

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Алексеева Татьяна Алексеевна**

**Восстановление сплоченности морского льда в Северном  
Ледовитом океане по данным спутниковой микроволновой  
радиометрии**

25.00.28 - океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении  
«Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»

**Научный руководитель (консультант)** – *Иванов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук*

**Официальные оппоненты** – *Зимин Алексей Вадимович, доктор географических наук, Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, руководитель лаборатории, главный научный сотрудник*

*Лебедев Сергей Анатольевич, доктор физико-математических наук, ФГБУ науки Геофизический Центр РАН, ведущий научный сотрудник*

*Нестеров Евгений Самойлович, доктор географических наук, ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации», заведующий отделом*

Защита диссертации состоится «13» мая 2021г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.02 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7(495)9391420, факс +7(495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/358549237/>

Автореферат разослан «05» апреля 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Морской лед играет существенную роль в климатической системе Земли и является одним из индикаторов климатических изменений. Информация о ледовых условиях крайне важна для решения ряда практических и научных задач.

Учитывая ограниченное покрытие полярных регионов натурными наблюдениями с борта судов и на полярных станциях, в настоящее время основное внимание уделяется дистанционным методам зондирования морского льда. Каждый вид информации имеет свои преимущества и недостатки, поэтому для максимально точного и полного анализа характеристик ледяного покрова следует учитывать все имеющиеся виды данных, и использовать их в комплексе. Важную роль в изучении морского льда играют данные спутниковой микроволновой радиометрии благодаря тому, что они ежедневно покрывают всю акваторию Северного Ледовитого океана (СЛО) с 1978 г., на них не влияет облачность и темное время суток.

Для оценки общей сплоченности морского льда по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования разработано множество алгоритмов, результаты расчетов по которым существенно различаются. В этой связи разработка метода восстановления сплоченности морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии, оценка эффективности метода на основе сравнительного анализа с данными визуальных наблюдений и спутниковыми снимками в видимом диапазоне и исследование временных изменений площади морского льда в Северном Ледовитом океане с помощью разработанного метода представляет собой актуальную научную задачу.

**Объект исследования** – морской лед в Северном Ледовитом океане.

**Предмет исследования** – восстановление сплоченности морского льда, рассчитанной по данным спутниковой микроволновой радиометрии с помощью алгоритмов VASIA2, NASA Team (NT) и ASI.

**Цель работы** – разработка метода восстановления сплоченности морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии, оценка эффективности

метода на основе сравнительного анализа с данными визуальных наблюдений и спутниковыми снимками в видимом диапазоне и исследование временных изменений площади морского льда в Северном Ледовитом океане с помощью разработанного метода.

В соответствии с поставленной целью сформулированы **основные задачи** исследования:

- сравнение общей сплоченности морского льда, полученной с помощью визуальных судовых наблюдений и рассчитанной на основе данных спутниковой микроволновой радиометрии с помощью двух наиболее популярных зарубежных алгоритмов NT и ASI и отечественного алгоритма VASIA2;

- анализ влияния начальных видов льдов, стадии разрушенности, размеров ледяных полей и загрязненности морского льда на ошибки в определении сплоченности по данным спутниковой микроволновой радиометрии;

- оценка возможностей каждого алгоритма;

- оценка площади ледяного покрова СЛО с учетом выявленных ошибок по данным спутниковой микроволновой радиометрии.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Определено влияние стадии разрушенности льда, наличия начальных льдов и ниласа, размеров ледяных полей и загрязненности морского льда на точность восстановления сплоченности морского льда в СЛО с помощью трех алгоритмов NASA Team, ASI и VASIA2 по данным СМР отдельно для летнего и зимнего периодов для различных градаций сплоченности.

2. Выявлен комплекс причин, приводящих к невозможности определения методами СМР обширных областей дрейфующего льда в летний период, оценена площадь таких областей и их изменчивость с начала таяния ледяного покрова до начала устойчивого ледообразования. Показано, что в период минимального развития ледяного покрова, площадь «невидимых» областей льда может составлять 11-14% от всей площади, покрытой льдом в Северном Ледовитом океане, в зависимости от распределения редких и разреженных льдов в арктических шельфовых морях.

3. Рассчитана площадь морского льда СЛО по алгоритму VASIA2. Проведенное сравнение с другими алгоритмами, с судовыми данными, спутниковыми снимками в видимом диапазоне и ледовыми картами ААНИИ позволяет рекомендовать данный алгоритм как один из наиболее надежных алгоритмов восстановления сплоченности морского льда для определения климатических изменений по данным СМР.

**Научная новизна работы.** Создан новый алгоритм расчёта сплоченности морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2). Новым является применение судовых наблюдений ААНИИ для оценки ошибок в определении общей сплоченности ледяного покрова с помощью различных алгоритмов. Впервые оценено количественное влияние начальных льдов и ниласа, а также стадий разрушенности льда на ошибки по данным массовых, а не точечных измерений. Впервые получены статистически значимые средние ошибки для зимнего периода и показано, что зимой в редких льдах данные СМР могут показывать существенно более высокие ошибки, чем летом. Анализ судовых данных, данных авиаразведок, ледовых карт ААНИИ и снимков в видимом диапазоне впервые выявил комплекс причин, влияющих на невозможность определения обширных областей дрейфующих льдов методами СМР.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что ее результаты внесли существенный вклад в корректное использование данных СМР для определения сплоченности морского льда. Это имеет большое значение для расчетов изменения площади льда в СЛО, моделирования ледяного покрова, а также для судоходства и ледового картирования. Принципиально новый российский алгоритм VASIA2 при определенных условиях имеет преимущества по сравнению с двумя наиболее часто используемыми алгоритмами NT и ASI и может быть усовершенствован в дальнейшем. Сравнение с судовыми данными и ледовыми картами ААНИИ показало, что и на данной стадии разработки алгоритм эффективен для определения сплоченности и площади морского льда СЛО, а также анализа тенденций ее изменений.

**Личный вклад автора.** Часть данных судовых наблюдений была получена автором лично в ходе арктических экспедиций. Автором был обработан и проанализирован весь массив судовых данных. Также личный вклад автора состоит в дешифрировании морского льда на спутниковых снимках, составлении ледовых карт, которые использовались для сопоставления площади морского льда Северного Ледовитого океана. В результате совместной работы (ААНИИ, ИКИ РАН, ИФА РАН) при создании алгоритма VASIA2, автором выполнялась оценка эффективности этого алгоритма. Соискателем лично написаны все статьи, в которых он является первым автором, и часть статей, опубликованных в соавторстве, а также в представлении результатов работы в научных докладах на конференциях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались соискателем лично и в соавторстве на российских и международных конференциях: 21th international symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice (Момбетцу, Япония, 2006г.), GEOS/MSL 695 Sea ice school (Барроу, Аляска, 2008), SCAR open science conference (Санкт-Петербург, Россия, 2008), S4D-NABOS Workshop «Near-slope observations in the Arctic Ocean» (Париж, Франция, 2009), EGU General Assembly (Вена, Австрия, 2013), 15-ой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, Москва, 2012), 2018 IGU thematic conference (Москва, 2018), Восьмой конференции пользователей данных метеорологических спутников среди стран Азиатского региона и Океании (AOMSUC-8, Владивосток, Россия, 2017), 2019 Arctic Circle Assembly (Рейкьявик, Исландия, 2019), 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, Москва, 2019), Towards a New Arctic Climate System: Scientific Workshop (CATS / QUARCCS, Санкт-Петербург, 2019), 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, Москва, 2020).

По результатам диссертационной работы **опубликовано 10 научных статей в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях**, определенных

п.2.3 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Данные судовых наблюдений включены в базу данных ААНИИ (Свидетельство о гос. регистрации базы данных № 2019621801 «СТК-ЛЕД»).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из списка сокращений, введения, 5 глав, заключения, списка используемой литературы, состоящего из 136 наименований, в том числе 107 на иностранном языке. Общий объем работы содержит 126 страниц, включая 52 рисунка и 15 таблиц.

**Благодарности.** Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, д.ф.-м.н. В.В. Иванову за помощь при работе над диссертацией. Автор благодарен зав. лабораторией Изучения ледового плавания ААНИИ С.В. Фролову за передачу бесценного опыта в экспедициях и в научной работе, за идеи, многолетнюю совместную работу и поддержку. Автор благодарен к.ф.-м.н. В.В. Тихонову, к.ф.-м.н. М.Д. Раеву, д.ф.-м.н. проф. Е.А. Шаркову, д.ф.-м.н., проф. РАН И.А. Репиной за совместную обработку данных алгоритма VASIA2, проф. К. Хаасу и д.г.н. Ш. Керну за совместную обработку данных алгоритмов NASA Team и ASI, коллегам из ААНИИ Ю.В. Соколовой и Е.В. Афанасьевой за совместную работу над публикациями и за помощь в оформлении иллюстративного материала, к.г.н. В.М. Смоляницкому за консультации и предоставление обобщенных данных ледовой авиаразведки по загрязненности морского льда, а также всем сотрудникам ААНИИ, которые составляли ледовые карты и участвовали в специальных судовых и авиационных наблюдениях в СЛО, использовавшиеся в данной работе. Исследования по теме диссертации были выполнены при финансовой поддержке Лаборатории по морским и полярным исследованиям им. О.Ю. Шмидта (проект OSL-2007/2008), РФФИ (проект 18-05-60048) и в рамках темы «Мониторинг» гос. регистрация № 01.20.0.2.00164.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, ее научная новизна и практическая значимость, определены объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи исследования, указаны основные положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, сведения об апробации работы, о структуре и объеме диссертации.

**В первой главе «Определение сплоченности морского льда с помощью специальных судовых наблюдений и спутниковой микроволновой радиометрии»** выполнен обзор методов определения сплоченности морского льда, методов выполнения судовых ледовых наблюдений, современных алгоритмов восстановления сплоченности морского льда по данным СМР, перечислены причины ошибок восстановления сплоченности морского льда по данным СМР.

**В разделе 1.1.** описывается уникальная методика специальных судовых наблюдений за ледяным покровом, разработанная в ААНИИ. Основные ее принципы заключаются в следующем: наблюдения за ледяным покровом производятся вахтовым методом (круглосуточно) на капитанском мостике; по пути движения судна выделяются однородные ледовые зоны; область наблюдений вокруг судна подразделяется на две части «по пути» и «по району» движения.

**В разделе 1.2.** приводится описание спутниковых микроволновых радиометров, используемых для мониторинга льда в полярных регионах. В настоящее время данные пассивного микроволнового зондирования полярных регионов поступают с радиометров SSM/I, SSMIS и AMSR2. Данные SSM/I и SSMIS являются наиболее востребованными, так как они самые долговременные (с 1978 г.), что важно для оценки климатических изменений в полярных регионах.

**Раздел 1.3.** посвящен обзору основных алгоритмов для восстановления характеристик морского льда.

**В разделе 1.4.** обсуждаются источники ошибок в определении сплоченности современными алгоритмами. Большая разница между данными различных алгоритмов обусловлена рядом причин: сезонная изменчивость излучательной способности морского льда и снежного покрова, внесезонная региональная

изменчивость излучательной способности снежно-ледяной поверхности, влияние поверхностных эффектов и влияние погодных эффектов. Устранение ошибок в определении сплоченности льда заключается в решении двух проблем: в алгоритмах используются различные методы устранения атмосферных изменений (погодные фильтры) и повышается точность в определении точек привязки, то есть используются динамические точки привязки, которые определяются отдельно для различных регионов и для разных сезонов года. В силу трудоемкости обработки спутниковых и судовых данных, а также большого количества различных алгоритмов, в настоящей работе для сравнения с судовыми данными были выбраны два из наиболее известных и используемых в мировой практике алгоритма – NT и ASI, а также первый российский алгоритм VASIA2.

**В разделе 1.5.** приводится детальное описание алгоритма NT, разработанного коллективом NASA. Алгоритм использует два соотношения: поляризационное (горизонтальная и вертикальная поляризации канала 19,35 ГГц) и градиентное (вертикальная поляризация каналов 19,35 и 37 ГГц).

**В разделе 1.6.** приводится детальное описание алгоритма ASI, разработанного в университете Бремена. Алгоритм базируется на расчете поляризационной разности высокочастотного канала (85,5 ГГц – радиометр SSM/I, 91,655 ГГц – SSMIS, 89 ГГц – AMSR).

**В разделе 1.7.** приводится описание алгоритма VASIA2, разработанного сотрудниками трех Российских научных институтов: ИКИ РАН, ИФА РАН и ААНИИ. Алгоритм принципиально отличается от всех современных алгоритмов. В его основе лежат не экспериментальные данные, а теоретическая модель излучения системы «морская поверхность - ледяной покров - снежный покров - атмосфера». В качестве основных параметров алгоритм использует три тангенса угла наклона прямой, проведенной через значения яркостной температуры для двух разных частот одной поляризации к оси частот: тангенс для частот 85,5 ГГц и 19,35 ГГц вертикальной поляризации, тангенс для частот 85,5 ГГц и 37 ГГц горизонтальной поляризации и тангенс для частот 37 ГГц и 19,35 ГГц вертикальной поляризации. Выбор этих частот и поляризаций (и соответственно тангенсов) объясняется разной

зависимостью излучения различных морских льдов и открытой воды от частоты излучения в диапазоне 19-100 ГГц (Tikhonov et al., 2014).

**Во второй главе «Данные и район исследований»** перечислены судовые данные, методика их обработки (**раздел 2.1.**), а также источники данных СМР, используемые в диссертации (**раздел 2.2.**). Сравнение общей сплоченности льда, полученной по данным СМР ( $C_{смр}$ ), со общей сплоченностью, полученной при проведении судовых наблюдений ( $C_{суд}$ ), было выполнено отдельно для летнего и зимнего сезонов. Также было выполнено сравнение со сплоченностью, полученной во время судовых наблюдений, из которой были исключены начальные виды льдов и нилас ( $C_{суд-нач}$ ). Экспедиции были условно поделены на летние и зимние по датам наблюдений и наблюдаемым ледовым условиям. Летние наблюдения проводились в ходе шести экспедиций на НЭС "Академик Федоров" (2000, 2004 и 2005 гг.) и "Михаил Сомов" (1996 г.), а также ледоколах "Советский Союз" (2003 г.) и "Капитан Драницын" (2003 г.). Данные восьми зимних экспедиций получены на борту НЭС "Михаил Сомов" (1996-1997, 1997-1998, 1998, 2001, 2003 и 2004) и ледокола "Капитан Драницын" (1998 и 2000). Всего в районе исследований (Баренцево, Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское моря) проводились непрерывные судовые визуальные наблюдения за ледовой обстановкой вдоль маршрутов общей протяженностью почти 91 тыс. км. Однородные ледовые зоны были поделены на 1 км отрезки для осреднения всех ледовых параметров в пределах площади каждого соответствующего пикселя на спутниковом снимке. Пиксели, которые покрыты судовыми наблюдениями менее, чем на 40% (учитывая видимость, зафиксированную во время наблюдений) были исключены из анализа.

Использованы данные СМР о сплоченности морского льда, определенные с помощью алгоритмов: NT (радиометр SSM/I (F13) для сетки с разрешением 25 км, <https://nsidc.org/data/nsidc-0051>); алгоритм ASI (радиометр SSM/I (F13) по сетке с разрешением 12,5 км); для вычисления сплоченности по алгоритму VASIA2 использовалась база данных SSM/I и SSMIS полярных районов POLE-RT-Fields, созданная в ИКИ РАН.

В третьей главе «Сравнение сплоченности морского льда, полученной с помощью спутниковой микроволновой радиометрии и специальных судовых наблюдений» приводятся результаты сравнения сплоченности морского льда, полученной по данным СМР и специальных судовых наблюдений ААНИИ (раздел 3.1). Средние ошибки для алгоритмов NT, ASI и VASIA2 приведены в таблице 1. Все три алгоритма в летний (рис. 1а) и зимний (рис. 1б) периоды переоценивают общую сплоченность ледяного покрова в редких льдах и недооценивают - в сплоченных льдах. Максимальные средние ошибки в определении сплоченности у всех алгоритмов наблюдаются в разреженных льдах.

Таблица 1. Средние ошибки, полученные при сравнении данных СМР с судовыми данными

	NT (25 км) и С <sub>суд</sub> / С <sub>суд-нач</sub> (8% начальных льдов и ниласа в общей С <sub>суд</sub> )	ASI (12,5 км) С <sub>суд</sub> / С <sub>суд-нач</sub> (9% начальных льдов и ниласа в общей С <sub>суд</sub> )	VASIA2 (12,5 км) С <sub>суд</sub> / С <sub>суд-нач</sub> (9% начальных льдов и ниласа в общей С <sub>суд</sub> )
Средняя ошибка в летний период (баллы)	-0,4 / 0,0	-0,3 / +0,1	-0,3 / +0,1
	NT (25 км) С <sub>суд</sub> / С <sub>суд-нач</sub> (24% начальных льдов и ниласа в общей С <sub>суд</sub> )	ASI (12,5 км) С <sub>суд</sub> / С <sub>суд-нач</sub> (28% начальных льдов и ниласа в общей С <sub>суд</sub> )	VASIA2 (12,5 км) С <sub>суд</sub> / С <sub>суд-нач</sub> (28% начальных льдов и ниласа в общей С <sub>суд</sub> )
Средняя ошибка в зимний период (баллы)	-0,4/+1,1	-0,8/+1,0	+0,2/+1,4

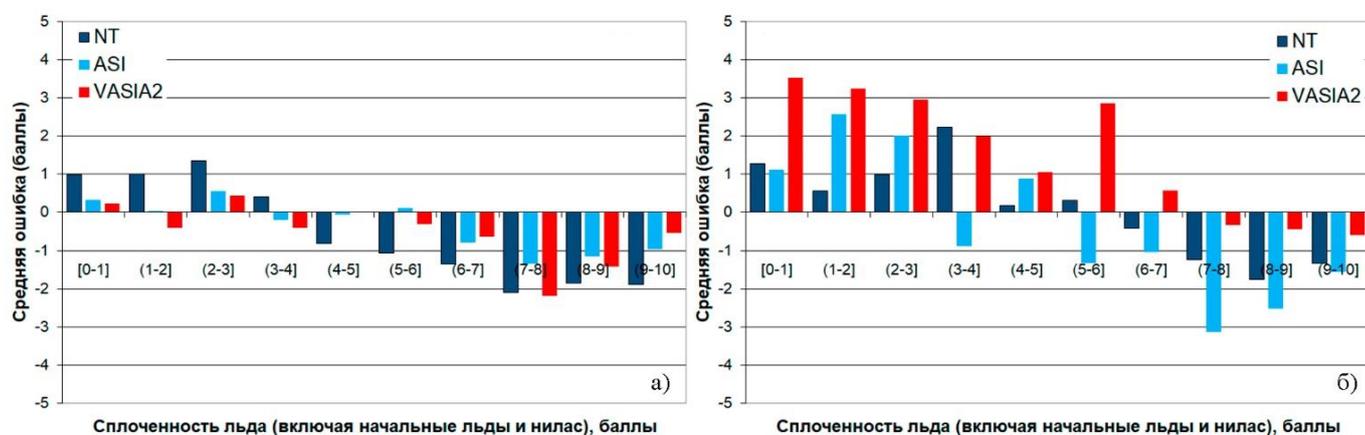


Рис. 1. Распределение средней ошибки между значениями сплоченности, рассчитанной по алгоритмам NT, ASI и VASIA2 в летний (а) и зимний (б) периоды

В зимний период *алгоритм NT* показывает лучшие результаты по сравнению с летним периодом, как в редких, так и в сплоченных льдах. Переоценка сплоченности в летний период в редких льдах у алгоритма NT связана с содержанием водяного пара в атмосфере и выбором точек привязки. Недооценка сплоченности в сплоченных льдах в летний период у алгоритма связана, в первую очередь, с процессами таяния, а также с наличием начальных видов льда и ниласа, которые образуются в высоких широтах даже в летний период при холодной погоде между ледяными полями в сплоченных льдах. В зимний период недооценка сплоченности связана с наличием начальных льдов и ниласа, которые имеют яркостную температуру близкую к яркостной температуре чистой воды, и, следовательно, плохо определяются по данным СМР. Средняя ошибка у *алгоритма ASI* в редких льдах в зимний период в 5-6 раз выше, чем в летний период. В сплоченных льдах зимой алгоритм приблизительно в 2 раза сильнее недооценивает сплоченность, чем летом. Если недооценка сплоченности в данном случае связана с меньшей чувствительностью высокочастотного канала 89 ГГц, который используется в алгоритме, к наличию начальных льдов и ниласа, то основная причина такой сильной переоценки сплоченности в редких льдах зимой по сравнению с летом остается под вопросом. Вероятно, основное значение имеет выбор точек привязки для таких ледовых условий. *Алгоритм VASIA2* в летний период показывает средние ошибки, сопоставимые с алгоритмом ASI. В зимний период алгоритм VASIA2 показывает лучшие результаты в сплоченных льдах – минимальные средние ошибки в данной градации среди трех исследуемых алгоритмов. В редких же льдах, алгоритм показывает максимальные ошибки, точные причины которых на данный момент не выяснены и требуют более углубленного исследования и внесения поправок в методику алгоритма.

В разделе 3.2 анализируются результаты предыдущих исследований по сравнению данных СМР с другими источниками информации о ледяном покрове. Все исследования имеют принципиальные различия в полученных средних ошибках, причиной чего являются различные методики наблюдений за ледяным покровом и/или недостаточное количество используемых натурных данных. Таким

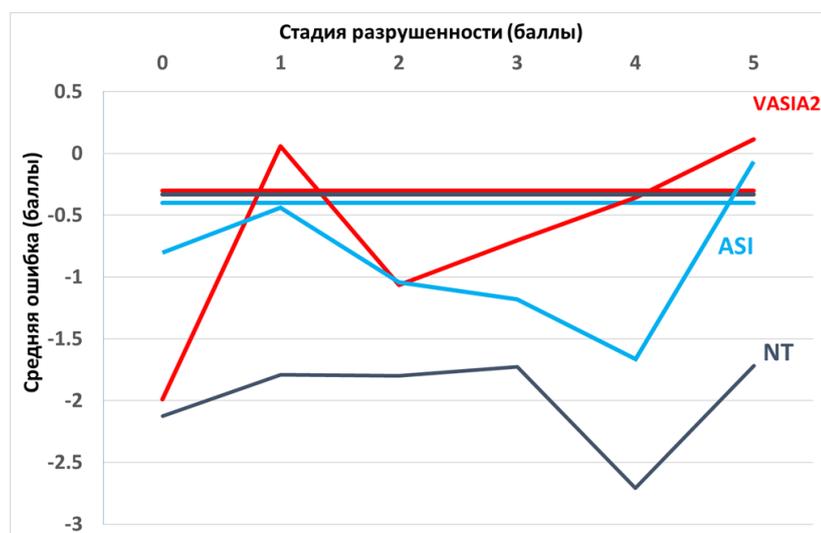
образом, судовые данные ААНИИ позволили получить статистически значимые результаты для всех типов ледовых условий.

**Четвертая глава «Влияние природных факторов на ошибки в определении сплоченности»** посвящена оценке влияния начальных видов льдов и ниласа, разрушенности, размеров ледяных полей и загрязненности на ошибки в определении сплоченности морского льда по данным СМР.

Вычитание сплоченности начальных льдов и ниласа из общей сплоченности, определенной с помощью судовых наблюдений, уменьшает среднюю ошибку алгоритмов в летний период (**раздел 4.1**). Это означает, что алгоритмы плохо определяют начальные льды и нилас, образовавшиеся среди старых льдов в период нерегулярного образования льда в конце лета - начале осени. Средняя ошибка в летний период при вычитании начальных льдов и ниласа уменьшается с -0,4 до 0 баллов для алгоритма NT, тогда как для алгоритмов ASI и VASIA2 изменяется с отрицательной до положительной, то есть с -0,3 до +0,1 и от -0,3 до +0,1 баллов соответственно. Зимой методы СМР определяют начальные льды и нилас лучше, чем летом, поэтому вычитание начальных льдов и ниласа из общей оценки сплоченности не приводит к уменьшению средней ошибки. Средняя ошибка в зимний период при вычитании начальных льдов и ниласа изменяется от -0,4 до +1,1 баллов для алгоритма NT, от -0,8 до +1,0 для алгоритма ASI и от +0,2 до +1,4 баллов для алгоритма VASIA2 (табл. 1).

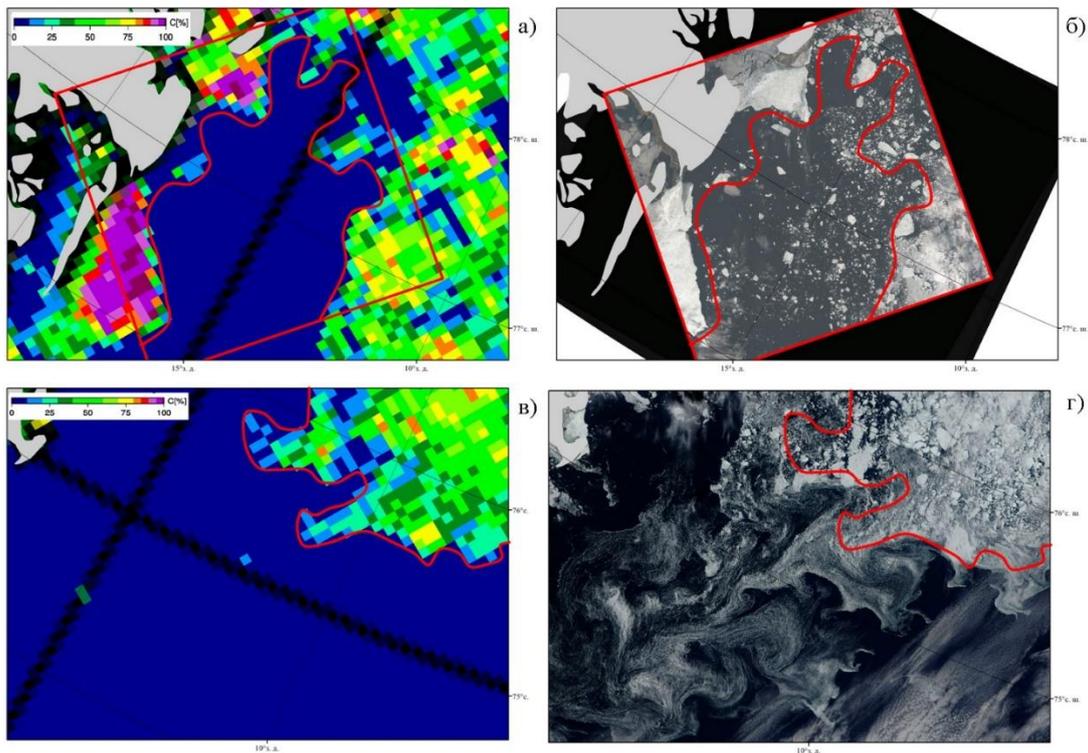
Одним из важных параметров, отслеживаемых во время специальных судовых наблюдений ААНИИ, является стадия разрушенности льда (**раздел 4.2**). Этот параметр оценивается по пятибалльной шкале. При наличии процессов таяния, сравнение данных СМР с данными судовых наблюдений приводит к более высоким средним ошибкам: таяние приводит к большей недооценке общей сплоченности для всех алгоритмов. В среднем, алгоритм NT недооценивает сплоченность на 0,4 балла по сравнению с данными судовых наблюдений. Для данных, согласно которым во время судовых наблюдений зафиксирована какая-либо стадия разрушенности, средняя ошибка выше: алгоритм NT недооценивает общую сплоченность на 1,0-1,8 балла. Алгоритм ASI недооценивает сплоченность в среднем на 0,3 балла. При

увеличении стадии разрушенности от 1 до 3 баллов недооценка сплоченности вырастает с 0,1 до 0,5 и достигает 2,1 балла при стадии разрушенности в 4 балла. Алгоритм VASIA2 летом недооценивает общую сплоченность в среднем на 0,3 балла. Однако, при начальной стадии разрушенности в 1 балл, VASIA2 переоценивает сплоченность на 0,4 балла. Затем, при разрушенности в 2 балла VASIA2 снова недооценивает сплоченность, на 0,2 балла. Далее, отрицательная ошибка увеличивается, достигая максимума в 1,4 балла при разрушенности в 4 балла, как и у алгоритма ASI (рис. 2).



**Рис. 2.** Изменения средней ошибки в зависимости от стадии разрушенности для алгоритмов NT (темно-синий), ASI (голубой), VASIA2 (красный). Прямые линии — средние ошибки для всего массива данных, кривые — изменение средней ошибки для очень сплоченных льдов (9,5-10 баллов) при различных стадиях разрушенности

В период интенсивного таяния алгоритмы, рассчитывающие сплоченность по данным СМР, могут не идентифицировать обширные зоны дрейфующих льдов (раздел 4.3). На основе дешифрирования снимков в видимом диапазоне представлен комплекс факторов, который приводит к «невидимым» зонам на снимках СМР. Эти факторы включают: высокую стадию разрушенности, формы ледяных полей, сплоченность и расположение/конфигурация «невидимых» зон. На рис. 3 приведены примеры таких зон в Гренландском море 30 июля 2017 г. и видно, что основная разница между областями, которые не отображаются на снимках СМР заключается в размерах ледяных полей и, одновременно, сплоченности льда. На рис. 3(г) преобладает сильно разрушенный битый лед высокой сплоченности (7-8 и 9-10 баллов). На рис. 3(б) размеры ледяных полей существенно больше, но льды менее сплоченные (4-6 баллов).



**Рис. 3.** Ледяной покров в центральной части Гренландского моря в районе между  $76^{\circ}40'$  и  $78^{\circ}40'$  с.ш. на рисунках (а) и (б), и между  $74^{\circ}40'$  и  $76^{\circ}40'$  с.ш. на рисунках (в) и (г) от 30 июля 2017 г. Рисунки (а) и (в) – сплоченность льда, полученная с помощью алгоритма ASI по данным СМР, (б) – снимок Landsat в видимом диапазоне, (г) – снимок Terra MODIS в видимом диапазоне

Таким образом, по данным СМР практически не отображаются ледовые зоны в прикромочных областях ледяных массивов, языки и полосы льда и отдельно расположенные остатки ледяных массивов, в которых лед характеризуется двумя сочетаниями факторов:

1. Битые льды (с размерами ледяных полей до 100 м в диаметре) сплоченностью 7-8 (с отдельными пятнами 9-10 баллов) с высокой стадией разрушенности (3-5 баллов).
2. Битые льды (с размерами ледяных полей до 100 м в диаметре), среди которых встречаются обломки полей и ледяные поля до нескольких километров в диаметре, с преобладающей сплоченностью 1-3 и 4-6 баллов с высокой стадией разрушенности (3-5 баллов).

Причина данного явления заключается в следующем: на последних стадиях таяния, когда сморози распадаются на небольшие льдины и уменьшается общая

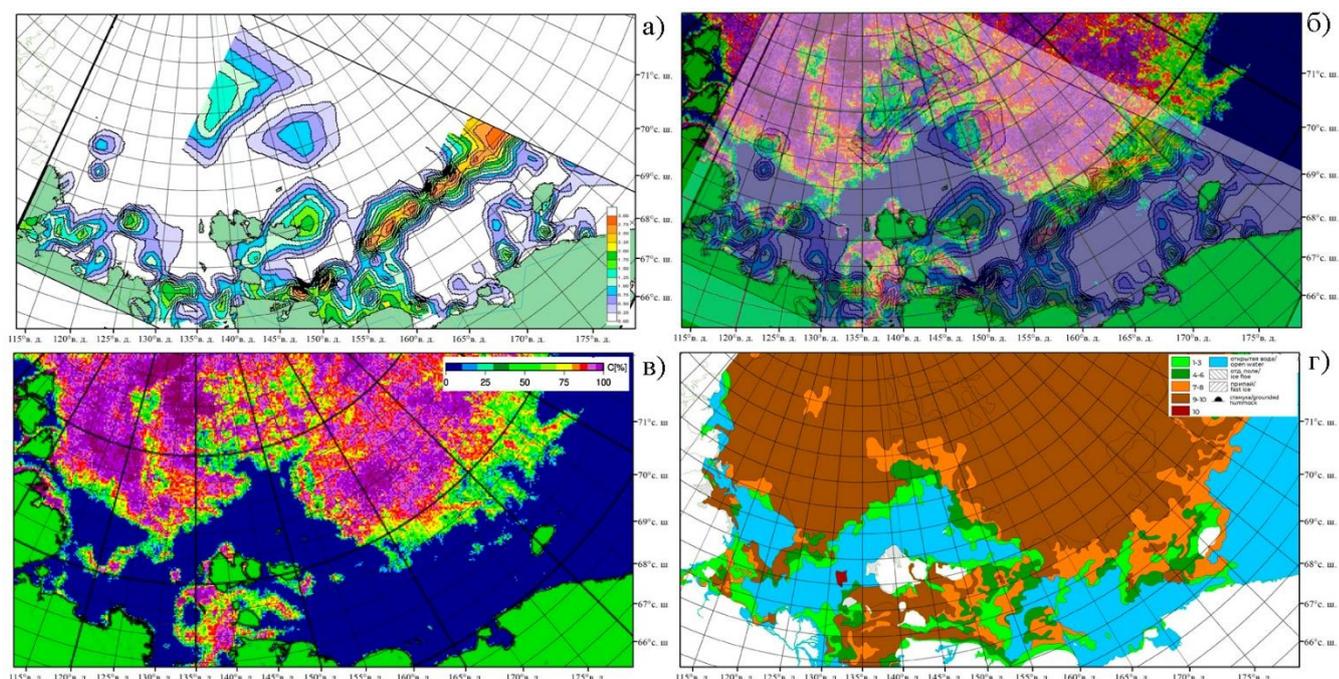
сплоченность льда, значительную часть пикселей составляет поверхность воды. Одновременно поверхность битого льда влажная, покрыта снежицами. Таким образом, яркостная температура такой зоны в целом близка к яркостной температуре воды и при расчете сплоченности льда по данным СМР определяется как чистая вода.

Помимо размера ледяных полей, еще один параметр, по большей части косвенно, но, предположительно, и напрямую влияет на определение сплоченности морского льда в период интенсивного таяния – загрязненность. Загрязненность косвенным образом влияет на яркостные температуры поверхности льда: в период интенсивных процессов таяния загрязненные льды разрушаются быстрее и на них образуется большее количество снежиц. Такие льды хуже идентифицируются методами СМР, так как их яркостные температуры схожи с яркостной температурой воды. Предположительно, напрямую загрязненность влияет на определение сплоченности льда по данным СМР следующим образом: при таянии загрязненного льда его поверхность становится схожей с поверхностью влажной почвы, а с увеличением влажности почвы уменьшается коэффициент излучения.

Методами дистанционного зондирования Земли загрязненные льды можно определить только по снимкам высокого разрешения в видимом диапазоне, однако сцены таких снимков редки и покрывают лишь небольшие участки акватории, над которыми в летний период в большинстве случаев присутствует облачность, и зимой загрязненность льда не видно под толщей снега. Данные же экспедиционных исследований покрывают небольшие районы и нерегулярны. Одним из самых ценных источников информации об областях загрязненного льда в российских арктических морях являются карты авиаразведок ААНИИ 1950-1980 гг. В неопубликованных работах, предоставленных В. М. Смоляницким, представлены оценки загрязненности на основе обобщения материалов авиаразведок для морей Лаптевых, Восточно-Сибирского и Карского. На рисунке 4 приводится пример ледовой обстановки для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского 26 июля 2020 г. На рисунке 4б видно, что в целом районы сильной загрязненности льда, полученные по данным авиаразведки, совпадают с областями, где ледовая карта ААНИИ (рис.

4г) показывает наличие морских льдов различной сплоченности, а на изображении сплоченности, полученной по данным СМР в этих областях показана, в основном, чистая вода. При анализе данного района на снимках в видимом диапазоне выявлено, что, например, в районе устья реки Колыма преобладали сплоченные и разреженные льды с различными размерами льдин (как битые, так и обломки полей, ледяные поля), сильно разрушенные и судя по более темному цвету на снимках Landsat, сильно загрязненные.

По данным авиаразведок в российских арктических морях области загрязненных льдов достаточно обширны, таким образом, для более точного влияния загрязненности на определение сплоченности по данным СМР требуется дальнейшее углубленное исследование.



**Рис. 4.** Загрязненность морского льда в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском в июле (а) на основе данных авиаразведок ААНИИ за период 1953-1976 гг. (рисунок предоставлен Смоляницким В.М.). Шкала загрязненности определяется по 3-бальной шкале; (в) - сплоченность льда, полученная с помощью алгоритма ASI, 26 июля 2020 г.; (б) – карта загрязненности (а), наложенная на изображение ASI (в); (г) – обзорная ледовая карта ААНИИ от 24-26 июля 2020 г.

Оценена площадь дрейфующего льда в период максимальной разрушенности, который определяется методами спутниковой микроволновой радиометрии как чистая вода – «невидимых» зон. Были выбраны два года с различной ледовой

обстановкой в конце августа: 2017 и 2019. В 2017 г. площадь таких «невидимых» зон составила 14% от всей площади льда в СЛО, а в 2019 году – 11%. Также была оценена сезонная изменчивость «невидимых» зон на примере Карского моря: наибольшая площадь таких «невидимых» зон в Карском море в 2020 г. наблюдалась в июле и достигла 17% от всей площади моря или 42% от площади всего ледяного покрова в Карском море в июле. Расчеты были проведены для небольшого временного периода, однако они показали, насколько существенна площадь льдов, которые не идентифицируются по данным СМР летом.

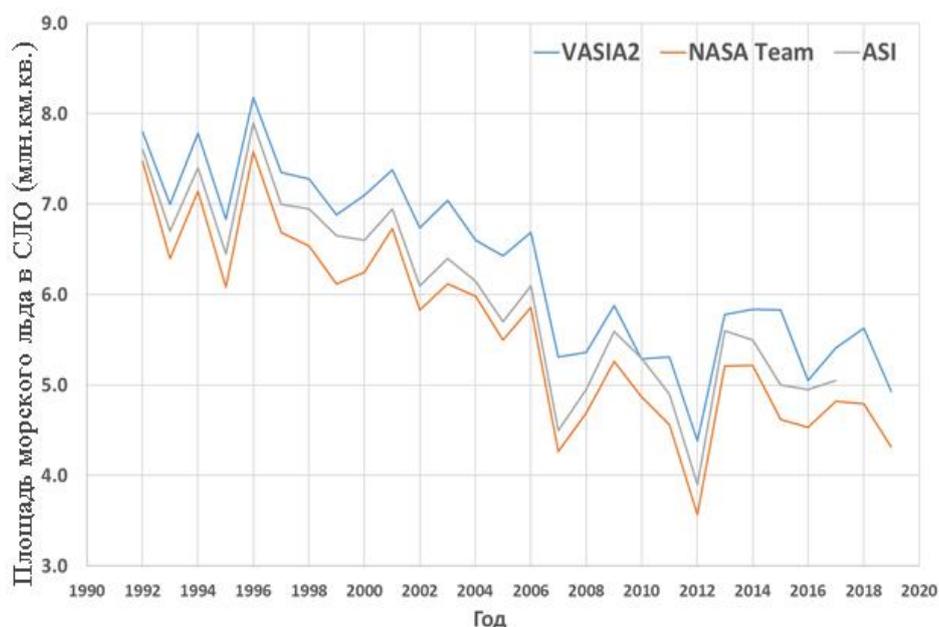
**В главе 5 «Оценка площади морского льда в Северном Ледовитом океане по данным спутниковой радиометрии»** приводится сравнение площади морского льда в СЛО, рассчитанной с помощью алгоритма VASIA2 в период максимального таяния ледяного покрова в 2019 г. с ледовыми картами ААНИИ (**раздел 5.1**).

Для сопоставления площади морского льда в СЛО были отобраны две обзорные ледовые карты за периоды 25-27 августа и 01-03 сентября 2019 г. Результаты сравнения опубликованы в работе (Алексеева и др., 2020). 25-27 августа площадь СЛО, покрытая льдом любой сплоченности от 0,1 до 10 баллов по алгоритму VASIA2 на 1,1% меньше, чем по обзорной карте ААНИИ, а 01-03 сентября - на 3,4% больше. При этом стоит отметить, что площади очень сплоченных и сплошных льдов отличались незначительно: на 1,2% 25-27 августа и 2,4% 01-03 сентября. Исходя из карт ААНИИ, такие льды занимали 66% от всей акватории, покрытой льдами какой-либо сплоченности 25-27 августа и 70% 01-03 августа 2019 г. Таким образом, представленные результаты, наряду с результатами сравнения алгоритма VASIA2 с данными судовых наблюдений в главе 3 предварительно позволяют высоко оценить точность определения сплоченности морского льда с помощью данного алгоритма для выполнения ряда научных задач, таких, например, как определение межгодовой и сезонной изменчивости площади морского льда.

**В разделе 5.2** проанализирована изменчивость площади морского льда в СЛО, рассчитанной с помощью различных алгоритмов. В силу наблюдающихся климатических изменений и экстремальной деградации ледяного покрова в СЛО в

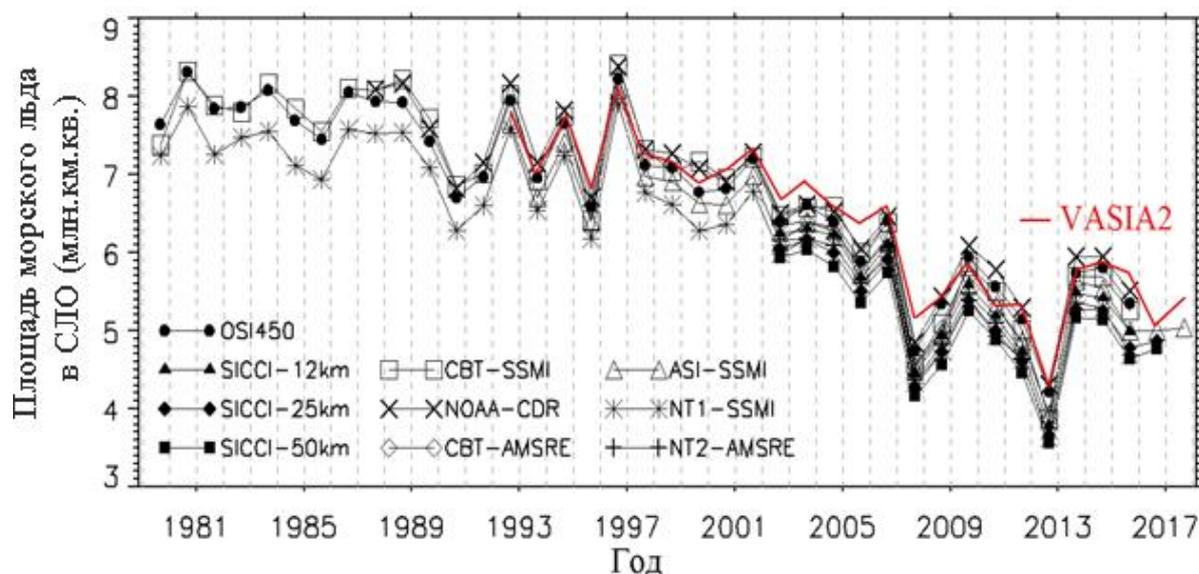
последние десятилетия вопрос точного определения и прогнозирования дальнейших изменений привлекает внимание большого числа ученых во всем мире. По приблизительным оценкам на основе различных источников информации о ледяном покрове площадь морского льда в СЛО в период максимальной разрушенности уменьшилась почти вдвое. В настоящее время отсутствует единое мнение, какой из алгоритмов самый точный, у каждого алгоритма есть свои преимущества и недостатки. Поэтому в научных работах при исследовании изменений ледяного покрова, авторы применяют либо алгоритм, разработанный в их организации, а, следовательно, наиболее знакомый и простой в обработке, либо приводят графики изменения площади морского льда в СЛО, рассчитанной по нескольким алгоритмам, таким образом, представляя ее возможный диапазон.

На рисунке 5 приведена изменчивость площади ледяного покрова в сентябре, рассчитанной по трем рассматриваемым в работе алгоритмам NT, ASI и VASIA2. В целом, разница между тремя алгоритмами из года в год остается приблизительно одинаковой, алгоритм NT во все годы показывает минимальные значения площади льда, алгоритм VASIA2 – максимальные, а ASI - средние. Лишь в некоторые годы эта разница изменяется, например, в 2010 году разница между алгоритмами была минимальной, а у алгоритмов VASIA2 и ASI – значения были практически одинаковыми. В 2015 году, наоборот – разница между всеми тремя алгоритмами была максимальной. Так как при расчете площади льда учитываются пиксели, в которых сплоченность равна или больше 15%, то площадь основной части ледяного покрова СЛО (сплоченных льдов в Арктическом бассейне) должна определяться практически одинаково всеми алгоритмами. Несмотря на то, что алгоритмы, которые были выбраны для исследования в данной работе, занижают сплоченность в сплоченных льдах в летний период, они не занижают ее настолько, чтобы в пределах обширного ледяного массива Арктического бассейна (где преобладают сплоченные, очень сплоченные и сплошные льды) на их месте показывать сплоченность менее 15%. Таким образом, разница в расчете площади льда в период интенсивного таяния по различным алгоритмам определяется площадью зон редких льдов, а также «невидимых» зон.



**Рис. 5.** Изменение площади морского льда в СЛО в период минимального развития ледяного покрова (сентябрь) по данным трех алгоритмов NASA Team, ASI и VASIA2

На рисунке 6 значения площади морского льда в СЛО, определенные по алгоритму VASIA2, нанесены на график изменения площади льда по нескольким алгоритмам из работы (Kern et al., 2019). На графике представлены последние версии алгоритмов. Разница между значениями площади льда, определенной по этим алгоритмам колеблется от 100 000 до 600 000 км<sup>2</sup>. Следует отметить, что значения площади льда, рассчитанные с помощью алгоритма VASIA2, наиболее схожи с алгоритмом OSI450.



**Рис. 6.** Площадь морского льда в Северном Ледовитом океане (сентябрь), рассчитанная по различным алгоритмам (Kern et al., 2019) и алгоритму VASIA2

**В заключении** сформулированы следующие основные **выводы**:

1. Сравнение данных СМР (три алгоритма: NASA Team, ASI и VASIA2) с данными визуальных судовых наблюдений показало:

- Данные СМР в летний и зимний периоды переоценивают общую сплоченность ледяного покрова в редких льдах и недооценивают в сплоченных льдах. Максимальные ошибки в определении сплоченности у всех алгоритмов - в разреженных льдах.

- В зимний период алгоритм NT показывает лучшие результаты по сравнению с летним периодом как в редких, так и в сплоченных льдах. Алгоритмы ASI и VASIA2 в зимний период существенно ухудшают свои показатели в редких льдах, средние ошибки становятся в 5-6 раз больше, чем летом. В сплоченных льдах зимой средние ошибки у алгоритма ASI также увеличиваются, а алгоритм VASIA2, наоборот, показывает лучшие результаты в сплоченных льдах – минимальные средние ошибки в данной градации среди трех исследуемых алгоритмов.

2. Анализ количества начальных льдов и ниласа, стадии разрушенности, размеров ледяных полей и загрязненности позволил оценить влияние природных факторов на точность определения сплоченности льда по данным СМР:

- В летний период алгоритмы плохо определяют начальные льды и нилас, образовавшиеся среди старых льдов в период нерегулярного образования льда в конце лета - начале осени. Зимой начальные льды и нилас определяются частично.

- Анализ изменения средних ошибок при различных стадиях разрушенности показал, что разрушенность менее всего из трех рассматриваемых алгоритмов влияет на алгоритм VASIA2.

- На основе дешифрирования снимков в видимом диапазоне, представлен комплекс факторов, которые приводят к «невидимым» зонам на снимках СМР. Эти факторы включают: высокую стадию разрушенности, формы ледяных полей, сплоченность и расположение/конфигурация «невидимых» зон. Косвенным либо прямым образом к этим факторам относится также загрязненность ледяного покрова.

- Площадь таких «невидимых» зон льда на снимках СМР может составлять 11-14% от всей площади льда в СЛО в конце августа (на примере двух лет с различной ледовой обстановкой). Сезонные изменения «невидимых» зон льда рассмотрены на примере Карского моря: наибольшая их площадь наблюдалась в июле и достигла 17% от всей площади моря или 42% от площади всего ледяного покрова в июле.

3. Проведенное сравнение, а также оценка площади морского льда в СЛО по различным алгоритмам позволила высоко оценить надежность алгоритма VASIA2:

- Площадь ледяного покрова, рассчитанная с помощью алгоритма VASIA2, хорошо совпала с площадью льда, определенной по ледовой карте ААНИИ.

- Относительно других алгоритмов, алгоритм VASIA2 показывает одни из максимальных значений площади, которые наиболее схожи с результатами новых гибридных алгоритмов (OSI-450).

Исходя из результатов исследования нельзя однозначно порекомендовать какой-либо из рассмотренных алгоритмов, как самый «лучший», так как каждый из алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки, которые проявляются при различных природных условиях. Однако стоит отметить, что алгоритм VASIA2 показал хорошие результаты в сравнении с широко используемыми в мире алгоритмами, особенно в летний период, а также в сплоченных льдах в зимний период. На основании результатов данной работы, не рекомендуется использовать данные спутниковой микроволновой радиометрии в практических целях для судоходства и использовать их для составления ледовых карт в летний период (только при полном отсутствии другой спутниковой информации и при сопоставлении их со спутниковыми данными в видимом и инфракрасном диапазоне, имеющимися в тот же день в соседних областях). При определении площади морского льда в СЛО, учитывая обширные «невидимые» зоны дрейфующих льдов в августе/сентябре (а это период минимального развития ледяного покрова, который берется для оценки межгодовых изменений площади морского льда в СЛО) и результаты сравнений с натурными данными, лучшие результаты показывает алгоритм VASIA2 наряду с современными гибридными

алгоритмами (например, OSI-450). Таким образом, исходя из результатов данного исследования, можно рекомендовать алгоритм VASIA2 для использования при решении ряда научных задач.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

1. Алексеева Т.А., Раев М.Д., Тихонов В. В., Соколова Ю.В., Шарков Е.А., Фролов С.В., Сероветников С.С. Сравнительный анализ площади морского льда в Арктике, полученной по данным спутниковой микроволновой радиометрии (алгоритм VASIA2), с ледовыми картами ААНИИ. Исследование Земли из космоса. 2020. № 6. С. 17-23 (RSCI, ВАК, РИНЦ, Scopus, IF (РИНЦ) - 0,916, IF-0).
2. Alekseeva T.A., Tikhonov V. V., Frolov S. V., Raev M. D., Repina I. A., Sokolova Yu. V., Afanasieva E. V., Sharkov E. A., Serovetnikov S. S. Comparison of Satellite Microwave and Visual Shipborne Data on Sea Ice Concentration. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55, 1292-1301 (РИНЦ, ВАК, Scopus, IF 0,806).
3. Alekseeva, T.; Tikhonov, V.; Frolov, S.; Repina, I.; Raev, M.; Sokolova, J.; Sharkov, E.; Afanasieva, E.; Serovetnikov, S. 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 (21), 2481 (ВАК, WoS, Scopus, Q1, IF 5,001).
4. Алексеева Т.А., Тихонов В. В., Фролов С.В., Раев М.Д., Репина И.А., Соколова Ю.В., Афанасьева Е.В., Шарков Е.А., Сероветников С.С. Сравнение сплоченности ледяного покрова по данным спутниковой микроволновой радиометрии с данными визуальных судовых наблюдений. *Исследование Земли из космоса*, 2018, №6, 65-76. DOI: 10.31857/S020596140003369-6 (RSCI, ВАК, РИНЦ, Scopus, IF (РИНЦ) - 0,916, IF-0).
5. Tikhonov V.V., I. A. Repina, M. D. Raev, E. A. Sharkov, V. V. Ivanov, D. A. Boyarskii, T. A. Alexeeva, N. Yu. Komarova. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data. // *Advances in Space*

Research. 2015. V. 56. N 8. P. 1578-1589. DOI:10.1016/j.asr.2015.07.009 (BAK, WoS, IF 1.358).

6. Tikhonov V. V., Boyarskii D. A., Sharkov E. A., Raev M. D., Repina I. A., Ivanov V. V., Alexeeva T. A., Komarova N. Yu. Microwave Model of Radiation from the Multilayer “Ocean-atmosphere” System for Remote Sensing Studies of the Polar Regions. // Progress In Electromagnetics Research B. 2014. V. 59. P. 123 –133. DOI:10.2528/PIERB14021706 (BAK, SCOPUS, IF 1,898).

7. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? Исследование земли из космоса, 2013, № 4, с. 50-65 DOI 10.7868/S0205961413040076 (RSCI, BAK, PИHЦ, Scopus, IF (PИHЦ) - 0,916, IF-0).

8. Тихонов В. В., И.А. Репина, Т.А. Алексеева, В.В. Иванов, М.Д. Раев, Е.А. Шарков, Д.А. Боярский, Н.Ю. Комарова. Восстановление сплоченности ледяного покрова Арктики по данным SSM/I. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т.10. № 2. С. 182-193 (SCOPUS, WoS, PИHЦ, BAK, IF (PИHЦ) - 0,812).

9. Репина И.А., Тихонов В.В., Алексеева Т.А., Иванов В.В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю. Электродинамическая модель излучения арктического ледяного покрова для решения задач спутниковой микроволновой радиометрии. // Исследование Земли из космоса. 2012. № 5. С. 29-36 (RSCI, BAK, PИHЦ, Scopus, IF (PИHЦ) - 0,916, IF-0).

10. Т. А. Алексеева, С.В. Фролов. Сравнительный анализ спутниковых и судовых данных о ледяном покрове в морях Российской Арктики. Исследование Земли из космоса. 2012 г. № 6, 69-76 (RSCI, BAK, PИHЦ, Scopus, IF (PИHЦ) - 0,916, IF-0).

Данные судовых наблюдений включены в базу данных ААНИИ:

Фролов С.В., Макаров Е.И., Третьяков В.Ю., Сероветников С.С., Алексеева Т.А., Гришин Е.А., Пряхин С.С., Саперштейн Е.Б., Ярославцева С.И., Сергеева И.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621801 «СТК-ЛЕД». Правообладатель ФГБУ «ААНИИ». Заявка № 2019621009, дата поступления 11.06.2019, Дата гос. рег. в Реестре баз данных 17.10.2019.