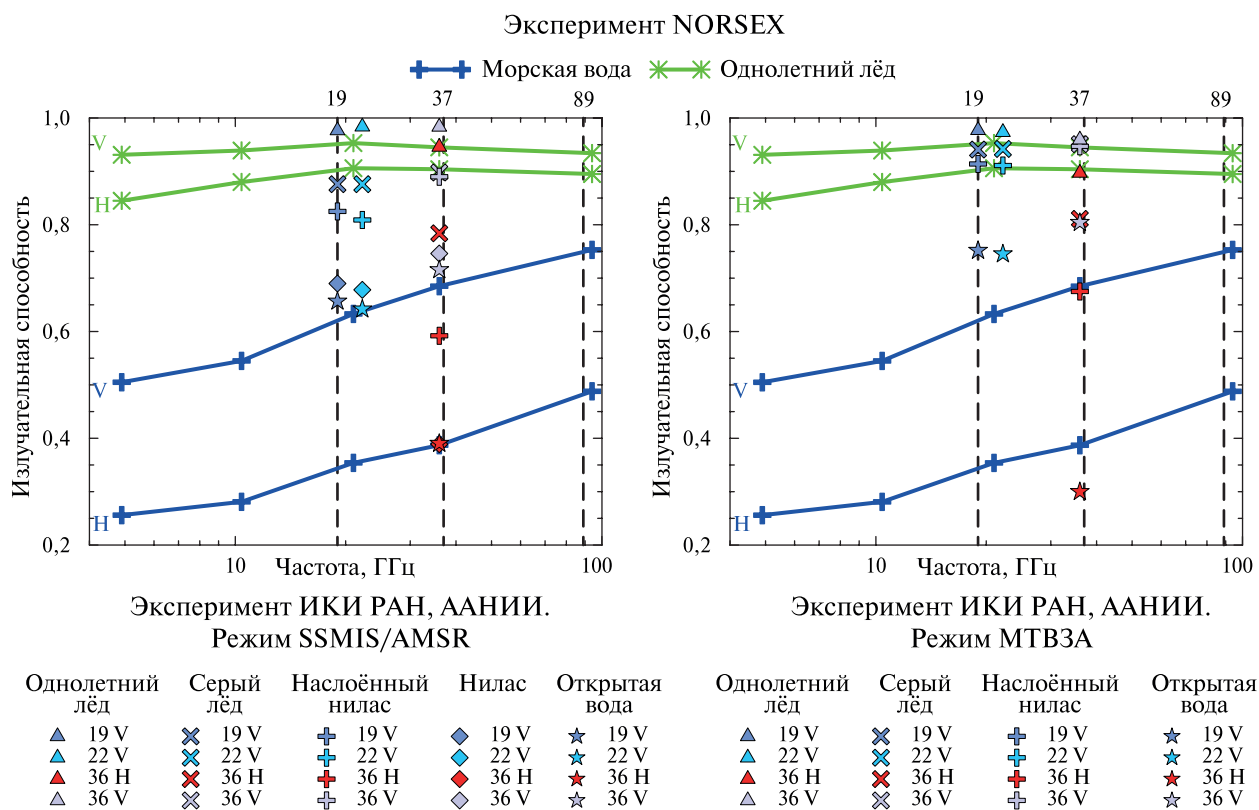


Рис. 3. Усреднённая излучательная способность однолетнего льда, серого льда, наслоённого ниласа, ниласа и открытой водной поверхности, полученные в режиме SSMIS/AMSR-2 (а); то же, кроме ниласа, в режиме МТВЗА (б)

Рисунок 3 наглядно демонстрирует выводы, изложенные выше, по результатам анализа значений χ , представленных в табл. 1–4:

- для обоих режимов зондирования средние значения χ возрастают при формировании и развитии ледяного покрова от водной поверхности до однолетнего льда, причём для режима SSMIS/AMSR-2 эта особенность более выражена;

- для Н-поляризации канала 36 ГГц в режиме зондирования SSMIS/AMSR-2 средние значения χ ниласа и открытой водной поверхности сравнимы между собой;
- для V-поляризации канала 36 ГГц в режиме зондирования SSMIS/AMSR-2 χ наслоённого ниласа и χ серого льда имеют практически равные средние значения;
- для V-поляризации канала 36 ГГц в режиме зондирования МТВЗА средние значения χ наслоённого ниласа, серого и однолетнего льда практически одинаковы;
- значение P канала 36 ГГц в обоих режимах зондирования уменьшается по мере формирования ледяного покрова от морской поверхности до однолетнего льда, за исключением ниласа, у которого P в режиме SSMIS/AMSR-2 чуть больше, чем у морской поверхности;
- величина P в режиме МТВЗА для открытой водной поверхности более чем в 2 раза больше значений P исследуемых льдов.

Все эти особенности необходимо учитывать при анализе ледовой обстановки по данным спутниковых микроволновых радиометров.

Заключение

В настоящей работе представлены и проанализированы результаты определения излучательной способности χ ниласа, наслоённого ниласа и серого льда, полученные в ходе обработки данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции Лед-СМП-1/2024. Эти результаты будут полезны при анализе и корректировке продуктов сплочённости морского льда, полученных по современным алгоритмам в режиме зондирования SSMIS/AMSR-2. Также эти результаты станут основой для создания алгоритма определения сплочённости морского льда по данным отечественного спутникового микроволнового радиометра МТВЗА. Однако для полноценной разработки подобного алгоритма необходимо проведение дополнительных подспутниковых измерений на Н-поляризации на частотах 19 и 22 ГГц, а также на высокочастотном канале (около 90 ГГц) на Н- и V-поляризации.

Обработка и анализ экспериментальных данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента выполнены в рамках темы государственного задания Института космических исследований РАН «Мониторинг», гос. регистрация № 126031818938-6.

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/10.30758/0555-2648-2024-70-3-323-337>.
2. Бородачев В. Е., Гаврило В. П., Казанский М. М. Словарь морских ледовых терминов. СПб.: Гидрометеиздат, 1994, 127 с.
3. Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Тихонов В. В. и др. Данные микроволновых радиометрических измерений комплексных подспутниковых наблюдений морского льда с борта 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. Карелин И. Д., Карклин В. П. Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб: ААНИИ, 2012. 180 с.
5. Кутуза Б. Г., Данилычев М. И., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
6. Производство специальных судовых ледовых наблюдений: методическое пособие / под ред. Т. А. Алексеевой. СПб.: ААНИИ, 2025. 46 с.
7. Руководство по производству ледовой авиаразведки. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 240 с.
8. 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.

9. Тихонов В. В., Алексеева Т. А., Соколова Ю. В. и др. (2025a) Влияние загрязнённости морского льда на определение его сплочённости по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 5. С. 274–292. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-274-292.
10. Тихонов В. В., Ермаков Д. М., Кузьмин А. В. и др. (2025b) Первые результаты обработки данных подспутникового микроволнового радиометрического эксперимента экспедиции Лед-СМП-1/2024 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 6. С. 231–240. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-231-240.
11. 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.
12. Grenfell T. C., Lohanick A. W. Temporal variations of the microwave signatures of sea ice during the late spring and early summer near Mould Bay NWT // J. Geophysical Research: Oceans. 1985. V. 90. No. C3. P. 5063–5074. DOI: 10.1029/jc090ic03p05063.
13. 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.
14. Microwave remote sensing of sea ice / ed. F. D. Carsey. American Geophysical Union, 1992. 462 p. DOI: 10.1029/GM068.
15. 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>.
16. Onstott R. G., Grenfell T. C., Matzler C. et al. 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>.
17. Raizer V. Advances in passive microwave remote sensing of oceans. CRC Press, 2017. 262 p.
18. Ulaby F. T., Long D. G. Microwave radar and radiometric remote sensing. University of Michigan Press, 2014. 984 p.

Emissivity of nilas and grey ice based on the results of emulated satellite microwave radiometric experiment of the LED-SMP-1/2024 expedition

V. V. Tikhonov^{1,3}, D. M. Ermakov^{1,4}, A. V. Kuzmin¹, T. A. Alekseeva^{2,1},
S. S. Serovetnikov², E. V. Afanasyeva^{2,1}, V. D. Kotelnikov², S. A. Vturin¹

¹ 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

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

³ Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia

⁴ Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia

In this paper, the emissivity of nilas, rafted nilas and grey ice has been determined and analyzed using data from the emulated satellite microwave radiometric experiment conducted during the LED-SMP-1/2024 expedition. The brightness temperature of sea ice was measured on board the nuclear icebreaker Yamal in May 2024 using a microwave radiometric complex at frequencies of 19, 22.2, and 36 GHz. The experiment involved two main observation modes: at an angle of 53 and 65° to the normal, which corresponds to the observation geometry of the main satellite radiometers. Microwave radiation of the atmosphere was measured at the zenith and at angles mirroring the geometry of sea ice surface observations (i.e. 53 and 65° to the zenith direction). The results of data pro-

cessing showed an increase in the surface emissivity as sea ice grows from open water to first-year ice. The polarization difference at 36 GHz in both observation modes decreases as ice develops from rafted nilas to first-year ice. The polarization difference for nilas at 36 GHz and observation angle of 53° is greater than for open water. Large variability in the emissivity of nilas, rafted nilas and grey ice has been noted. This must be taken into account when analyzing satellite microwave radiometer data.

Keywords: emulated satellite experiment, microwave radiometry, brightness temperature, emissivity, sea ice, nilas, rafted nilas, grey ice

Accepted: 30.06.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-346-356

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/10.30758/0555-2648-2024-70-3-323-337>.
2. Borodachev V. E., Gavrilov V. P., Kazanskii M. M., *Slovar' morskikh ledovykh terminov* (Glossary of marine ice terms), Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1994, 127 p. (in Russian).
3. Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Tikhonov V. V. et al., The sea ice microwave radiometer data measured in May 2024 from Yamal nuclear icebreaker concurrent with satellite observations, *Sovremennye 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. Karelin I. D., Karklin V. P., *Pripai i zapripainye polyn'i arkticheskikh morei sibirskogo shel'fa v kontse XX–nachale XXI veka* (Landfast ice and landfast ice polynyas of the Arctic seas of the Siberian shelf at the end of the XX–beginning of the XXI century), Saint Petersburg: AARI, 2012, 180 p. (in Russian).
5. Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I., *Sputnikovy monitoring Zemli: Microvolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Satellite Earth monitoring: Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: LENAND, 2016, 336 p. (in Russian).
6. *Proizvodstvo spetsial'nykh sudovykh ledovykh nablyudenii: metodicheskoe posobie* (Conducting special ship-based ice observations: A methodological guide), Alekseeva T. A. (ed.), Saint Petersburg: AARI, 2025, 46 p. (in Russian).
7. *Rukovodstvo po proizvodstvu ledovoi aviarazvedki* (Guidelines for aerial ice reconnaissance), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 240 p. (in Russian).
8. 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>.
9. Tikhonov V. V., Alekseeva T. A., Sokolova J. V. et al. (2025a), The impact of dirty ice on determination of sea ice concentration based on satellite microwave radiometry data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 5, pp. 274–292 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-274-292.
10. Tikhonov V. V., Ermakov D. M., Kuzmin A. V. et al. (2025b), First results of data processing from emulated satellite microwave radiometric experiment of the LED-SMP-1/2024 expedition, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 6, pp. 231–240 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-231-240.
11. 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, *Sovremennye 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.
12. Grenfell T. C., Lohanick A. W., Temporal variations of the microwave signatures of sea ice during the late spring and early summer near Mould Bay NWT, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1985, V. 90, No. C3, pp. 5063–5074, DOI: 10.1029/jc090ic03p05063.
13. 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.
14. *Microwave remote sensing of sea ice*, F. D. Carse (ed.), American Geophysical Union, 1992, 462 p., DOI: 10.1029/GM068.
15. 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>.

16. Onstott R. G., Grenfell T. C., Matzler C. et al., 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>.
17. Raizer V., *Advances in passive microwave remote sensing of oceans*, CRC Press, 2017, 262 p.
18. Ulaby F. T., Long D. G., *Microwave radar and radiometric remote sensing*, University of Michigan Press, 2014, 984 p.