

Данные микроволновых радиометрических измерений комплексных подспутниковых наблюдений морского льда с борта атомного ледокола «Ямал» в мае 2024 года

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

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mail: d.m.ermakov@cosmos.ru

² *Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт*
Санкт-Петербург, 199397, Россия

³ *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники*
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия

⁴ *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия*

В мае 2024 г. в рамках экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 одновременно с проведением специальных судовых ледовых наблюдений состоялся подспутниковый эксперимент по натурным измерениям собственного микроволнового излучения морского ледяного покрова, организованный совместно Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом и Институтом космических исследований РАН. Наблюдения выполнялись в акватории Карского моря в двух основных режимах, соответствующих геометрии измерений отечественного радиометра МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) и зарубежных спутниковых микроволновых радиометров SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder), AMSR-2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer) на частотах 5,4; 19,0; 22,2; 36; 92 ГГц. Дополнительно проводились регулярные сеансы наблюдений атмосферы под различными зенитными углами с радиометрической калибровкой по внешним эталонным нагрузкам. В совокупности в сеансах наблюдений с 16 по 24 мая накоплено около 112 ч записей микроволновых радиометрических измерений, сопровождаемых координатно-временной привязкой, фиксацией углов визирования, а также регистрацией метеоусловий и параметров ледовой обстановки. Накопленные данные планируется использовать для уточнения диэлектрических характеристик различных типов морского льда в микроволновом диапазоне, а также для проверки и развития алгоритмов восстановления параметров морского ледяного покрова по измерениям спутниковых микроволновых радиометров. Полученные в эксперименте данные детально описаны в настоящей работе и представлены в открытом доступе на серверах Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Ключевые слова: морской лёд, натурные наблюдения, подспутниковый эксперимент, микроволновая радиометрия, параметры ледяного покрова

Одобрена к печати: 01.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-275-287

Введение

Морской лёд является важной составляющей криосферы Земли. Изменчивость параметров морского ледяного покрова, климата и глобальной циркуляции водных масс тесно связаны между собой (Meier et al., 2014). За последние десятилетия ледовитость, площадь и толщина морского льда в Арктике существенно уменьшались (Иванов и др., 2013). Поэтому анализ и оценка изменений параметров морского ледяного покрова важны для лучшего понимания и прогнозирования климатических, криосферных и океанических процессов (Семенов и др., 2017) и, как одного из следствий, решения практических задач ледовой навигации (Саперштейн и др., 2024; Chen et al., 2022; Zhang et al., 2023).

Спутниковые микроволновые радиометры регулярно используются для измерения ледовитости, сплочённости и площади морского льда. В настоящее время предложено около

двух десятков алгоритмов определения этих параметров по данным различных спутниковых микроволновых радиометров на частотах от 6 до 89 ГГц. Однако все они имеют существенные погрешности, особенно в летний период, а также в прикромочных зонах и в районах редких льдов (Тихонов и др., 2016; Alekseeva et al., 2019; Wernecke et al., 2024). Радары с синтезированной апертурой играют важную роль в определении типа и возраста морского льда (Афанасьева и др., 2024; Заболотских и др., 2023), а также его дрейфа (Shokr et al., 2020). Однако неоднозначность связи удельной эффективной площади рассеяния льда с совокупностью его характеристик (возраст, строение, сплочённость, шероховатость поверхности, а также наличие и состояние снежного покрова и т.д.) в ряде случаев приводит к существенным трудностям и ошибкам восстановления этих характеристик (Афанасьева и др., 2024). Данные радиолокационных альтиметров используются для определения толщины льда, но результаты имеют значительные погрешности при толщине менее 1 м (Заболотских и др., 2023). Микроволновые радиометры также применяются для оценки толщины тонкого (10–20 см) морского льда (Naoki et al., 2008). Однако точность получаемых данных невысока и зависит от солёности льда, его заснеженности и шероховатости, а также от используемого диапазона частот (Заболотских и др., 2023).

Большинство методов определения параметров морского ледяного покрова по микроволновым спутниковым данным (пассивным и активным) основано на экспериментально полученных излучательных и диэлектрических характеристиках различных морских льдов в микроволновом диапазоне (Заболотских, 2019; Заболотских и др., 2023; Тихонов и др., 2016). Основные измерения (контактные, дистанционные) этих характеристик были выполнены во второй половине XX в. (Заболотских, 2019; Moore, Shuji, 1993; Ulaby, Long, 2014).

Климатические изменения, происходящие на нашей планете и в значительной степени затрагивающие Арктический регион (Бокучава, Семенов, 2022; Семенов и др., 2017), приводят к смене условий формирования и развития ледяного покрова, что, в свою очередь, сказывается на электродинамических характеристиках морского льда. Таким образом, для уточнения существующих алгоритмов определения параметров ледяного покрова по микроволновым спутниковым данным необходима актуализация знаний о диэлектрических и излучательных характеристиках различных морских льдов, формирующихся как в естественных климатических условиях, так и под сильным техногенным воздействием. Кроме этого, большинство существующих алгоритмов определения сплочённости и площади морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии базируются на данных, получаемых при угле зондирования 53–55°. Соответственно, и излучательные характеристики морских льдов были экспериментально изучены для этих углов. С запуском в 2014 г. российского спутника «Метеор-М» № 2, а в 2019, 2023 и 2024 гг. ещё трёх спутников этой серии возникла необходимость измерения излучательных характеристик морских льдов под углом зондирования 65°. Связано это с тем, что на спутнике установлен микроволновый радиометр МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)), который зондирует земную поверхность под этим углом (Чернявский и др., 2020).

В мае 2024 г. в рамках экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 на борту атомного ледокола «Ямал» (Алексеева и др., 2024) были выполнены натурные измерения радиояркостной температуры подстилающей поверхности (ледяного покрова и открытой воды) и атмосферы на маршрутах следования ледокола в Карском море. Одновременно по пути следования выполнялись непрерывные специальные судовые ледовые наблюдения, включающие в себя визуальные наблюдения за всеми характеристиками ледяного покрова (сплочённость, возраст и толщина льда, высота снега, торосистость и т.д.) и измерения толщины льда и высоты снега с помощью судового телевизионного комплекса. Также велась запись метеорологических параметров: температуры воздуха, давления, скорости и направления ветра, наличия и типа осадков. Получено в общей сложности около 112 ч записи микроволновых измерений в нескольких радиометрических каналах, дополненных информацией о местоположении, параметрах съёмки, метеоусловиях и состоянии ледяного покрова. Данные размещены на сайте Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (<http://ckp.geosmis.ru/>). Цель насто-

ящей работы заключается в описании выполненных микроволновых радиометрических измерений, формата записи в файлы полученных исходных и калиброванных данных, а также доступа к этим файлам через ЦКП «ИКИ-Мониторинг».

Микроволновый радиометрический комплекс

Приборы и программное обеспечение, использованные при выполнении ледовых наблюдений, многократно применялись и отработывались ранее Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) в комплексных экспериментах на морских платформах, в том числе совместно с Институтом радиотехники и электроники РАН и рядом других организаций (Кузьмин и др., 2020). В связи с ограничениями по транспортировке и размещению на борту ледокола вращающейся платформы, обеспечивающей автоматическое сканирование по зенитному и азимутальному углам, было решено отказаться от её использования. Вместо этого была реализована возможность ручной установки зенитного угла наблюдения, единого для всех радиометрических каналов, при фиксированном перпендикулярно борту судна азимутальном направлении.

Общий вид микроволнового радиометрического комплекса на монтажной раме в лаборатории показан на *рис. 1*. Цифрами на рисунке обозначены антенные рупоры радиометров R54 (1), R05 (2), R03 (3), R08 (4), P22M (5), их основные характеристики приведены в *табл. 1*. Радиометры R54, R05, R03, R08 укрыты общим гидроизолирующим чехлом. При натурных наблюдениях аналогичным чехлом был укрыт радиометр P22M; фронтальную плоскость монтажной рамы и апертуру антенного рупора P22M закрывали сменными радиопрозрачными плёночными экранами.

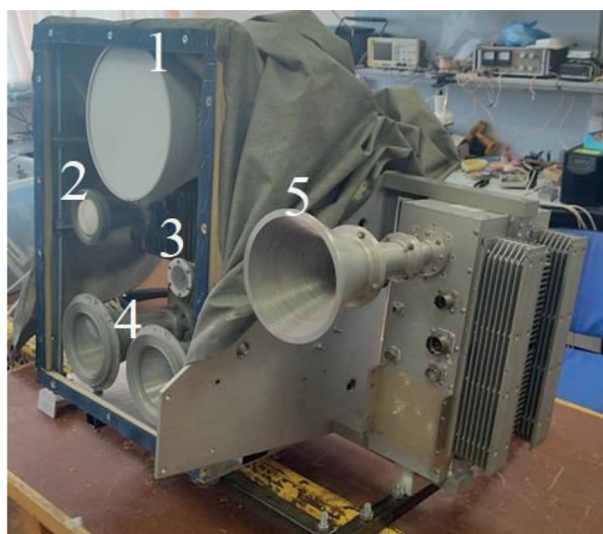


Рис. 1. Радиометрический комплекс в лаборатории

Таблица 1. Основные характеристики радиометрических каналов комплекса

Прибор	Центральная частота, ГГц	Поляризация	Угловая ширина ДНА, по уровню -3 дБ, град
1. R54	5,4	ВП/ГП	21
2. R05	60	ВП	9
3. R03	92	ВП	
4. R08-1, -2	36	ВП+ГП	18
5. P22M	19,0; 22,2	ВП	

В совокупности микроволновый радиометрический комплекс позволял осуществлять одновременную регистрацию излучения на частотах от 5,4 до 92 ГГц с периодичностью три раза в секунду, при этом P22M выполнял измерения сразу на двух частотах: 19,0 и 22,2 ГГц. Во всех частотных каналах измерялось вертикально поляризованное излучение (ВП). Радиометр R54 осуществлял измерения на вертикальной и горизонтальной поляризации попеременно (ВП/ГП), а радиометры R08 (основной R08-1 и дублирующий R08-2) — на двух поляризациях одновременно (ВП+ГП). В *табл. 1* также приведена угловая ширина диаграммы направленности антенн (ДНА) каждого из радиометров по уровню -3 дБ, которая

определяла характерные размеры наблюдаемых областей на уровне моря в разных режимах измерений.

Во время экспедиции измерения радиометрическим комплексом осуществляли в трёх различных режимах. Два основных режима отличались только зенитным углом луча зрения, под которым наблюдался ледяной покров или поверхность открытого моря. В первом режиме (режим SSMIS/AMSR-2) (англ. Special Sensor Microwave Imager/Sounder/Advanced Microwave Scanning Radiometer) он соответствовал зенитному углу встречи с Землёй луча зрения спутниковых микроволновых радиометров SSMIS и AMSR ($53\text{--}55^\circ$ к местному зениту), во втором (режим МТВЗА-ГЯ) — МТВЗА-ГЯ (65° к местному зениту). При наблюдениях с борта ледокола радиометрический комплекс был закреплён на высоте $17,5\text{ м}$ над уровнем моря. Схематично геометрия наблюдений в основных режимах показана на *рис. 2*. Размеры пятна зрения, формирующегося на уровне моря, в каждом из радиометрических каналов и удалённость пятна от борта ледокола приведены в *табл. 2*. Расчёт сделан в приближении круговой симметрии ДНА с параметрами, указанными в *табл. 1* и на *рис. 2*. Дана длина большой и малой оси эллиптических пятен и расстояние от центра эллипсов до проекции борта ледокола на поверхность моря.

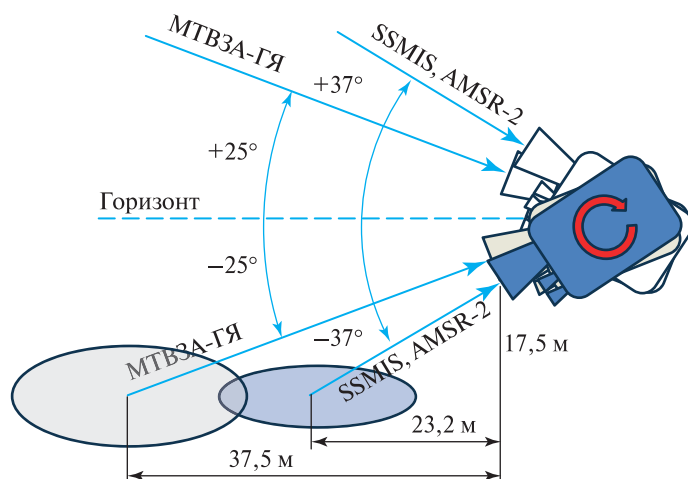


Рис. 2. Схема измерений в основных режимах радиометрических наблюдений

Таблица 2. Геометрические параметры пятна зрения на уровне моря

Прибор	Режим SSMIS/AMSR-2		Режим МТВЗА-ГЯ	
	Размер пятна, м	Удалённость, м	Размер пятна, м	Удалённость, м
1. R54	$19,1 \times 11,1$	25,6	$43,1 \times 16,7$	46,1
2. R05	$7,7 \times 4,6$		$15,9 \times 6,6$	38,9
3. R03				
4. R08-1, -2				
5. P22M	$16,0 \times 9,4$	24,9	$35,1 \times 13,9$	43,5

Третий режим наблюдений соответствовал сеансам калибровки. В этом режиме сначала менялся зенитный угол, выбранный в предыдущем основном режиме, на зеркальный к нему относительно горизонта, т.е. 53° или 65° от вертикали вверх (см. *рис. 2*). В таком положении некоторое время (около минуты) фиксировалось приходящее атмосферное излучение. Затем плавно менялся зенитный угол зрения приборов вплоть до направления вертикально вверх для регистрации угловой зависимости атмосферного радиотеплового спектра. В конечном положении последовательно перекрывались апертуры антенн калибровочным чёрным телом

(горячая и холодная нагрузка). Температура горячего чёрного тела составляла около 50 °С, холодного — около 14 °С.

Продолжительность каждого сеанса калибровки составляла до 10 мин. Сеансы осуществлялись несколько раз в сутки и, как правило, были приурочены к пролётам над районом наблюдений спутниковых микроволновых радиометрических комплексов: SSMIS на спутнике DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program) F16, F17, F18 и AMSR-2 на спутнике GCOM-W1 (*англ.* Global Change Observation Mission — Water), либо МТВЗА-ГЯ на спутниках «Метеор-М» № 2-3 и «Метеор-М» № 2-4. В остальное время суток проводились по возможности непрерывные наблюдения в одном из основных режимов измерений.

Параллельно с микроволновыми радиометрическими данными осуществлялась запись следующей информации: кадры видеокamеры для видеофиксации области наблюдения с периодичностью 2 с, широта и долгота места наблюдения с периодичностью 1 с, углы ориентации радиометрического комплекса по трём главным осям (включая угол к местной вертикали), температура воздуха и горячей нагрузки.

Маршруты, интервалы наблюдений и условия съёмки

Маршрут экспедиции ЛЕД-СМП-1/2024 проходил по акваториям Карского и Баренцева морей, где атомный ледокол «Ямал» осуществлял проводку транспортных судов на маршруте Обская губа — мыс Желания и далее в направлении кромки дрейфующих льдов в Баренцевом море. Карта маршрута представлена на *рис. 3*. Основные измерения микроволновым радиометрическим комплексом осуществлялись 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 судовому (московскому) времени) измерения выполнялись в режиме SSMIS/AMSR-2, а остальное время — в режиме МТВЗА-ГЯ.

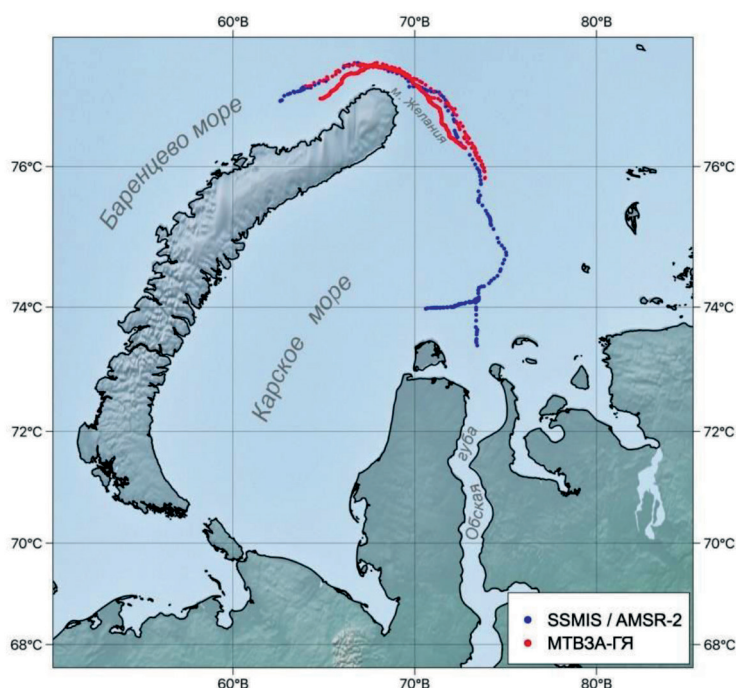


Рис. 3. Маршрут научной экспедиции ЛЕД-СМП-2024/1 на борту атомного ледокола «Ямал»: синие точки — наблюдения в режиме SSMIS/AMSR-2; красные точки — в режиме МТВЗА-ГЯ

В период с 16 по 20 мая 2024 г. в районе следования ледокола преобладала слабоотрицательная температура воздуха от -1 до -7 °С. Атмосферное давление понижалось с 764 до 748 мм рт. ст. Отмечалось усиление ветра с 4–5 до 7–8 м/с со сменой направления

с западных румбов на северное, затем на южное и к концу периода на восточное. В отдельные часы отмечалось маловетрие. Также временами наблюдался туман и небольшой снег. Временная изменчивость метеорологических параметров представлена на рис. 4 и 5. В интервале 23–24 мая сохранялась отрицательная температура воздуха от -5 до -10 °С, наблюдалось значительное усиление ветра. 23 мая начиная с 15:00 отмечался туман с ухудшением видимости до 6 морских миль, а начиная с 17:00 — метель с сильным снегом и ухудшение видимости до менее 1 морской мили, которые продолжались с перерывами и 24 мая. На поверхности льда сформировался свежий снежный покров, толщина которого могла достигать нескольких сантиметров.

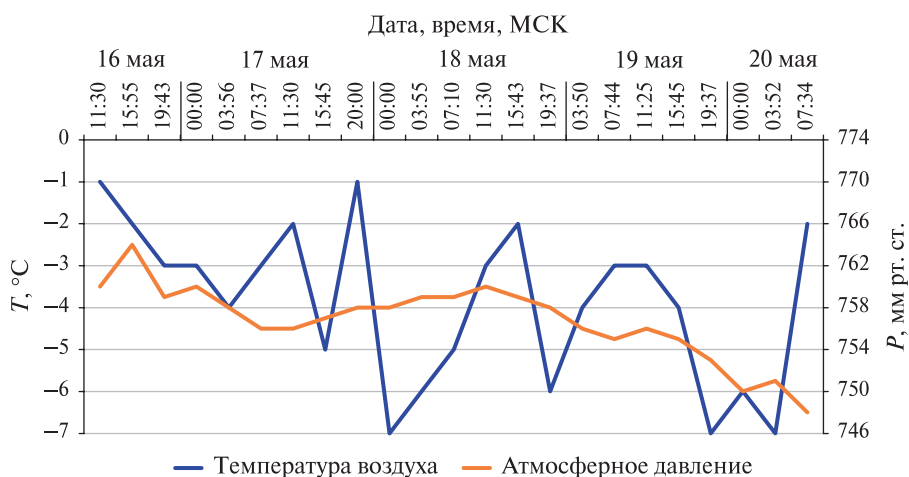


Рис. 4. Температура воздуха и атмосферное давление в районе следования атомного ледокола «Ямал»

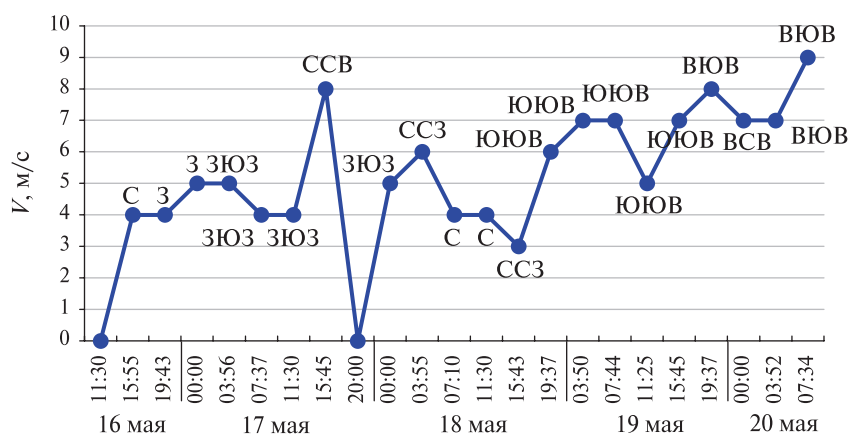


Рис. 5. Скорость и направление ветра в районе следования атомного ледокола «Ямал»

Ледовые условия на маршруте следования показаны на рис. 6 (см. с. 281). Представлено широтное распределение общей сплочённости, возрастного состава и торосистости ледяного покрова. Согласно визуальным наблюдениям специалистов Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), на маршруте 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 (70–120 см). Максимальное количество однолетнего среднего льда отмечалось в районе $75^{\circ}21' - 76^{\circ}01'$ с. ш. и достигало 5–6 баллов. На отдельных участках отмечалось увеличение количества молодых (10–30 см) и ниласовых (<10 см) льдов, как например в районе выхода из Обской губы, между $74^{\circ}25'$ и $75^{\circ}39'$ с. ш., а также вблизи мыса Желания, в районе $76^{\circ}54' - 77^{\circ}18'$ с. ш. Торосистость льда на большей части маршрута составляла 1–2 балла по 5-балльной шкале. В районе $74^{\circ}00'$ с. ш. наблюдалось увеличение торосистости до 3 баллов, а в районе $77^{\circ}14'$ с. ш. — до 4 баллов.

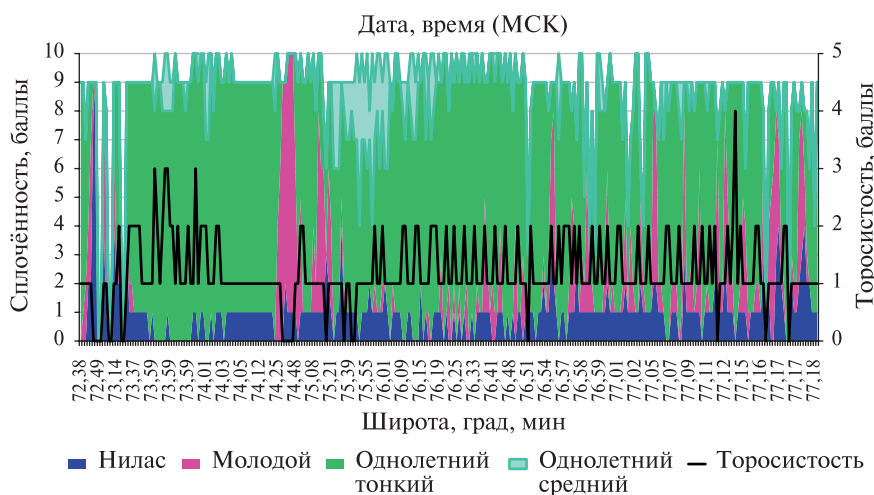


Рис. 6. Широтное распределение общей сплочённости, возрастного состава и торосистости ледяного покрова на маршруте Обская губа – мыс Желания в период с 16 по 24 мая 2024 г.

Описание данных

Данные, полученные в ходе наблюдений радиометрическим комплексом, представлены в двух форматах: исходные данные в виде целочисленных отсчётов, принятые и записанные в файлы специальным программным обеспечением, автоматизировавшим работу комплекса, и калиброванные значения, приведённые к абсолютным шкалам в соответствующих физических единицах. По аналогии с обозначениями, принятыми в спутниковом дистанционном зондировании, будем называть данные первого типа данными уровня L0, а данные второго типа — уровня L1B.

Данные обоих уровней записаны в текстовые файлы табличного формата с разделительным символом табуляции (ASCII-код 09). Принято следующее соглашение по наименованию файлов. Шаблон имени файла данных уровня L0 имеет вид Arctic2024_UID(DD-MM-YY_hh-mm-ss).txt, где UID — уникальный идентификатор (порядковый номер) файла в пределах текущих суток из трёх цифр; DD-MM-YY — дата начала записи; hh-mm-ss — время начала записи. По умолчанию под «временем» понимается время записывающего компьютера, синхронизованное с судовым (московским) временем.

Файлы данных обоих уровней организованы в виде таблиц с фиксированным набором колонок. Каждой колонке соответствуют значения, принимаемые от определённого датчика, либо вычисляемые в процессе записи данных в качестве служебной информации. Запись таблиц производится построчно. Каждой строке, за исключением начальной, соответствует совокупность значений, полученных (вычисленных) в один и тот же момент времени. При отсутствии данных (например, в результате сбоя или потери связи с датчиком) реальное значение в файле данных уровня L0 заменялось прочерком (символ «—»). Начальная строка выполняет функцию заголовка и содержит условные символьные наименования соответствующих колонок. В *табл. 3* приведено описание всех колонок, составляющих файлы данных уровня L0.

Как видно из *табл. 3*, в файлах данных уровня L0 представлены далеко не все величины, заявленные выше, как измеряемые комплексом. К сожалению, в канале радиометра R05 регистрировалась наводка в форме меандра, происхождение которой не было выяснено в ходе наблюдений. Измерения температурных датчиков также оказались нестабильными, кроме одного, измерявшего температуру холодного чёрного тела (они использованы для внешней радиометрической калибровки комплекса). Указанная информация исключена из распространяемых файлов данных уровня L0.

Кроме того, из-за технического сбоя 16 мая до 19:30 не записывались показания приёмной антенны GPS/ГЛОНАСС (*англ.* Global Positioning System / Глобальная навигационная

спутниковая система) (маршрут восстановлен по журналу ледовых наблюдений ААНИИ), а начиная с 23 мая перестал работать измерительный канал R03. Для сохранения единого формата представления отсутствующие данные заменены в файлах данных прочерком («—»), но соответствующие колонки сохранены.

Таблица 3. Содержимое файлов данных уровня L0

Колонка	Тип значения	Расшифровка	
1. MRK	Целое без знака	Маркер смены режимов работы и других событий (служебная информация)	
2. Abs.Day	Десятичная дробь	Точное число суток (включая долю текущих суток от полных) с начала текущего года до момента измерений	
3. hh	Целое без знака	Час измерений (от 0 до 23) по судовому времени	
4. mm		Минута измерений (от 0 до 59) по судовому времени	
5. ss		Секунда измерений (от 0 до 59) по судовому времени	
6. ms		Миллисекунда измерений (от 0 до 999) по компьютерному таймеру	
7. DD		День месяца измерений (от 1 до 31)	
8. MM		Номер месяца измерений (от 1 до 12)	
9. YYYY		Год измерений (2024)	
10. V_Pol_1		Целое со знаком	Показания в канале R08-1 36 ГГц ВП
11. H_Pol_1			« R08-1 36 ГГц ГП
12. V_Pol_2	« R08-2 36 ГГц ВП		
13. H_Pol_2	« R08-2 36 ГГц ГП		
14. R03	« R03 92 ГГц ВП		
15. AngleX_9	Угол отклонения оси зрения радиометрического комплекса от горизонта в сотых долях градуса (отрицательные значения — вниз, к надиру)		
16. AngleY_9	Угол поворота комплекса вокруг оси зрения в сотых долях градуса (отрицательные значения — против часовой стрелки)		
17. R54_NG	Опорная нагрузка R54 (для внутренней калибровки)		
18. R54_P1	Показания в канале R54 5,4 ГГц ГП		
19. R54_P2	« R54 5,4 ГГц ВП		
20. R54_TL	Температура опорной нагрузки R54		
21. P22L190	Показания в канале P22M 19,0 ГГц ВП		
22. P22R222	« P22M 22,2 ГГц ВП		
23. GPS_hour	Целое без знака		Час измерений по UTC (от 0 до 23) по информации приёмника GPS/ГЛОНАСС
24. GPS_min		Минута измерений по UTC (от 0 до 59) по информации приёмника GPS/ГЛОНАСС	
25. GPS_sec		Секунда измерений по UTC (от 0 до 59) по информации приёмника GPS/ГЛОНАСС	
26. GPS_ms		Миллисекунда измерений (от 0 до 999) по компьютерному таймеру	
27. GPS_lat	Целое со знаком	Широта измерений в условных единицах по информации приёмника GPS/ГЛОНАСС	
28. GPS_lon		Долгота измерений в условных единицах по информации приёмника GPS/ГЛОНАСС	

Примечание: UTC — Coordinated Universal Time.

В отличие от файлов данных уровня L0, разбитых на интервалы наблюдений длительностью не более одного часа для удобства первичной обработки, файлы данных уровня L1B

содержат посуточную калиброванную информацию. Шаблон файла данных уровня L1B имеет вид Arctic_LB1_YYYYMMDDv1.txt, где YYYY — номер года (2024); MM — номер месяца (05); DD — номер дня в месяце; v1 обозначает номер версии алгоритма калибровки. Таблица 4 содержит описание всех колонок, составляющих файлы данных уровня L1B. Отсутствующие значения (пропуски данных) отмечены в файлах строковым выражением NaN. Десятичным разделителем в дробных значениях является точка («.»).

Таблица 4. Содержимое файлов данных уровня L1B

Колонка	Тип значения	Расшифровка
1. MRK	Целое без знака	Маркер смены режимов работы и других событий (служебная информация)
2. Date_str	Строка	Дата и время измерений в формате «число-месяц-год час:минута:секунда»
3. Abs.Day	Десятичная дробь	Точное число суток (включая долю текущих суток от полных) с начала текущего года до момента измерений
4. Angle_FN		Угол оси зрения комплекса к надиру (0.0 соответствует направлению вертикально вниз), градусы
5. R08-1_36V		Яркостная температура в канале R08-1 36 ГГц ВП, К
6. R08-1_36H		« R08-1 36 ГГц ГП, К
7. R08-2_36V		« R08-2 36 ГГц ВП, К
8. R08-2_36H		« R08-2 36 ГГц ГП, К
9. P22M_19V		« P22M 19 ГГц ВП, К
10. P22M_22V		« P22M 22,2 ГГц ВП, К
11. R54_5H		« R54 5,4 ГГц ГП, К
12. R54_5V		« R54 5,4 ГГц ВП, К
13. R03_92V		« R03 92 ГГц ВП, К
14. GPS_lat		Северная широта в точке наблюдения, град
15. GPS_lon		Восточная долгота в точке наблюдения, град
16. T_CBB		Температура холодной нагрузки, °С

По результатам наблюдений наилучшую радиометрическую стабильность показал прибор P22M (каналы 19 ГГц ВП и 22,2 ГГц ПВ). Также высокостабильными были измерения приборов R08-1, -2 и R03. Наименее надёжными следует признать данные измерений R54. На удалении от сеансов калибровки расчётные значения радиояркостной температуры в канале 5,4 ГГц содержат большие погрешности из-за быстрых изменений температурного режима прибора в отсутствие термостабилизации. Авторы рассматривают возможность улучшения алгоритма калибровки этих данных в следующей версии обработки с использованием информации внутреннего калибровочного эталона.

Кроме того, из обработки исключены данные, полученные 16 мая, поскольку в этот день сеансы атмосферных наблюдений не дополнялись измерениями внешних калибровочных эталонов.

Заключение

В работе дано описание микроволновых радиометрических натуральных измерений собственного излучения морского льда, выполненных в ходе специальных ледовых наблюдений с борта атомного ледокола «Ямал» в мае 2024 г., проведённых совместно ААНИИ и ИКИ РАН. В том числе кратко описан измерительный комплекс, режимы, маршруты и интервалы

времени измерений, сопутствующие метеоусловия и ледовая обстановка. Приведена необходимая спецификация файлов исходной информации и данных после первичной обработки, включающей радиометрическую калибровку.

Описанные файлы данных размещены в открытом доступе на серверах ЦКП «ИКИ-Мониторинг» по адресу: <http://ocean.smislab.ru/data/MW/>.

Адаптация микроволнового радиометрического комплекса к условиям наблюдений с борта ледокола и проведение с его помощью подспутникового эксперимента выполнены в рамках темы государственного задания Института космических исследований РАН «Мониторинг», гос. регистрация № 122042500031-8 (Ермаков Д. М., Кузьмин А. В.). 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/>) (Алексеева Т. А., Сероветников С. С., Тихонов В. В., Афанасьева Е. В., Котельников В. Д.). При создании микроволнового радиометрического комплекса частично использованы программно-аппаратные решения, полученные в рамках темы государственного задания Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова 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., Бородкин В. А., Ермаков Д. М., Тихонов В. В., Кузьмин А. В., Афанасьева Е. В., Котельников В. Д., Юскаев Д. Ю., Козловский Е. В. Влияние интенсивного судоходства на изменение строения и динамики ледяного покрова в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. № 3 (в печати).
2. Афанасьева Е. В., Соколова Ю. В., Тихонов В. В., Ермаков Д. М. Проблемы использования данных космической радиолокационной съёмки при решении задачи автоматизации ледового картирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-9-27.
3. Бокучава Д. Д., Семенов В. А. Роль естественных колебаний и факторов внешнего воздействия на климат в потеплении середины XX века в Северном полушарии // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 3. С. 455–474. DOI: 10.31857/S2076673422030144.
4. Заболотских Е. В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-3515531128-151>.
5. Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Животовская М. А. и др. Спутниковое микроволновое зондирование морского льда Арктики: Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 9–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34.
6. Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А. и др. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65. DOI: 10.7868/S0205961413040076.
7. Кузьмин А. В., Садовский И. Н., Горшков А. А., Ермаков Д. М. Приборная платформа для надводных измерений морской поверхности и атмосферы // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 1. С. 83–91. DOI: 10.31857/S0205961420010054.
8. Саперштейн Е. Б., Макаров Е. И., Алексеева Т. А., Павлова Е. А. Новый подход в исследовании динамики ледового покрова Арктики и его практическое приложение в интересах судоходства // Тр. Крыловского гос. науч. центра. 2024. № S1. С. 168–176. EDN QALYWX.
9. Семенов В. А., Мартин Т., Беренс Л. К. и др. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей СМIP3 и СМIP5 // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.
10. 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.
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. *Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S. et al.* Comparison of arctic sea ice concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with summer and winter ship data // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Article 2481. <https://doi.org/10.3390/rs11212481>.
13. *Chen S.-Y., Kern S., Li X.-Q. et al.* Navigability of the Northern Sea Route for Arc7 ice-class vessels during winter and spring sea-ice conditions // *Advances in Climate Change Research*. 2022. V. 13. No. 5. P. 676–687. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.09.005>.
14. *Meier W.N., Hovelsrud G.K., van Oort B.E.H. et al.* Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity // *Reviews of Geophysics*. 2014. V. 52. No. 3. P. 185–217. DOI: [10.1002/2013RG000431](https://doi.org/10.1002/2013RG000431).
15. *Moore J.C., Shuji F.* Dielectric properties of ice containing acid and salt impurity at microwave and low frequencies // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. No. 86. P. 9769–9780. DOI: <https://doi.org/10.1029/93JB00710>.
16. *Naoki K., Ukita J., Nishio F., Nakayama M., Comiso J.C., Gasiewski A.* Thin sea ice thickness as inferred from passive microwave and in situ observations // *J. Geophysical Research: Ocean*. 2008. V. 113. Iss. C2. Article C02S16. <https://doi.org/10.1029/2007JC004270>.
17. *Shokr M.E., Wang Z., Liu T.* Sea ice drift and arch evolution in the Robeson Channel using the daily coverage of Sentinel-1 SAR data for the 2016–2017 freezing season // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. No. 11. P. 3611–3627. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-14-3611-2020>.
18. *Ulaby F.T., Long D.G.* Microwave radar and radiometric remote sensing. Ann Arbor: Univ. of Michigan Press. 2014. 984 p.
19. *Wernecke A., Notz D., Kern S., Lavergne T.* Estimating the uncertainty of sea-ice area and sea-ice extent from satellite retrievals // *The Cryosphere*. 2024. V. 18. P. 2473–2486. <https://doi.org/10.5194/tc-18-2473-2024>.
20. *Zhang Y., Sun X., Zha Y. et al.* Changing Arctic Northern Sea route and transpolar sea route: a prediction of route changes and navigation potential before mid-21st century // *J. Marine Science and Engineering*. 2023. V. 11. Article 2340. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11122340>.

The sea ice microwave radiometer data measured in May 2024 from Yamal nuclear icebreaker concurrent with satellite observations

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

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: d.m.ermakov@cosmos.ru

² *Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg 199397, Russia*

³ *Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch*
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia

⁴ *Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia*

In May 2024, as part of the LED-SMP-1/2024 expedition, along with special ship ice observations, an experiment on *in situ* measurements of the sea ice cover own microwave radiation concurrent with satellite survey was conducted. It was organized jointly by Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) and Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI RAS). Observations were carried out in the Kara Sea in two main modes corresponding to the measurement geometry of the domestic (module of temperature and humidity sensing of the atmosphere MTVZA-GYa) and foreign (Special Sensor Microwave Imager/Sounder, Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) satellite microwave radiometers at frequencies of 5.4, 19.0, 22.2, 36, 92 GHz. Additionally, regular sessions of atmospheric observations at various zenith angles and radiometric calibration using external loads were carried out. In total, about 112 hours of microwave radiometric measurements were accumulated in the observation sessions from May 16 to 24, accompanied by coordinate-time referencing, fixation of viewing angles, as well as registration of meteorological conditions and ice conditions parameters. The accumulated data are planned to be used to clarify the dielectric characteristics of various types of sea ice in the microwave range, as well as to test and develop algorithms for reconstructing sea ice cover parameters based on measurements of satellite microwave radiometers. The data obtained

in the experiment are described in detail in this paper and are presented in open access on the servers of the “IKI-Monitoring” Center for Collective Use.

Keywords: sea ice, *in situ* observations, field radiometric experiment concurrent with satellite survey, microwave radiometry, ice cover parameters

The adaptation of the microwave radiometric complex to the conditions of observations from the ice-breaker and conducting the field radiometric experiment were carried out within the framework of the state assignment of Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences “Monitoring”, state registration No. 122042500031-8 (Ermakov D. M., Kuzmin A. V.). The organization and implementation of complex ice and meteorological observations within the framework of the LED-SMP-1/2024 expedition was supported by Russian Science Foundation, grant No. 23-17-00161 (<https://rscf.ru/project/23-17-00161/>) (Alekseeva T. A., Serovetnikov S. S., Tikhonov V. V., Afanasyeva E. V., Kotelnikov V. D.). The microwave radiometric complex was in part created using software and hardware solutions obtained within the framework of the state assignment of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences (IRE RAS) “Cosmos-2”, state registration No. 0030-2019-0008. The authors thank the IRE RAS employees M. T. Smirnov, V. P. Savorsky and B. G. Kutuzova for their assistance in preparing the field radiometric experiment.

Accepted: 01.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-275-287

References

1. Alekseeva T. A., Serovetnikov S. S., Makarov E. I., Borodkin V. A., Ermakov D. M., Tikhonov V. V., Kuzmin A. V., Afanasyeva E. V., Kotelnikov V. D., Yuskaev D. Yu., Kozlovsky E. V., 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, Vol. 70, No. 3 (in print, in Russian).
2. Afanasyeva E. V., Sokolova J. V., Tikhonov V. V., Ermakov D. M., Problems of using space-borne SAR data in solving the issue of ice charting automation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 1, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-9-27.
3. Bokuchava D. D., Semenov V. A., The role of natural fluctuations and factors of external forcing in the early 20th century warming in Northern hemisphere, *Ice and Snow*, 2022, Vol. 62, No. 3, pp. 455–474 (in Russian), DOI: 10.31857/S2076673422030144.
4. Zabolotskikh E. V., Review of methods to retrieve sea-ice parameters from satellite microwave radiometer data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, V. 55, No. 1, pp. 128–151, <https://doi.org/10.31857/S0002-3515531128-151>.
5. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Zhivotovskaya M. A. et al., Satellite microwave remote sensing of the arctic sea ice: Review, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 1, pp. 9–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-9-34.
6. Ivanov V. V., Alexeev V. A., Alexeeva T. A. et al., Does arctic ocean ice cover become seasonal?, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 50–65 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413040076.
7. Kuzmin A. V., Sadovskii I. N., Gorshkov A. A., Ermakov D. M., Instrumental platform for overhead measurements of the sea surface and atmosphere, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2020, No. 1, pp. 83–91, DOI: 10.31857/S0205961420010054.
8. Sapershtein E. B., Makarov E. I., Alekseeva T. A., Pavlova E. A., New approach to Arctic ice dynamics research and its applications in Arctic shipping, *Trans. Krylov State Research Centre*, 2024, No. S1, pp. 168–176 (in Russian), EDN QALYWX.
9. Semenov V. A., Martin T., Behrens L. K. et al., Arctic sea ice area changes in CMIP3 and CMIP5 climate models’ ensembles, *Ice and Snow*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 77–107 (in Russian), DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-77-107.
10. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A. et al., Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions: Review, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 65–84, DOI: 10.7868/S0205961416040072.
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, Vol. 17, No. 3, pp. 51–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-51-65.
12. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S. et al., Comparison of arctic sea ice concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 algorithms with summer and winter ship data, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Article 2481, <https://doi.org/10.3390/rs11212481>.

13. Chen S-Y., Kern S., Li X-Q. et al., Navigability of the Northern Sea Route for Arc7 ice-class vessels during winter and spring sea-ice conditions, *Advances in Climate Change Research*, 2022, Vol. 13, No. 5, pp. 676–687, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.09.005>.
14. Meier W.N., Hovelsrud G. K., van Oort B. E. H. et al., Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity, *Reviews of Geophysics*, 2014, Vol. 52, No. 3, pp. 185–217, DOI: [10.1002/2013RG000431](https://doi.org/10.1002/2013RG000431).
15. Moore J.C., Shuji F., Dielectric properties of ice containing acid and salt impurity at microwave and low frequencies, *J. Geophysical Research*, 1993, Vol. 98, No. 86, pp. 9769–9780, DOI: <https://doi.org/10.1029/93JB00710>.
16. Naoki K., Ukita J., Nishio F. et al., Thin sea ice thickness as inferred from passive microwave and in situ observations, *J. Geophysical Research: Ocean*, 2008, Vol. 113, Issue C2, Article C02S16, <https://doi.org/10.1029/2007JC004270>.
17. Shokr M. E., Wang Z., Liu T., Sea ice drift and arch evolution in the Robeson Channel using the daily coverage of Sentinel-1 SAR data for the 2016–2017 freezing season, *The Cryosphere*, 2020, Vol. 14, No. 11, pp. 3611–3627, DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-14-3611-2020>.
18. Ulaby F. T., Long D. G., *Microwave radar and radiometric remote sensing*, Ann Arbor: Univ. of Michigan Press, 2014, 984 p.
19. Wernecke A., Notz D., Kern S., Lavergne T., Estimating the uncertainty of sea-ice area and sea-ice extent from satellite retrievals, *The Cryosphere*, 2024, Vol. 18, pp. 2473–2486, <https://doi.org/10.5194/tc-18-2473-2024>.
20. Zhang Y., Sun X., Zha Y. et al., Changing Arctic Northern Sea Route and transpolar sea route: A prediction of route changes and navigation potential before mid-21st century, *J. Marine Science and Engineering*, 2023, Vol. 11, Article 2340, DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11122340>.