Алгоритм VASIA2: оценка точности восстановления сплочённости морского льда на основе данных радиометра AMSR2

Ю. В. Соколова[1], В. В. Тихонов[1,2]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
E-mails: j.sokolova@cosmos.ru, vtikhonov@asp.iki.rssi.ru
[2] *Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия*

Рассматривается возможность использования данных микроволнового радиометра AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) для определения сплочённости морского льда (СМЛ) с помощью отечественного алгоритма VASIA2 (*англ.* Variation Arctic Sea Ice Algorithm 2). Он был разработан учёными Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (ИФА РАН) и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) первоначально для радиометров серии SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder). Оценка точности определения СМЛ по алгоритму VASIA2 выполнялась для четырёх районов Канадского сектора Арктики за период 2022–2024 гг. с использованием натурных ледовых и метеорологических данных полярных станций, а также ледовых карт Канадской ледовой службы (*англ.* Canadian Ice Service). Полученные результаты сопоставлялись с оценками, рассчитанными по алгоритму ASI (*англ.* Arctic Radiation and Turbulence Interaction STudy Sea Ice) для различных ледовых и метеорологических условий. Анализ погрешностей продемонстрировал наилучшую точность алгоритма VASIA2 в зимний период. Периоды таяния и замерзания в условиях неподвижного льда характеризуются высокими значениями ошибок, но сопоставимыми по величине с ошибками алгоритма ASI. В условиях очень сплочённых старых льдов в период таяния алгоритм VASIA2 показал меньшие средние ошибки по сравнению с однолетними льдами.

Ключевые слова: сплочённость морского льда, припай, спутниковая микроволновая радиометрия, VASIA2, ASI, AMSR2

Одобрена к печати: 28.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-69-87

Введение

Важнейшим параметром в анализе трендов изменения ледяного покрова считается сплочённость морского льда (СМЛ). Восстановление СМЛ (процентное соотношение площади льда к площади открытой воды) по данным спутниковой микроволновой радиометрии осуществляется с помощью специальных математических алгоритмов. Большинство из них было разработано для данных, получаемых радиометрами SSM/I (*англ.* Special Sensor Microwave/Imager), SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder), AMSR-E (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer — Earth Observing System) и AMSR2 (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer 2), различными научными центрами или исследовательскими институтами (Тихонов и др., 2016). Анализу точности алгоритмов и их сравнению между собой посвящено множество исследований и обзоров (Alekseeva et al., 2019; Ivanova et al., 2015; Kern et al., 2019, 2020).

Первый отечественный алгоритм VASIA (*англ.* Variation Arctic Sea Ice Algorithm) был разработан учёными Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (ИФА РАН) и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) в 2013 г. (Тихонов и др., 2013, 2014). В его основе лежит электродинамическая модель собственного микроволнового излучения арктического ледяного покрова, учитывающая физические и структурные характеристики слоистой среды, состоящей из морского льда и снега (Репина и др., 2012). В 2015 г.

появилась вторая модифицированная версия алгоритма — VASIA2 (*англ.* Variation Arctic Sea Ice Algorithm 2) (Тихонов и др., 2015; Tikhonov et al., 2015), позволяющая восстанавливать не только значения СМЛ, но и количество (в %) снежниц на ледяном покрове. Методика определения СМЛ была разработана для данных радиометра SSM/I и предполагала использование трёх тангенсов угла наклона прямой, соединяющей две точки на кривой зависимости яркостной температуры от частоты для одной поляризации, соответствующие двум рабочим частотам радиометра (Тихонов и др., 2015; Tikhonov et al., 2015). Данный алгоритм отличается от большинства аналогов тем, что основывается не на экспериментальных данных, а на теоретической модели излучения «водная поверхность – ледяной покров – снежный покров – атмосфера». Кроме этого, алгоритм VASIA2 не использует точек привязки (*англ.* tie points), представляющих собой фиксированные значения излучательной способности или яркостной температуры морского льда и открытой воды, для последующего расчёта СМЛ по данным спутниковой микроволновой радиометрии.

В работе (Alekseeva et al., 2019) была впервые проведена детальная оценка точности алгоритма VASIA2 с использованием судовых данных, а также выполнено сравнение с широко используемыми алгоритмами NT (*англ.* NASA Team; NASA — National Aeronautics and Space Administration) и ASI (*англ.* Arctic Radiation and Turbulence Interaction STudy Sea Ice) отдельно для зимнего и летнего периода. Авторы показали, что все три алгоритма имеют близкие значения средней ошибки определения СМЛ (менее 1 балла). В летний и зимний период алгоритмы переоценивали общую сплочённость ледяного покрова в редких льдах (сплочённость 1–3 балла) и недооценивали — в сплочённых (7–8 баллов), очень сплочённых (9–10 баллов) и сплошных (10 баллов) льдах. Максимальные средние ошибки в определении сплочённости у всех алгоритмов наблюдались в разреженных льдах (4–6 баллов). В работе (Alekseeva et al., 2019) диапазон 0–10 баллов эквивалентен шкале 0–100 % (1 балл СМЛ соответствует 10 %). Далее в настоящей статье используется процентная шкала СМЛ.

В исследовании (Shukurov, Semenov, 2021) ряды СМЛ, рассчитанные по алгоритмам NT2 (*англ.* NASA Team 2) и VASIA2, сравнивались с данными судовых и самолётных визуальных наблюдений ААНИИ по району пролива Вилькицкого для летне-осеннего периода навигации (июнь – ноябрь) за 1987–2013 гг. Алгоритм VASIA2 показал более точные среднемесячные оценки СМЛ, чем NT2. При этом VASIA2 завышал СМЛ в диапазоне низких значений (0–30 %), тогда как NT2 демонстрировал более точные результаты. И напротив, в диапазоне средних и высоких значений (30–100 %) алгоритм VASIA2 оказался точнее, в то время как NT2 в основном недооценивал СМЛ.

Дальнейшее развитие отечественного алгоритма восстановления СМЛ VASIA2 остаётся сегодня актуальной задачей. В 2025 г. Министерство обороны США объявило о завершении работы космической миссии DMSP (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program) к концу 2026 г., которая на протяжении нескольких десятилетий предоставляла научному сообществу данные радиометров SSM/I и SSMIS, лежащие в основе множества информационных продуктов (https://nsidc.org/data/user-resources/data-announcements/user-notice-ssmis-processing-will-now-continue-through-september-2026, https://osi-saf.eumetsat.int/community/stories/implications-end-ssmis-data-osi-saf-products).

Таблица 1. Основные характеристики радиометров SSM/I, SSMIS и AMSR2

Характеристика радиометра	SSM/I	SSMIS	AMSR2
Угол сканирования, град	53,1	53,1	55,0
Ширина полосы сканирования, км	1400	1700	1700
Пространственное разрешение пикселя, км	12,5–25,0	12,5–75,0	5–10
Диапазон частот, ГГц	19,35–85,00	19,35–183,31	6,9–89,0
Количество частот/каналов	4/7	21/24	7/16
Рабочие частоты для алгоритма VASIA2, ГГц	19,35; 37,00; 85,00	19,35; 37,00; 91,655	18,7; 36,5; 89,0

Модельные расчёты и методика восстановления СМЛ, послужившие основой алгоритма VASIA2, используют рабочие частоты радиометра SSM/I. Технические характеристики радиометра AMSR2 имеют высокую степень сходства с приборами миссии DMSP, но не являются идентичными (*табл. 1*). В работе (Tikhonov et al., 2015) была представлена теоретическая оценка изменения значений тангенсов, применяемых алгоритмом VASIA2, при замене каналов радиометра SSM/I на каналы радиометров SSMIS или AMSR2. Эта оценка показала, что разница значений тангенсов, рассчитанных по данным разных радиометров, составляет менее 6 %. Откуда делался вывод, что использование другого набора частот (SSMIS или AMSR2) существенно не влияет на результат алгоритма. Однако практического подтверждения этого вывода сделано не было.

В настоящей работе впервые рассматривается возможность использования радиометра AMSR2 в качестве альтернативного источника данных для алгоритма VASIA2 и оценивается точность полученных результатов. Для более надёжной оценки работы алгоритма в рамках этого исследования предлагается рассматривать районы с неподвижным льдом (припаем). Припайный лёд представляет собой удобный полигон для различных спутниковых исследований, в том числе для анализа ошибок алгоритмов определения СМЛ. Припай практически безошибочно дешифрируется по спутниковым данным. Период от установления припая до его разрушения гарантирует 100%-ю сплочённость льда в данном районе, что позволяет получить продолжительный ряд наблюдений для оценки ошибок определения СМЛ. Кроме этого, в течение всего ледового сезона в рассматриваемой точке сохраняется один и тот же лёд (одного генезиса), но на разных стадиях развития (разной толщины). В отличие от дрейфующего, припайный лёд будет в меньшей степени подвержен таким динамическим явлениям, как торошение и наслоение, и позволит глубже проанализировать влияние толщины льда и атмосферных факторов на возникновение ошибок. Аналогичный подход был использован в публикации (Алексеева и др., 2022) для оценки влияния загрязнённого льда на ошибки определения СМЛ по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Дополнительно рассматривается район дрейфующих старых льдов с преобладающей сплочённостью около 100 %, поскольку эффективность работы алгоритма VASIA2 ранее в этих условиях не исследовалась.

Далее в настоящей статье представлен совместный анализ рядов СМЛ, полученных по алгоритму VASIA2, метеорологических и ледовых данных полярных станций, а также информации ледовых карт. Точность восстановления СМЛ по алгоритму VASIA2 сравнивается с результатами алгоритма ASI, изначально разработанного для данных SSM/I (Kaleschke et al., 2001) и позже доработанного для радиометров серии AMSR (Spreen et al., 2008). Выбор в пользу алгоритма ASI был также обусловлен необходимостью последующего сравнения с результатами, представленными в работе (Alekseeva et al., 2019).

Регион исследования

В качестве региона исследования для настоящей работы был выбран Канадский Арктический архипелаг (*рис. 1*), что объясняется следующими причинами:

- Наличие припая в проливах архипелага на протяжении почти всего ледового сезона, который позволяет однозначно оценивать точность восстановления сплошных льдов (СМЛ равна 100 %) алгоритмами.
- Доступность натурных и других вспомогательных данных для анализа. На сайте правительства Канады (https://www.canada.ca) представлены архивные региональные ледовые карты, а также архивные ледовые и метеорологические данные полярных станций.
- Наличие больших глубин в проливах и удалённость от крупных рек, что исключает фактор формирования «грязного» льда, влияющего на ошибки определения СМЛ (Алексеева и др., 2022; Тихонов и др., 2025).

Исследование проводилось для периода 2022–2024 гг.

Получение рядов значений яркостной температуры (в K) и ледовых характеристик осуществлялось в точках, расположенных вблизи четырёх полярных станций на побережье островов Канадского Арктического архипелага: Cambridge Bay, Resolute, Eureka и Alert. В качестве основных для анализа использовались районы станций Cambridge Bay, Resolute и Eureka. В области станции Alert припай обычно не образуется, однако её было решено включить в анализ, поскольку в этом районе Арктического бассейна в течение всего года преобладают очень сплочённые старые льды (СМЛ 90–100 %). В радиусе 100 км от каждой полярной станции выбиралась точка для последующего получения рядов СМЛ по двум алгоритмам (см. *рис. 1*). В районе станции Cambridge Bay была выбрана точка YCB, для Resolute — точка YRB, для Eureka — точка WEU и для Alert — точка YLT (*табл. 2*).



Рис. 1. Карта расположения точек для извлечения и анализа данных дистанционного зондирования Земли вблизи полярных станций Cambridge Bay, Resolute, Eureka и Alert (Канадский Арктический архипелаг)

Таблица 2. Координаты точек, выбранных для исследования

Название точки	Координаты	
	с. ш.	з. д.
YCB	68° 36′ 00″	103° 50′ 20″
YRB	74° 49′ 12″	97° 16′ 12″
WEU	80° 27′ 00″	86° 51′ 22″
YLT	83° 10′ 37″	65° 25′ 48″

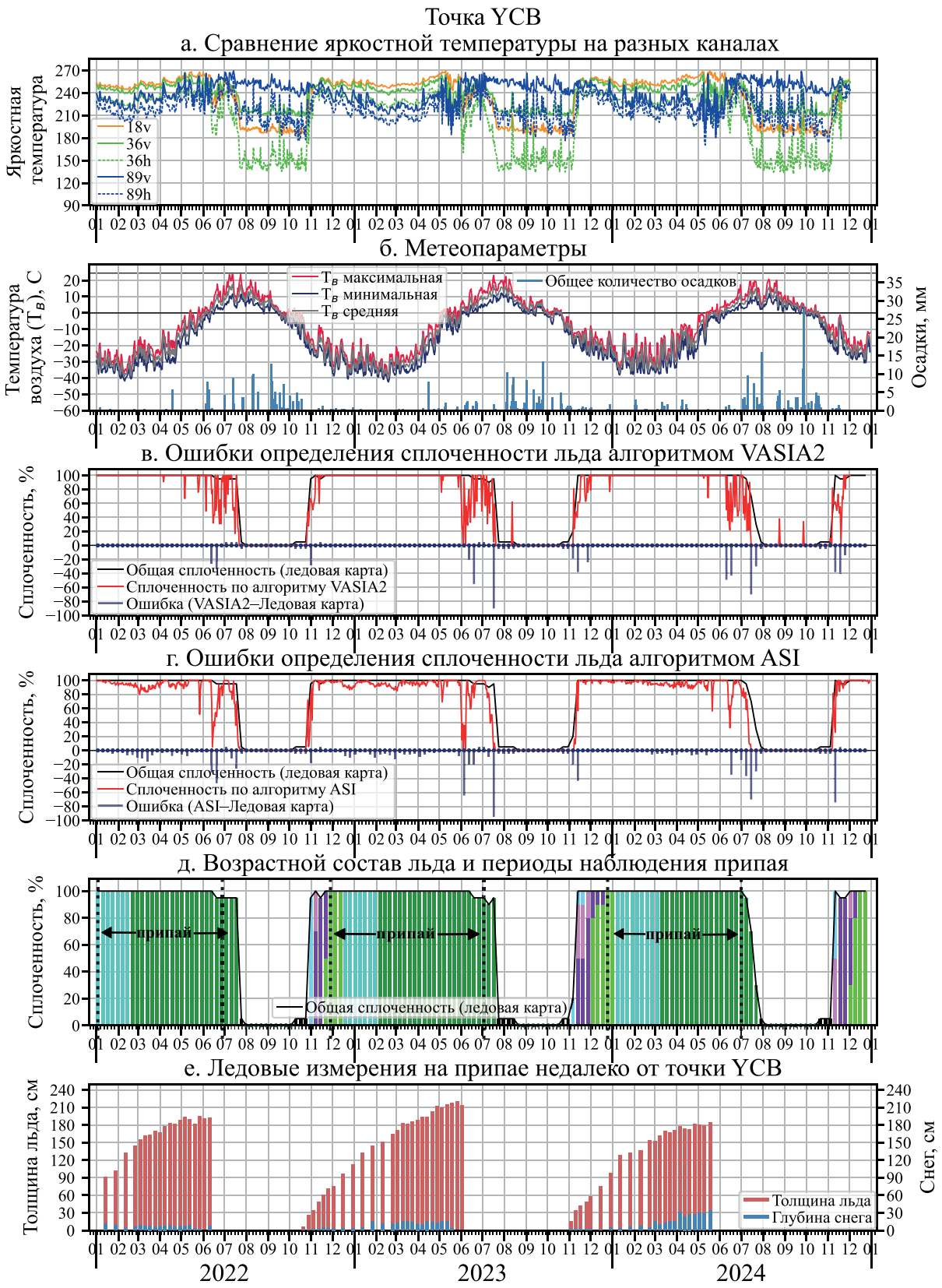


Рис. 2. Графики изменения параметров для точки YCB за 2022–2024 гг.: *а* — яркостная температура (в K) на различных каналах радиометра AMSR2; *б* — метеорологические параметры (температура воздуха и количество осадков), регистрируемые на полярной станции Cambridge Bay; *в* — СМЛ по алгоритму VASIA2 и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *г* — СМЛ по алгоритму ASI и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *д* — возрастной состав льда, в том числе в период наблюдения припая; *е* — толщина льда и высота снега на припае в районе полярной станции Cambridge Bay

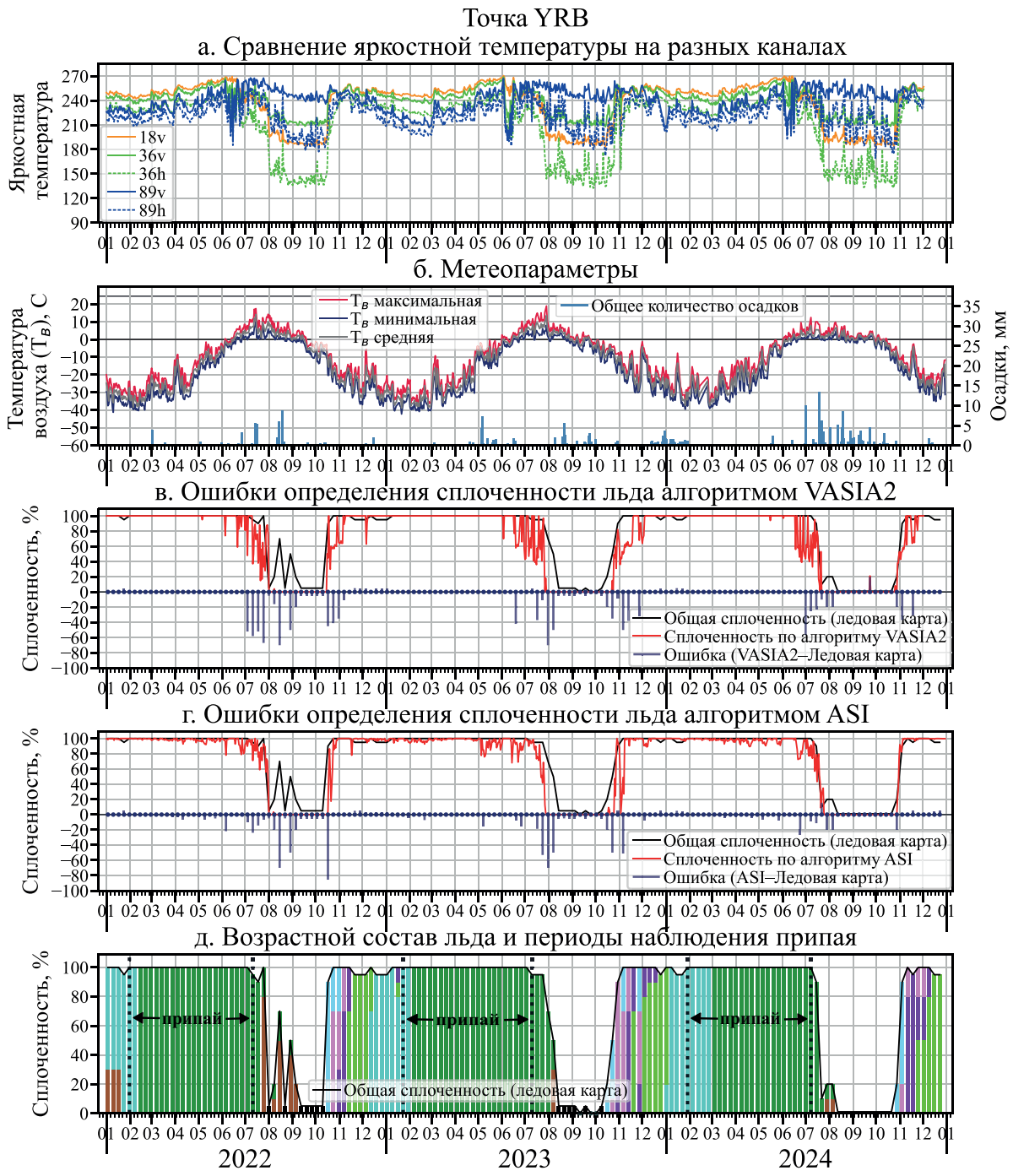


Рис. 3. Графики изменения параметров для точки YRB за 2022–2024 гг.: *а* — яркостная температура (в K) на различных каналах радиометра AMSR2; *б* — метеорологические параметры (температура воздуха и количество осадков), регистрируемые на полярной станции Resolute; *в* — СМЛ по алгоритму VASIA2 и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *г* — СМЛ по алгоритму ASI и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *д* — возрастной состав льда, в том числе в период наблюдения припая

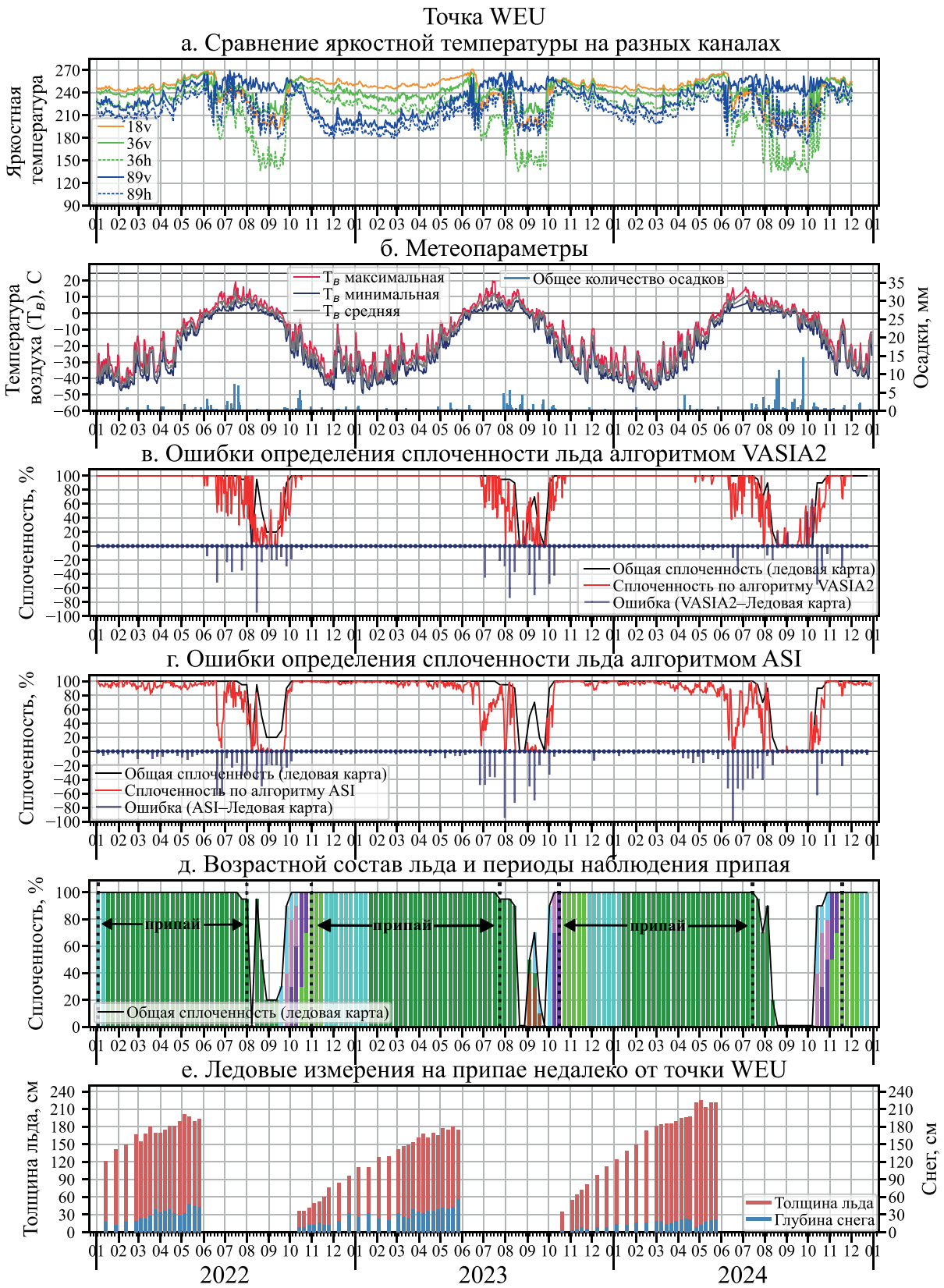


Рис. 4. Графики изменения параметров для точки WEU за 2022–2024 гг.: *а* — яркостная температура (в K) на различных каналах радиометра AMSR-2; *б* — метеорологические параметры (температура воздуха и количество осадков), регистрируемые на полярной станции Eureka; *в* — СМЛ по алгоритму VASIA2 и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *г* — СМЛ по алгоритму ASI и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *д* — возрастной состав льда, в том числе в период наблюдения припая; *е* — толщина льда и высота снега на припае в районе полярной станции Eureka

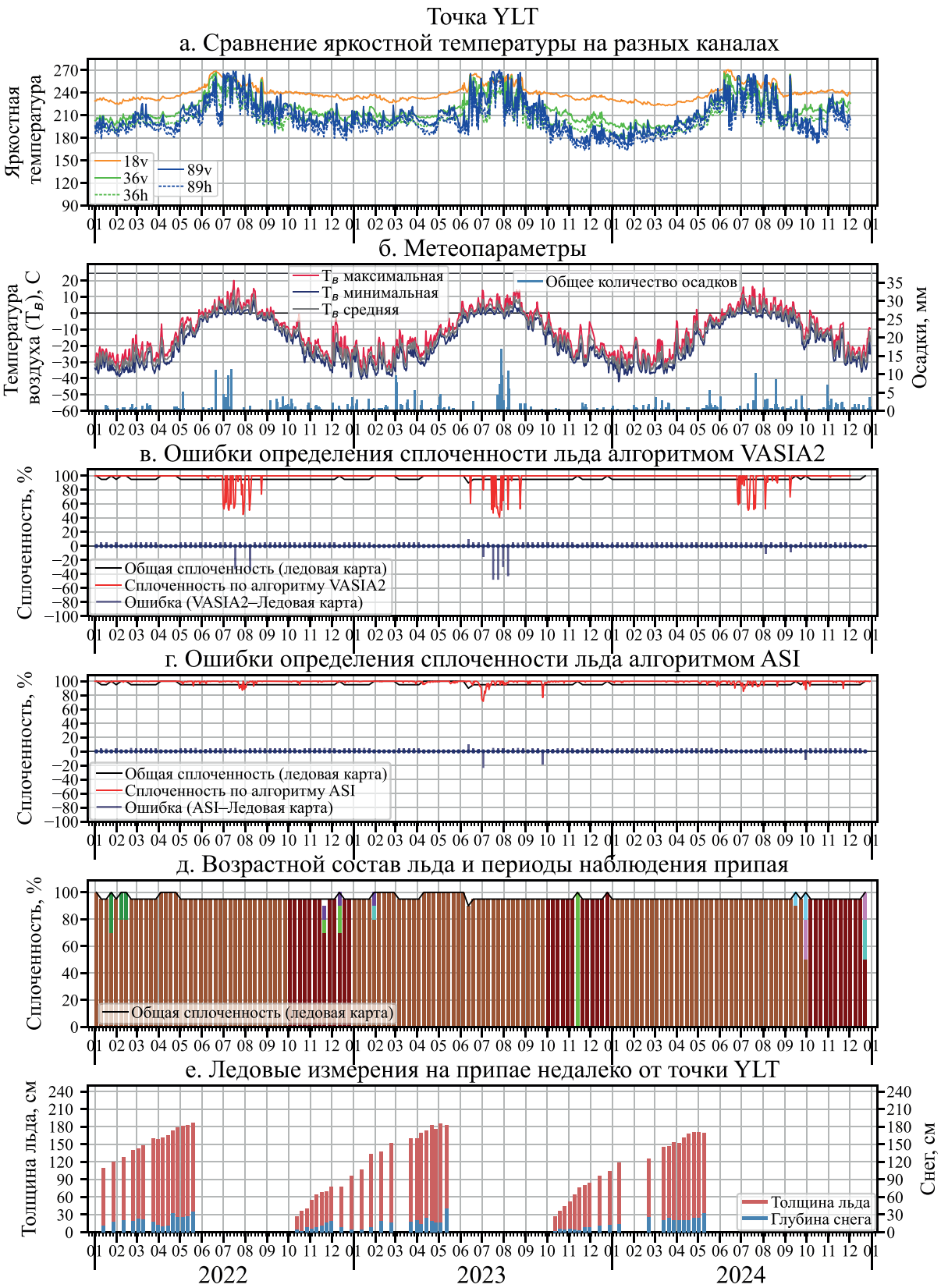


Рис. 5. Графики изменения параметров для точки YLT за 2022–2024 гг.: *а* — яркостная температура (в K) на различных каналах радиометра AMSR-2; *б* — метеорологические параметры (температура воздуха и количество осадков), регистрируемые на полярной станции Alert; *в* — СМЛ по алгоритму VASIA2 и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *г* — СМЛ по алгоритму ASI и допускаемые им ошибки относительно ледовых карт; *д* — возрастной состав льда, в том числе в период наблюдения припая; *е* — толщина льда и высота снега на припае в районе полярной станции Alert

Данные и методы

При анализе использовались следующие входные данные за период 2022–2024 гг.:

1. Ежедневные поля яркостной температуры на частотах 18,7; 36,5; 89,0 ГГц микроволнового радиометра AMSR2 (https://data.seaice.uni-bremen.de/).
2. Растровые карты СМЛ Северного полушария, построенные по алгоритму ASI (версия 5,4), от Бременского университета (*нем.* Universität Bremen) (https://data.seaice.uni-bremen.de/).
3. Данные по толщине льда и высоте снега, полученные на припае в районе канадских полярных станций Cambridge Bay, Resolute, Eureka и Alert (https://www.canada.ca/).
4. Метеорологические данные (приземная средняя, минимальная и максимальная суточная температура воздуха, общее количество осадков за сутки), зарегистрированные на станциях Cambridge Bay, Resolute, Eureka и Alert (https://climatedata.ca/download/).
5. Еженедельные региональные ледовые карты западной и восточной части канадского сектора Арктики, выпускаемые Канадской ледовой службой (*англ.* Canadian Ice Service) (Canadian..., 2006; https://iceweb1.cis.ec.gc.ca/Archive/).
6. Данные дистанционного зондирования Земли, полученные с помощью оптических радиометров MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) и радиолокационных спутников серии Sentinel-1 (https://worldview.earthdata.nasa.gov/, https://browser.dataspace.copernicus.eu/).

Для каждой из четырёх точек (YCB, YRB, WEU и YLT) были извлечены ряды яркостной температуры, измеренной радиометром AMSR2 на частоте 18,7 ГГц на вертикальной поляризации, а также на частотах 36,5 и 89,0 ГГц на вертикальной и горизонтальной поляризации. На основе этих микроволновых данных рассчитаны значения СМЛ по алгоритму VASIA2 согласно методике, представленной в работах (Тихонов и др., 2015; Tikhonov et al., 2015). Кроме этого, по каждой точке получены значения ледовых характеристик из региональных ледовых карт (общая и частная сплочённость льда, стадия развития и форма льда).

Для всех точек были также извлечены ряды значений СМЛ по алгоритму ASI из растровых карт распределения сплочённости в Северном полушарии. Алгоритм ASI базируется на расчёте поляризационной разности (разность значений яркостной температуры на вертикальной и горизонтальной поляризации) высокочастотного канала 89,0 ГГц радиометра AMSR2. Для учёта атмосферного влияния используется общая коррекция атмосферной непрозрачности, а также погодные фильтры для устранения ложных значений СМЛ над открытой водой. Методика расчёта дополнительно предполагает использование двух точек привязки для 100%-й и 0%-й СМЛ (Spreen et al., 2008).

Метеорологические и ледовые данные полярных станций Cambridge Bay, Resolute, Eureka и Alert были сопоставлены по датам наблюдений с рядами яркостной температуры в микроволновом диапазоне и значений СМЛ для точек YCB, YRB, WEU и YLT.

В результате обработки всей входной информации сформирована единая таблица по каждой точке, включающая ежедневные спутниковые микроволновые измерения (яркостная температура и СМЛ), ледовые характеристики (по материалам ледовых карт), а также данные наблюдений *in situ*.

На основе сформированных комплексных таблиц для каждой точки за рассматриваемый временной период было построено несколько видов графиков (*рис. 2–5*):

А. Динамика яркостной температуры для каналов 18v, 36h, 36v, 89h и 89v, где 18 соответствует частоте 18,7 ГГц, 36 — 36,5 ГГц, 89 — 89,0 ГГц, символ «v» соответствует вертикальной поляризации (*англ.* vertical), а символ «h» — горизонтальной поляризации (*англ.* horizontal). Для исключения выбросов, связанных с техническими сбоями радиометра AMSR2, были исключены все значения, превышающие величину 300 K (см. *рис. 2а–5а*).

Б. Ход максимальной, минимальной и средней суточной температуры воздуха, а также столбчатые графики общего количества осадков (см. *рис. 2б–5б*).

В. График изменения общей СМЛ по алгоритму VASIA2 и значения допускаемых им ошибок относительно ледовых карт. Ошибка рассчитывается в виде разницы между значениями СМЛ по алгоритму VASIA2 и ледовой карте. Поскольку региональные ледовые карты выпускаются Канадской ледовой службой один раз в неделю, то значения ошибок отображаются на графике в виде вертикальных линий с дискретностью в 7 дней. Точка на графике соответствует ошибке равной нулю (см. *рис. 2в–5в*).

Г. График изменения общей СМЛ по алгоритму ASI и значения допускаемых им ошибок относительно ледовых карт (аналогично графику, описанному в пункте *в*) (см. *рис. 2г–5г*).

Д. График динамики возрастного состава льда, построенный в виде столбчатых диаграмм по данным региональных ледовых карт для района рассматриваемой точки. На графике каждый вертикальный столбец отображает соотношение стадий развития льда в пределах обширной ледовой зоны, в которую попадает точка. Цветом кодируется стадия развития (возраст) льда согласно легенде (*табл. 3*). Высота каждого сегмента указывает на величину частной сплочённости. Вертикальные чёрные пунктирные линии на графике ограничивают период существования припая, определённый по ледовым картам (SIGRID-3..., 2010) (см. *рис. 2д–5д*). Согласно номенклатуре морских льдов (WMO..., 2014) под старыми льдами понимаются морские льды, которые подвергались таянию, по крайней мере, в течение одного лета. К ним относятся остаточный однолетний, двухлетний и многолетний лёд. К многолетним льдам причисляется лёд старше двух лет и толщиной более 3 м. В *табл. 3* и на графиках распределения возрастного состава льда отображаются как многолетние, так и старые льды (см. *рис. 2д–5д*). Далее в тексте эти два типа льда для простоты будут именоваться старыми, поскольку это не противоречит классификации.

Е. Измерения толщины льда и высоты снега на припае в районе полярных станций Cambridge Bay, Resolute, Eureka и Alert (см. *рис. 2е*, *4е*, *5е*). Измерения представлены в виде столбчатых диаграмм с дискретностью 7–14 дней. Для станции Resolute (точка YRB) данные за рассматриваемый период отсутствуют.

Таблица 3. Легенда к графику возрастного состава льда

Возраст (стадия развития) льда	Толщина льда, см	Цвет на графике
Начальные виды (иглы, сало, шуга, снежура)	<10	
Нилас (тёмный, светлый)	<10	
Серый	10–15	
Серо-белый	15–30	
Тонкий однолетний	30–70	
Средний однолетний	70–120	
Толстый однолетний	>120	
Старый	–	
Многолетний	Около 300 и более	
Отдельно плавающие льдины, айсберговые воды	–	

Для временных рядов, полученных по каждой точке, были выделены несколько периодов, характеризующихся разными ледовыми и метеорологическими условиями, для которых рассчитывались средняя (*англ.* Bias) и среднеквадратическая (*англ.* Root Mean Square Error — RMSE) ошибки определения СМЛ алгоритмами VASIA2 и ASI. Статистические показатели вычислялись для разности между значениями алгоритма и ледовой карты. Для припайного льда ошибка (разность) рассчитывалась ежедневно в течение всего периода его существования. В случае дрейфующего льда ошибка определения СМЛ оценивалась только для дат

выпуска региональных ледовых карт. Для средних ошибок также определены 95%-е доверительные интервалы (ДИ) на основе *t*-распределения Стьюдента для подтверждения статистической надёжности расчётов, поскольку некоторые периоды были представлены небольшими выборками наблюдений (менее 50 наблюдений).

Для условий преобладания старых дрейфующих льдов в зимний и летний период проведён дополнительный визуальный анализ данных в районе точки YLT (площадью 12,5×12,5 км). Целью анализа выступала оценка погрешности, которую ледовая карта может вносить в ошибку определения СМЛ алгоритмами из-за динамических факторов. Совместный анализ ледовых карт и спутниковых данных показал, что в зимний период дрейф льда в районе точки YLT минимален и ледовые условия могут быть приравнены к условиям припайного льда (малоподвижного льда). Несколько раз в течение сезона в районе точки фиксировалось кратковременное установление припая. На *рис. 5д* эти периоды намеренно не отображаются, чтобы не ухудшить читаемость графика. В те промежутки времени, когда СМЛ составляла 100 % (см. *рис. 5д*), район был занят припаем. В остальное время наблюдалось преобладание льдов сплочённостью 90–100 % (на графике этому диапазону соответствует среднее значение 95 %). Выделение ледовой зоны с таким диапазоном сплочённости указывает на то, что в сплошном ледяном покрове присутствуют трещины и каналы, занятые более тонким (молодым или однолетним) льдом. Следовательно, фактическая СМЛ в этой зоне равна 100 %. Подобное занижение зачастую необходимо для информирования судоводителей о наличии системы каналов и разрывов, пригодных для навигации. Это объясняет систематическое завышение СМЛ алгоритмами на 5 % в зимнее время, наблюдаемое на *рис. 5в*, *г*. В летний период более тонкие льды вытаивают в первую очередь, а между полями старого льда образуются пространства открытой воды, поэтому диапазон СМЛ 90–100 % объективнее характеризует ледовые условия в это время. Однако анализ спутниковых данных показал, что в районе точки YLT ледовая обстановка оставалась близкой к сплошным льдам на протяжении большей части летнего сезона. В связи с этим было сделано допущение о погрешности ледовых карт для данного района. Поскольку при сопоставлении с показаниями алгоритмов для диапазона очень сплочённых льдов (90–100 %) используется среднее значение 95 %, сделано заключение, что его отклонение от фактической сплочённости не превышает +5 %.

Результаты и их обсуждение

Графики, построенные по точкам YCB, YRB и WEU, имеют схожий характер и отражают общие закономерности изменения характеристик ледяного покрова и яркостной температуры на разных каналах в зависимости от сезона (см. *рис. 2–4*). Районы этих точек от пяти до семи месяцев в году заняты припаем.

Динамика яркостной температуры на различных частотах для этих трёх точек демонстрируют схожий характер (см. *рис. 2а–4а*).

В безлёдный период (СМЛ около 0 %) на графиках отчётливо прослеживается характерная для морской воды высокая поляризационная разность излучения (Spreen et al., 2008), а также существенные отличия значений яркостной температуры разных частотных каналов на одной поляризации. Это объясняется сильной и нелинейной зависимостью диэлектрических свойств морской воды от частоты в микроволновом диапазоне (Шарков, 2014).

Начало ледообразования отмечается резким скачком значений яркостной температуры независимо от частоты и поляризации. В период преобладания начальных видов льда, ниласа и молодых льдов (включающих серые и серо-белые льды) различия между значениями яркостной температуры на разных частотах минимальны. Однако сохраняется зависимость, характерная для открытой морской воды: яркостная температура увеличивается с ростом частоты. При переходе льда в стадию однолетнего тонкого эта зависимость становится обратной и сохраняется по мере увеличения толщины ледяного покрова. Такие изменения яркостной температуры на всех каналах по мере формирования и нарастания морского льда

объясняются, в первую очередь, толщиной и влажностью ледяного покрова. Начальные виды льда, а также нилас и молодые льды имеют небольшую толщину (до 30 см) и сильно пропитаны морской водой. Однолетний лёд более толстый и сухой, его излучательная способность на частотах от 18 до 90 ГГц для горизонтальной и вертикальной поляризации равна или более 0,9 и имеет небольшой отрицательный тренд (Spreen et al., 2008). Кроме того, глубина формирования излучения в данном диапазоне уже меньше толщины ледяного покрова (Tikhonov et al., 2014), из-за чего яркостная температура определяется вариациями структуры льда, а также изменением термодинамической температуры его верхних слоёв, которая, в свою очередь, определяется колебаниями температуры воздуха.

Появление положительных значений максимальной суточной температуры воздуха (см. *рис. 2б–4б*) запускает процессы таяния снежного и ледяного покрова. Сначала наблюдается уменьшение яркостной температуры при сохранении обратной зависимости от частоты. После перехода средней суточной температуры через отметку 0 °C яркостная температура на низких частотах снижается, а на высоких — возрастает. Это связано с тем, что талая вода на поверхности льда вносит существенный вклад в собственное излучение поверхности, вследствие чего поведение кривых начинает приближаться к характерному виду для безлёдного периода.

В период устойчивого припая при отрицательной температуре в точках YCB, YRB и WEU алгоритм VASIA2 практически безошибочно определяет СМЛ, за исключением редких выбросов. Алгоритм ASI, напротив, демонстрирует постоянные колебания значений СМЛ в пределах 20 % (см. *рис. 2в–4в* и *2г–4г*).

Графики ошибок (вертикальные синие линии) определения СМЛ алгоритмами VASIA2 (см. *рис. 2в–4в*) и ASI (см. *рис. 2г–4г*) демонстрируют их зависимость от температуры воздуха в переходные периоды ледового сезона (во время начала таяния и замерзания). Оба алгоритма начинают показывать значительные ошибки (более 20 %) при переходе максимальной суточной температуры через 0 °C (см. *рис. 2б–4б*), что свидетельствует о начале периода таяния. В то же время натурные наблюдения толщины припайного льда вблизи станции свидетельствуют о прекращении его роста в этот период (см. *рис. 2е*, *4е*).

В период таяния, до начала разрушения припая, алгоритм ASI сначала существенно занижает значения СМЛ, которая может понижаться до 0 %, что приводит к увеличению погрешности, а затем демонстрирует её рост, сопровождающийся уменьшением ошибки (см. *рис. 2г–4г*). Эта закономерность, по-видимому, свидетельствует сначала о максимальном развитии снежниц на поверхности ледяного покрова, а затем — об их постепенном дренировании через трещины и каналы в толще льда. В отличие от алгоритма VASIA2, кривая сплочённости у алгоритма ASI в этот период более сглажена (см. *рис. 2г–4г*). Изменения СМЛ по алгоритму VASIA2 в процессе таяния ледяного покрова имеют большую амплитуду, однако периоды недооценки сплочённости сменяются периодами её роста до истинных значений (см. *рис. 2в–4в*). Дополнительным фактором влияния на значения ошибок СМЛ в начале периода таяния выступает увеличение количества осадков, которые в данный период выпадают, как правило, в виде мокрого снега (см. *рис. 2б–4б*).

После разрушения припая полное очищение акватории ото льда (до единичных льдин) наблюдается только в районе точки YCB (см. *рис. 2д*). В районах остальных точек безлёдный период либо не наступает вовсе, либо наблюдается лишь в отдельные сезоны (см. *рис. 3д*, *4д*). При отсутствии льда в районе точек погрешности обоих алгоритмов минимальны, тогда как в условиях дрейфующих льдов отмечаются их максимальные значения.

В начале зимнего периода, когда СМЛ достигает 100 %, алгоритм VASIA2 демонстрирует значительное количество ошибок вплоть до перехода молодых льдов в стадию однолетнего тонкого льда (см. *рис. 2в–4в*). Серые и серо-белые льды формируются в условиях устойчивой отрицательной температуры (см. *рис. 2б–4б*), при этом количество осадков остаётся незначительным (менее 2,5 мм). Следует отметить, что в рассматриваемых точках молодые льды в основном представлены дрейфующим льдом, а не припаем. Следовательно, на величину ошибки могут влиять дополнительные факторы, включая изменения сплочённости и другие характеристики ледяного покрова под воздействием динамических процессов. В то же время

алгоритм ASI в течение этого периода показывает большую устойчивость к присутствую молодых льдов (см. *рис. 2г–4г*).

Район точки YLT в течение всего года характеризуется преобладанием дрейфующих старых льдов сплочённостью, близкой к 100 % (см. *рис. 5д*). Динамика яркостной температуры на различных частотах в основном повторяет ход температуры воздуха.

В период отрицательной температуры воздуха значения яркостной температуры всех каналов у точки YLT меньше, чем у остальных (сравн. *рис. 5а* и *2а–4а*). Эта особенность обусловлена существенным различием внутренней структуры старого и однолетнего льда. Старый лёд гораздо менее солёный и содержит больше воздушных пузырьков значительно большего размера, чем однолетний лёд (Shokr, Sinha, 2015). В таком льду усиливаются эффекты объёмного рассеяния микроволнового излучения на пузырьках воздуха (Tikhonov et al., 2014), что и приводит к значительному понижению значений яркостной температуры. Также необходимо отметить изменение поляризационной разности каналов 36,5 и 89,0 ГГц, которая для старого льда, как правило, меньше, чем для однолетнего (сравн. *рис. 5а* и *рис. 2а–4а*). Уменьшение поляризационной разности для этих каналов у старого льда связана со структурой снежного покрова. Снег на таком льду сильно уплотнён из-за продолжительного влияния разных погодных факторов (процессы таяния и замерзания, ветровое уплотнение, осадки и т.п.). Уплотнение снега влечёт за собой разрушение его горизонтальных слоёв и ледяных кристаллов. В результате чего образуется сплошная среда со случайной ориентацией разбитых кристаллов льда, что и приводит к уменьшению поляризационной разности (Matzler et al., 1984).

В остальном характер поведения (частотные зависимости яркостной температуры) кривых в зимний и летний период аналогичен динамике, наблюдаемой в остальных точках (см. *рис. 2а–4а*).

Период таяния на графиках яркостной температуры проявляется менее отчётливо по сравнению с другими исследуемыми точками (см. *рис. 5а*). При установлении положительных значений среднесуточной температуры на станции Alert продолжали фиксироваться отрицательные значения минимальной суточной температуры (см. *рис. 5б*). В этот период взаимное расположение графиков яркостной температуры на разных частотах (чередование прямой и обратной зависимости яркостной температуры от частоты) изменяется, что свидетельствует о чередовании процессов таяния и замерзания.

График ошибок определения СМЛ алгоритмом VASIA2 показывает картину (см. *рис. 5в*), аналогичную наблюдаемой в остальных точках: практически безошибочное определение сплочённости в зимний период и значительные ошибки (выбросы до 50 %) в период таяния льда. Алгоритм ASI, напротив, для точки YLT выдаёт минимальные ошибки определения сплочённости во все сезоны (*рис. 5г*). В зимний период ошибки определения сопоставимы с ошибками алгоритма VASIA2, а в период таяния выбросы не превышают 30 %, демонстрируя лучшие результаты по сравнению с алгоритмом VASIA2 как по количеству, так и по величине ошибок.

В *табл. 4* приведены статистические показатели, рассчитанные для отдельных периодов с различными ледовыми и метеорологическими условиями и обобщённые по всем точкам (обобщение проводилось только для точек YCB, YRB и WEU).

Анализ значений средней (ср.) и среднеквадратической (ср. кв.) ошибки для исследуемых точек позволяет сделать вывод о том, что результаты алгоритма VASIA2, полученные по данным радиометра AMSR2, сопоставимы с алгоритмом ASI и точность обоих варьируется в зависимости от ледовых и метеорологических условий.

В зимний период оба алгоритма показывают наименьшие ошибки как в условиях припая однолетнего льда (толщина льда более 30 см), так и в дрейфующих очень сплочённых старых льдах. Алгоритм VASIA2 показывает более стабильные значения СМЛ в течение всего периода устойчивой отрицательной температуры. Показания ASI отличаются изменчивостью в зависимости от ледовых условий. В случае припайного однолетнего льда в течение всего зимнего периода заметна недооценка сплочённости алгоритмом ASI, чего практически не наблюдается в старых льдах, где ошибка оценки СМЛ практически идентична алгоритму

VASIA2. Поскольку VASIA2 использует в своей методике три частоты радиометра AMSR2, он в целом является более устойчивым к изменчивости излучательной способности ледяного и снежного покрова и отличается меньшей чувствительностью к различным атмосферным эффектам в этот период, в отличие от ASI, который основывается на поляризационной разности высокочастотного канала 89,0 ГГц (Rückert et ak., 2023; Spreen et al., 2008). Несколько завышенные значения средних ошибок в условиях старых дрейфующих льдов, по сравнению с припайным однолетним льдом, обусловлены систематической погрешностью (недооценка на 5 %), заложенной в ледовые карты по причинам, описанным в предыдущем разделе. При учёте этой погрешности значения средних ошибок в дрейфующих льдах приближаются к показаниям, полученным для припая. Приведённые оценки согласуются с результатами работы (Alekseeva и др., 2019). Согласно ней, алгоритм VASIA2 также лучше определял СМЛ в зимний период в очень сплочённых (90–100 %) и сплошных (100 %) однолетних льдах. Алгоритм VASIA2 недооценивал СМЛ на 5 %, а алгоритм ASI — на 15 % (приведены средние ошибки).

Таблица 4. Ошибки определения СМЛ алгоритмами VASIA2 и ASI в различных ледовых условиях

Ледовые и метеорологические условия	Количество наблюдений	Ошибка	Алгоритм	
			VASIA2, %	ASI, %
Припай (СМЛ = 100 %), толщина льда более 30 см (однолетние), зимний период при устойчивой отрицательной температуре — зимний период	1399	ср.±ДИ	−0,2±0,2	−3,9±0,3
		ср. кв.	3,2	7,1
Припай (СМЛ = 100 %), толщина льда более 30 см (однолетние), период таяния снежного и ледяного покрова при положительных значениях температуры воздуха — летний период	475	ср.±ДИ	−10,1±2,1	−16,4±2,0
		ср. кв.	25,5	27,9
Дрейфующие льды (СМЛ ~100 %), толщина льда менее 30 см, период замерзания при устойчивых отрицательных значениях температуры воздуха — зимний период	42	ср.±ДИ	−16,4±6	−7,5±6,9
		ср. кв.	25,1	23,1
Дрейфующие льды (СМЛ ~100 %), толщина льда более 200 см (старые), период преобладания отрицательных значений температуры воздуха — зимний период	110	ср.±ДИ	4,1±0,9	3,5±0,9
		ср. кв.	2,0	3,1
Дрейфующие льды (СМЛ ~100 %), толщина льда более 200 см (старые), период таяния снежного и ледяного покрова при положительных значениях температуры воздуха — летний период	45	ср.±ДИ	−2,2±4,7	3,1±1,7
		ср. кв.	15,7	4,6

В периоды таяния и замерзания оба алгоритма показывают наибольшие ошибки, в среднем занижая СМЛ. Процессы таяния запускаются с появлением первых максимальных значений суточной температуры. С этого момента снежный и ледяной покров претерпевают значительные изменения. Снег насыщается жидкой водой, что сильно увеличивает поглощение излучения в снежном покрове, в результате чего такой слой снега «маскирует» излучение ледяного покрова (Kern et al., 2016). После таяния снега на поверхности ледяного покрова образуются снежницы, а сама поверхность льда, не занятая ими, остаётся влажной. Все эти изменения приводят к тому, что микроволновые излучательные свойства поверхности сдвигаются в сторону открытой воды. В условиях припайного однолетнего льда алгоритм VASIA2 несколько меньше занижает сплочённость по сравнению с алгоритмом ASI, однако в среднем точность обоих практически идентична. В работе (Alekseeva et al., 2019) показано, что в районах сплошных (95–100 %) дрейфующих однолетних льдов алгоритмы VASIA2 и ASI в зависимости от стадии разрушенности демонстрируют разброс средних ошибок от +1 до −20 % и от −1 до −17 % соответственно.

В летний период в дрейфующих старых льдах ошибки определения СМЛ заметно ниже, чем в аналогичный период на припае. Отчасти это может объясняться отсутствием интенсивного процесса таяния, поскольку в этом районе в летний период могут наступать кратковременные понижения температуры ниже 0 °С, сопровождающиеся замерзанием снежниц и разводий между льдинами и сокращением ошибок в определении СМЛ. Если для алгоритма VASIA2 в этот период, как и в условиях припайного льда, характерно большое число наблюдений со значительной недооценкой СМЛ, то алгоритм ASI, напротив, работает точнее. Величина его ошибки в данном случае сопоставима с показателями зимнего периода. Подобная недооценка СМЛ алгоритмом VASIA2 объясняется его рабочими частотами. При кратковременном замерзании снежниц лёд на их поверхности имеет небольшую толщину (Kern et al., 2020). На частотах 18 и 36,5 ГГц, которые использует алгоритм VASIA2, глубина формирования излучения льда составляет несколько сантиметров (Tikhonov et al., 2014) и может превышать толщину ледяного покрова снежниц. Таким образом, алгоритм VASIA2 определяет такие замёрзшие снежницы, как открытую водную поверхность. На частоте 89,0 ГГц, которую использует алгоритм ASI, глубина формирования излучения достигает величины в несколько миллиметров (Tikhonov et al., 2014), и подобные снежницы идентифицируются алгоритмом как сплошной лёд. Если учесть систематическую погрешность ледовой карты (недооценку до 5 %), описанную в предыдущем разделе, то абсолютное значение средней ошибки алгоритма VASIA2 увеличится, а алгоритма ASI — уменьшится. Поскольку летний период в старых дрейфующих льдах характеризуется более высокой изменчивостью условий по сравнению с зимним периодом, на величину ошибок алгоритмов могут влиять динамические факторы, изменяющие излучательную способность старых льдов. Учесть эти факторы в рамках данного исследования невозможно, поэтому для рассматриваемых условий целесообразно анализировать скорее взаимное поведение алгоритмов, нежели их абсолютную точность.

В период замерзания ледяной покров представлен в основном льдами толщиной менее 30 см. К ним относятся несколько стадий развития льда: начальные виды (ледяные иглы, ледяное сало, снежура, шуга), нилас (тёмный и светлый), молодые льды (серый и серо-белый). В это время алгоритм VASIA2 определяет СМЛ хуже, чем ASI, а величина его ошибки приближается к показателям периода таяния. Большие значения ошибок обусловлены тем, что из-за высокой солёности и влажности излучательная способность таких льдов близка к излучательной способности морской воды. Кроме того, свойства льдов на ранних этапах развития также характеризуются высокой изменчивостью за счёт быстрого термического роста, динамического метаморфизма (наслоения, торошение), а также влияния гидрометеорологических условий (перепады температуры от отрицательных к положительным и наоборот, выпадение осадков в виде снега или дождя).

В работе (Shokr, Kaleschke, 2012) было экспериментально подтверждено влияние льдов толщиной менее 25 см на ошибки оценки СМЛ. На примере искусственно созданного припая в испытательном резервуаре исследователи показали, что сильнее всего алгоритмы ошибаются в отношении льдов толщиной 0,5–12 см. В зависимости от состояния снежно-ледовой поверхности (снежура, замёрзшая снежура, относительно сухая или влажная поверхность льда, наличие слоя воды на поверхности льда) некоторые рассматриваемые алгоритмы недооценивали СМЛ на 80 %. Максимальные погрешности показали алгоритмы, использующие низкие частоты (в районе 19 и 37 ГГц), а наименьшие — использующие частоты в области 90 ГГц. Например, алгоритм ASI допускал ошибки 50 % в условиях снежуры и льда толщиной менее 5 мм. При достижении льдом толщины 15 см средние значения ошибок у всех алгоритмов уже не превышали 20 %, при этом высокочастотные алгоритмы по-прежнему демонстрировали более высокую точность. Результаты настоящего исследования в целом согласуются с выводами (Shokr, Kaleschke, 2012). В условиях преобладания начальных видов льда, ниласа и молодых льдов алгоритм VASIA2 определяет СМЛ в два раза хуже, чем алгоритм ASI. Алгоритм VASIA2 в своей методике использует кроме канала 89 ГГц также частоты 19 и 37 ГГц, что делает его более чувствительным ко льдам этих стадий развития. Однако необходимо отметить, что приведённые значения ошибок в *табл. 4* для периода замерзания требуют

уточнения, поскольку оценка работы алгоритмов проводилась в условиях дрейфующих льдов и на небольшой выборке данных. Для более репрезентативных оценок определения СМЛ алгоритмом VASIA2 в дальнейшем планируется выбрать другой географический район, где припай образуется на более ранних стадиях развития льда и где нарастание льда происходит с меньшей скоростью.

В исследовании (Alekseeva et al., 2019) оценивалось влияние только начальных видов льда и ниласа (толщина льда менее 10 см) на ошибки расчёта СМЛ в летний и зимний период. Эта задача решалась посредством вычитания частной сплочённости этих льдов из общей СМЛ и последующего сравнения значений ошибок алгоритмов до и после исключения начальных видов и ниласа. Абсолютные значения средних ошибок в зимний период увеличились и сместились в сторону переоценки. У алгоритма ASI средняя ошибка изменилась с −8 до +10 %, а у алгоритма VASIA2 средняя ошибка сначала составляла +2 %, а после исключения начальных видов и ниласа увеличилась до +14 %. В летний период, наоборот, абсолютная ошибка уменьшилась и, аналогично зимнему периоду, несколько сместилась в сторону переоценки у обоих алгоритмов с −3 до +1 %. На основании проведённого анализа авторы сделали вывод, что в зимний период рассматриваемые алгоритмы лучше распознают начальные стадии ледообразования, чем в летний. Причиной, по всей видимости, служит тот факт, что начальные виды льдов, образующиеся в трещинах, разводьях и полыньях, довольно быстро переходят в стадию ниласа, т. е. происходит увеличение толщины льда до верхней границы этой стадии развития, которая будет лучше видна алгоритмами. В летний период ледообразование происходит менее интенсивно, при неустойчивых и небольших отрицательных значениях температуры воздуха, преимущественно в сплочённых, очень сплочённых и сплошных однолетних или остаточных льдах. Лёд в таких условиях будет иметь меньшую толщину и большую влажность, по сравнению с зимним периодом, что делает его практически невидимым для алгоритмов. Это объяснение согласуется с выводами работы (Shokr, Kaleschke, 2012).

Заключение

В настоящей работе впервые выполнен анализ эффективности алгоритма определения СМЛ VASIA2 на основе данных радиометра AMSR2. Результаты анализа продемонстрировали, что алгоритм VASIA2 обеспечивает высокую точность определения СМЛ в зимний период (средняя и среднеквадратическая ошибки составляют менее 5 %) как в однолетних, так и в старых льдах. В периоды таяния однолетних льдов и замерзания ледяного покрова (при преобладании начальных видов льда, ниласа и молодых льдов) алгоритм систематически недооценивает СМЛ на 11 и 16 % соответственно, при этом среднеквадратическая ошибка достигает порядка 25 %. Оценка работы алгоритма VASIA2 в условиях преобладания льда толщиной менее 30 см требует дальнейшего изучения, поскольку точность рассчитывалась по малой выборке наблюдений и в условиях отсутствия установившегося припая. В период таяния старых льдов алгоритм в меньшей степени недооценивает СМЛ, что, вероятно, связано с отсутствием интенсивного таяния в рассматриваемом районе.

Сравнение результатов алгоритма VASIA2 с алгоритмом ASI показало их схожее поведение в различных условиях. Полученные результаты в целом не противоречат более ранним исследованиям, проводившимся в отношении алгоритма VASIA2, за некоторыми исключениями, которые требуют дальнейшего изучения. Тем не менее настоящая работа позволяет сделать вывод о том, что данные радиометра AMSR2 применимы для оценки СМЛ по алгоритму VASIA2.

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (гос. регистрация № 126031818938-6).

Литература

1. *Алексеева Т. А.*, *Соколова Ю. В.*, *Афанасьева Е. В. и др.* Влияние загрязненности морского льда на ошибки в определении сплоченности в период таяния по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 5. С. 30–46. DOI: 10.31857/S0205961422050037.
2. *Репина И. А.*, *Тихонов В. В.*, *Алексеева Т. А. и др.* Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29–36.
3. *Тихонов В. В.*, *Репина И. А.*, *Алексеева Т. А.*, *Иванов В. В.*, *Раев М. Д.*, *Шарков Е. А.*, *Боярский Д. А.*, *Комарова Н. Ю.* Восстановление сплоченности ледяного покрова Арктики по данным SSM/I // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 182–193.
4. *Тихонов В. В.*, *Репина И. А.*, *Раев М. Д. и др.* Новый алгоритм восстановления сплоченности морского ледяного покрова по данным пассивного микроволнового зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 2. С. 35–43. DOI: 10.7868/S0205961414020110.
5. *Тихонов В. В.*, *Репина И. А.*, *Раев М. Д. и др.* Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 78–93. DOI: 10.7868/S0205961415020104.
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. *Тихонов В. В.*, *Алексеева Т. А.*, *Соколова Ю. В. и др.* 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.
8. *Шарков Е. А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
9. *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. No. 21. Article 2481. 31 p. DOI: 10.3390/rs11212481.
10. Canadian Ice Service Digital Archive — regional charts: History, accuracy, and caveats. CIS Archive Documentation Series No. 1. Canadian Ice Service, 2006. 60 p.
11. *Ivanova N.*, *Pedersen L. T.*, *Tonboe R. T. et al.* Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations // The Cryosphere. 2015. V. 9. No. 5. P. 1797–1817. DOI: 10.5194/tc-9-1797-2015.
12. *Kaleschke L.*, *Lüpkes C.*, *Vihma T. et al.* SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis // Canadian J. Remote Sensing. 2001. V. 27. No. 5. P. 526–537. DOI: 10.1080/07038992.2001.10854892.
13. *Kern S.*, *Rösel A.*, *Pedersen L. T. et al.* The impact of melt ponds on summertime microwave brightness temperatures and sea-ice concentrations // The Cryosphere. 2016. V. 10. No. 5. P. 2217–2239. DOI: 10.5194/tc-10-2217-2016.
14. *Kern S.*, *Lavergne T.*, *Notz D. et al.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations // The Cryosphere. 2019. V. 13. No. 12. P. 3261–3307. DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019.
15. *Kern S.*, *Lavergne T.*, *Notz D. et al.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set inter-comparison for Arctic summer conditions // The Cryosphere. 2020. V. 14. No. 7. P. 2469–2493. DOI: 10.5194/tc-14-2469-2020.
16. *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.
17. *Rückert J. E.*, *Rostosky P.*, *Huntemann M. et al.* Sea ice concentration satellite retrievals influenced by surface changes due to warm air intrusions: A case study from the MOSAiC expedition // Elementa: Science of the Anthropocene. 2023. V. 11. No. 1. Article 00039. 22 p. DOI: 10.1525/elementa.2023.00039.
18. *Shokr M.*, *Kaleschke L.* Impact of surface conditions on thin sea ice concentration estimate from passive microwave observations // Remote Sensing of Environment. 2012. V. 121. P. 36–50. DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.005.
19. *Shokr M.*, *Sinha N. K.* Ice aging // Sea ice: Physics and remote sensing. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015. P. 80–84.
20. *Shukurov K. A.*, *Semenov V. A.* Statistical characteristics of sea ice concentration in Vilkitsky Strait during summer-autumn navigation in 1996–2020 // 28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Proc. SPIE. 2021. V. 11916. Article 1191625. 5 p. DOI: 10.1117/12.2601737.

21. SIGRID-3: a vector archive format for sea ice charts. WMO/TD-No. 1214. JCOMM Technical Report No. 23. Geneva: WMO, 2010. 26 p.
22. *Spreen G.*, *Kaleschke L.*, *Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // J. Geophysical Research: Oceans. 2008. V. 113. No. C2. Article C02S03. 14 p. DOI: 10.1029/2005JC003384.
23. *Tikhonov V. V.*, *Boyarskii D. A.*, *Sharkov E. et al.* Microwave model of radiation from the multilayer "ocean–atmosphere" system for remote sensing studies of the Polar Regions // Progress in Electromagnetics Research B. 2014. V. 59. P. 123–133. DOI: 10.2528/PIERB14021706.
24. *Tikhonov V. V.*, *Repina I. A.*, *Raev M. D. et al.* A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // Advances in Space Research. 2015. V. 56. No. 8. P. 1578–1589. DOI: 10.1016/j.asr.2015.07.009.
25. WMO Sea-Ice Nomenclature. WMO-No. 259. Geneva: WMO, 2014. 121 p.

VASIA2 algorithm: Accuracy assessment of sea ice concentration retrieval based on AMSR2 radiometer data

J. V. Sokolova[1], V. V. Tikhonov[1,2]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mails: j.sokolova@cosmos.ru, vtikhonov@asp.iki.rssi.ru
[2] *Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia*

The paper explores the possibility of using data from AMSR2 (Advanced Microwave Scanning Radiometer 2) to determine sea ice concentration (SIC) by the VASIA2 (Variation Arctic Sea Ice Algorithm 2) algorithm. VASIA2 was developed by a group of scientists from Space Research Institute RAS, A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, and Arctic and Antarctic Research Institute initially for the SSM/I (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) radiometers. The accuracy of SIC retrievals by VASIA2 was assessed for four regions of Canadian Arctic for the period 2022–2024 using *in situ* ice and meteorological data from polar stations, as well as ice charts from the Canadian Ice Service. The obtained results were compared with estimates calculated by the ASI (Arctic Radiation and Turbulence Interaction) algorithm for various ice and meteorological conditions. Error analysis demonstrated that VASIA2 showed the best results during the winter period. Melting and freezing periods under fast ice conditions were characterized by high error values, but comparable with ASI error estimates. In compact old drift ice (95–100 %), VASIA2 showed smaller average errors during the melting period compared to first-year ice.

Keywords: sea ice concentration, fast ice, satellite microwave radiometry, VASIA2, ASI, AMSR2

Accepted: 28.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-69-87

References

1. Alekseeva T. A., Sokolova J. V., Afanasyeva E. V. et al., The contribution of sea-ice contamination to inaccuracies in sea-ice concentration retrieval from satellite microwave radiometry data during the ice-melt period, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, V. 58, Iss. 12, pp. 1470–1484, DOI: 10.1134/S0001433822120039.
2. Repina I. A., Tikhonov V. V., Alexeeva T. A. et al., Electrodynamics model of arctic sea ice radiation to solve the problems of satellite microwave radiometry, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 5, pp. 29–36 (in Russian).
3. Tikhonov V. V., Repina I. A., Alexeeva T. A., Ivanov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Komarova N. Yu. Arctic sea ice cover reconstruction on the basis of SSM/I data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, V. 10, No. 2, pp. 182–193 (in Russian).
4. Tikhonov V. V., Repina I. A., Raev M. D. et al., New algorithm sea ice cover reconstruction on the basis of passive microwave data, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 2, pp. 35–43 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414020110.

5. Tikhonov V. V., Repina I. A., Raev M. D. et al., Integrative algorithm of determining ice conditions in Polar Regions by data of satellite microwave radiometry (VASIA2), *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, V. 51, pp. 914–928, DOI: 10.1134/S0001433815090194.
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, DOI: 10.1134/S0001433816090267.
7. Tikhonov V. V., Alekseeva T. A., Sokolova J. V. et al., 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.
8. Sharkov E. A., *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations*, Berlin: Springer/PRAXIS, 2003, 656 p.
9. 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, No. 21, Article 2481, 31 p., DOI: 10.3390/rs11212481.
10. *Canadian Ice Service Digital Archive — regional charts: History*, *accuracy*, *and caveats*, CIS Archive Documentation Series No. 1, Canadian Ice Service, 2006, 60 p.
11. Ivanova N., Pedersen L. T., Tonboe R. T. et al., Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations, *The Cryosphere*, 2015, V. 9, No. 5, pp. 1797–1817, DOI: 10.5194/tc-9-1797-2015.
12. Kaleschke L., Lüpkes C., Vihma T. et al., SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis, *Canadian J. Remote Sensing*, 2001, V. 27, No. 5, pp. 526–537, DOI: 10.1080/07038992.2001.10854892.
13. Kern S., Rösel A., Pedersen L. T. et al., The impact of melt ponds on summertime microwave brightness temperatures and sea-ice concentrations, *The Cryosphere*, 2016, V. 10, No. 5, pp. 2217–2239, DOI: 10.5194/tc-10-2217-2016.
14. Kern S., Lavergne T., Notz D. et al., Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations, *The Cryosphere*, 2019, V. 13, No. 12, pp. 3261–3307, DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019.
15. Kern S., Lavergne T., Notz D. et al., Satellite passive microwave sea-ice concentration data set inter-comparison for Arctic summer conditions, *The Cryosphere*, 2020, V. 14, No. 7, pp. 2469–2493, DOI: 10.5194/tc-14-2469-2020.
16. 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.
17. Rückert J. E., Rostosky P., Huntemann M. et al., Sea ice concentration satellite retrievals influenced by surface changes due to warm air intrusions: A case study from the MOSAiC expedition, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2023, V. 11, No. 1, Article 00039, 22 p., DOI: 10.1525/elementa.2023.00039.
18. Shokr M., Kaleschke L., Impact of surface conditions on thin sea ice concentration estimate from passive microwave observations, *Remote Sensing of Environment*, 2012, V. 121, pp. 36–50, DOI: 10.1016/j.rse.2012.01.005.
19. Shokr M., Sinha N. K., Ice aging, In: *Sea ice: Physics and remote sensing*, Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015, pp. 80–84.
20. Shukurov K. A., Semenov V. A., Statistical characteristics of sea ice concentration in Vilkitsky Strait during summer-autumn navigation in 1996–2020, *28th Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Proc. SPIE*, 2021, V. 11916, Article 1191625, 5 p., DOI: 10.1117/12.2601737.
21. *SIGRID-3: a vector archive format for sea ice charts*, WMO/TD-No. 1214, JCOMM Technical Report No. 23, Geneva: WMO, 2010, 26 p.
22. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2008, V. 113, No. C2, Article C02S03, 14 p., DOI: 10.1029/2005JC003384.
23. Tikhonov V. V., Boyarskii D. A., Sharkov E. et al., Microwave model of radiation from the multilayer "ocean–atmosphere" system for remote sensing studies of the Polar Regions, *Progress in Electromagnetics Research B*, 2014, V. 59, pp. 123–133, DOI: 10.2528/PIERB14021706.
24. Tikhonov V. V., Repina I. A., Raev M. D. et al., A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data, *Advances in Space Research*, 2015, V. 56, No. 8, pp. 1578–1589, DOI: 10.1016/j.asr.2015.07.009.
25. *WMO Sea-Ice Nomenclature*, WMO-No. 259, Geneva: WMO, 2014, 121 p.