



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО - МОК и комплексного управления
прибрежными зонами

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ НАУЧНО- КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

На тему: Арктический морской лед по данным спутниковых пассивных
микроволновых измерений

Исполнитель _____ Животовская Маргарита Андреевна _____
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ д.ф.-м.н. исп. директор ЛСО РГГМУ _____
(ученая степень, ученое звание)

_____ Кудрявцев Владимир Николаевич _____
(фамилия, имя, отчество)

« ___ » _____ 20__ г

Санкт-Петербург

2021

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является исследование восстановления концентрации морского льда по данным спутниковых микроволновых радиометров.

Для достижения данной цели был поставлен ряд задач:

1) Провести анализ литературы, посвящённой изучению характеристик морского льда и описывающей теоретические основы спутникового дистанционного зондирования Земли в микроволновом диапазоне электромагнитного спектра;

2) Исследовать закономерности появления областей ошибочно идентифицированного морского льда в ледовых алгоритмах, использующих данные микроволновых радиометров, Арктике, связанных с экстремальными погодными условиями;

3) Проверить эффективность усовершенствованного метода восстановления сплочённости морского льда с помощью набора данных MODIS Sea Ice Extent L3;

4) На основании алгоритмов, использующих данные микроволновых радиометров, проанализировать основные морфометрические характеристики заприпайных полыней Карского моря;

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 5 глав основной части, заключения и списка использованных источников.

Результаты работы докладывались на различных отечественных (КИМО`20 в Калининграде) и международных конференциях (PIERS`2019 in Rome и IGARSS`21 in Brussels), а также были опубликованы в 3-х статьях, входящих в перечень изданий, рекомендованных Президиумом Высшей аттестационной комиссии.

Арктический морской лёд является основой для понимания проблемы глобального потепления и прогнозирования погоды и климата (Vihta T., 2014). Таяние морских льдов вызовет интенсификацию судоходства на Северном морском пути и увеличение площади действия полярных циклонов.

Независимость от солнечного освещения и доступность измерений делают спутниковые микроволновые радиометры незаменимыми при наблюдении за характеристиками морского льда.

Методы восстановления сплочённости морского льда, основанные на использовании измерений спутниковых микроволновых радиометров можно разделить на две группы.

- Первая группа использует данные на частотах 18-34 ГГц, то есть измерения К и Ка диапазона. Для расчёта сплочённости морского льда используется градиентное соотношение радиоярких температур на частотах данного диапазона.

$$GR(23V18V) = (T_{я}(23.8V) - T_{я}(18.7V)) / (T_{я}(23.8V) + T_{я}(18.7V))$$

$$GR(36V18V) = (T_{я}(36.5V) - T_{я}(18.7V)) / (T_{я}(36.5V) + T_{я}(18.7V)) ,$$

где $T_{я}(18.7V)$, $T_{я}(23.8V)$, $T_{я}(36.5V)$ – вертикально поляризованные $T_{я}$ микроволнового излучения системы морской лед – океан – атмосфера на частотах 18.7, 23.8 и 36.5 ГГц соответственно. Максимальное пространственное разрешение у таких методов может достигать ~12 км. К этой группе относятся такие алгоритмы, как Cal/Val (Hollinger J. P., 1991.) и Bootstrap (Comiso J., 1986).

- Вторая группа использует данные на частотах около 90 ГГц, измерения W диапазона. Такие методы основаны на низкой поляризации излучения морского льда и высокой поляризации излучения поверхности открытого моря, свободного ото льда.

$$PD = T_{85}^V - T_{89}^H,$$

где T_{89}^V – радиояркая температура на 89 ГГц на вертикальной поляризации и T_{89}^H – радиояркая температура на 89 ГГц на горизонтальной поляризации. К этой группе относятся ASI алгоритм (Kaleschke L. et al., 2001; Spreen G. et al., 2008) и N90 (Svendsen E. et al., 1987).

Однако вне зависимости от использованного диапазона в восстановленных сплочённостях льда наблюдаются ошибки. Связаны они могут быть, как и с изменчивостью электромагнитных свойств морской поверхности, так и с изменчивостью состояния атмосферы (Смирнов и др., 2010). Стоит также отметить, что при оценке точности методов используются, как правило, данные по сплоченности, полученные в условиях сухих атмосфер с низким содержанием жидкокапельной и парообразной влаги и при отсутствии сильного ветра, что приводит к занижению реальной погрешности методов (Заболотских Е.В., 2019)

Для улучшения точности методов восстановления сплочённости морского льда используются погодные фильтры. Они представляют собой пороговые значения для нормализованных градиентных соотношений измерений на 18-37 ГГц (Gloersen P. and Cavalieri D. J., 1986). Измерения превышающие пороговые значения классифицируются как измерения над открытой морской поверхностью. Однако использование погодных фильтров в ряде случаев приводит к потере данных с низкими концентрациями льда и ухудшению пространственного разрешения, при этом, не удаляя все области ошибочно оцененного льда (Andersen S. et al., 2007; Ivanova N. et al., 2015).

1. Для исследования закономерностей появления и характеристик областей SSIC использовались 2 стандартных продукта по сплочённости морского льда, созданных путем применения разных алгоритмов восстановления SIC к данным измерений спутникового микроволнового радиометра AMSR2. Первый – это среднесуточный продукт уровня Level 3 университета Бремена (SIC1) (<https://seaice.uni-bremen.de>), основанный на использовании измерений PD на частоте 89 ГГц и алгоритма ASI с

пространственным разрешением 6.25×6.25 км. Погодные фильтры в алгоритме ASI используют GR каналов 36,5 и 18,7 ГГц (положительный для воды, но близкий к нулю или отрицательный для льда) и GR каналов 23,8 и 18,7 ГГц (0,04 для воды, $<0,04$ для льда). Второй – продукт уровня Level 3 (SIC2) японского аэрокосмического агентства (JAXA от англ. Japan Aerospace Exploration Agency) (<https://gportal.jaxa.jp>). SIC2 создается путем применения алгоритма Bootstrap к T_y на частотах 18.7 и 36.5 ГГц. Данный продукт распространяется с оригинальным временным разрешением, соответствующим разрешению измерений AMSR2 с шагом сетки $\sim 10 \times 10$ км. Фильтрация в открытом океане производится на основе предварительно установленных диаграмм рассеяния GR и коэффициента поляризации PD на частоте 18,7 ГГц для морского льда и поверхности морской воды. Эти диаграммы разброса, а также пороговые значения для GR могут быть получены либо с помощью численного моделирования T_y системы морской лед - открытый океан - атмосфера, либо с помощью измерений T_y с помощью AMSR2. В первом случае на погодные фильтры влияют все типы ошибок моделирования, в последнем случае ошибки в определении типа поверхности являются источником недостатка погодного фильтра.

Для исследования:

- Была создана база данных экстремальных погодных явлений (ПЦ и ВТЦ) в Арктике за период 2015-2020 гг.
- Для принятия решения о ложной диагностике наличия морского льда для данной базы были собраны и проанализированы сопутствующие снимки радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 А,В и оптические изображения MODIS, а также карты морского льда Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) и Норвежского метеорологического института (НМИ).
- Далее рассматривались только случаи ложной диагностики льда: области SSIC определялись как области морского льда, диагностированные в

полях SIC1 и/или SIC2, не подтвержденные альтернативными («истинными») данными.

- Для диагностированных случаев SSIC были рассчитаны атмосферные параметры CLW, WVC, SWS и τ – полное атмосферное поглощение микроволнового излучения на частоте 10.65 ГГц, которое характеризует интегральное содержание влаги в атмосфере в парообразной и жидкокапельной форме.

- Для каждой области SSIC были определены максимальные для данной области значения CLW, WVC, SWS и τ для оценки влияния атмосферных параметров на параметры SSIC: площадь области, для которой $SIC > 15\%$ (S_e), общую площадь ложно диагностированного льда (S_a) и его максимальные и средние значения сплочённости (SIC_{max} и SIC_{av} соответственно) для обоих продуктов.

За период 2012-2020 гг. было обнаружено 1452 случая появления областей SSIC для продукта SIC1 и 972 случая для продукта SIC2. Пространственная и временная изменчивость параметров SSIC была проанализирована. На рисунке 1 показаны поля SIC1 (а) и SIC2 (б) над Гренландским морем во время прохождения высокоширотного внетропического циклона 16 марта 2020 года. Скорость ветра вдоль кромки морского льда превышала 30 м/с. Развитие этого ВТЦ не сопровождалось высокими значениями параметров влагосодержания атмосферы: средние значения WVC не превышали 10-12 кг/м², тогда как средние CLW составляли около 0,15 кг/м². На рисунке 1 (в, г, д) показаны поля WVC, SWS и CLW за 16 марта 2020 года, полученные из измерений T_я уровня 3 AMSR2. На рисунке 1 (ф) показаны изображения PCA Sentinel-1 А и В вместе с картой морского льда ААНИИ за 16 марта 2020 года. Характер угла сигнала радара зависимость обратного рассеяния, несомненно, указывает на отсутствие морского льда в районе, намеченный красной линией. Эта красная линия очерчивает область, где $SIC1 > 15\%$ и $SIC2 > 15\%$. Карта AARI подтверждает ЭТОТ ВЫВОД.

Среднемесячное (за период 2012-2020 гг.) количество случаев появления SSIC для обоих продуктов SIC представлено на рисунке 2. В течение сезона замерзания в Арктике (зимний сезон, октябрь-май) оно примерно одинаково для обоих продуктов. Максимум приходится на декабрь - 40 случаев всего, 31 случая для SIC1 и 34 для SIC2 (одна и та же область SSIC может быть обнаружена как в полях SIC1, так и в полях SIC2.) Продукт JAXA (SIC2) в летний сезон (в июне-сентябре) имеет меньше областей ложно диагностированного морского льда, чем зимой. Максимальное среднее количество случаев появления SIC2 – 5 (наблюдается в сентябре). В свою очередь, в полях SIC, построенных по данным университета Бремена (SIC1) в июле и августе диагностируется по 26 случаев SSIC – совсем не намного меньше, чем в декабре.

Таким образом, SIC1 в летний сезон имеет гораздо больше ложно диагностированного льда, чем SIC2. Эти результаты, а также анализ коэффициентов корреляции между параметрами ложного морского льда для обоих продуктов и параметрами атмосферы позволяют предположить, что на появление областей SSIC в продукте университета Бремена гораздо большее влияние оказывают параметры влагосодержания атмосферы (влагозапас и водозапас), поскольку именно они достигают максимальных значений в Арктике в летний период (коэффициенты корреляции C_{av1}/WVC , C_{max1}/WVC , C_{av2}/SWS , C_{max2}/SWS варьируются от 0,7 до 0,9 в разных регионах). На рисунках 3 и 4 эту корреляцию можно увидеть для параметров SSIC для обоих продуктов.

На рисунке 4 приведены среднемесячные значения средней (SIC_{av}) и максимальной (SIC_{max}) сплочённости ложно диагностированного морского льда в продуктах SIC1 и SIC2, а также среднемесячные максимальные значения влагозапаса атмосферы WVC в областях SSIC за 2012–2020 гг. Данный график иллюстрирует сделанное выше предположение о причине появления областей SSIC в продукте SIC1: и $SIC1_{av}$, и $SIC1_{max}$ коррелируют с влагозапасом атмосферы. Аналогичная корреляция (не иллюстрируется)

наблюдается и с водозпасом облаков. Видно, что в летний сезон параметры SSIC для продукта SIC1 имеют более высокие значения, чем зимой.

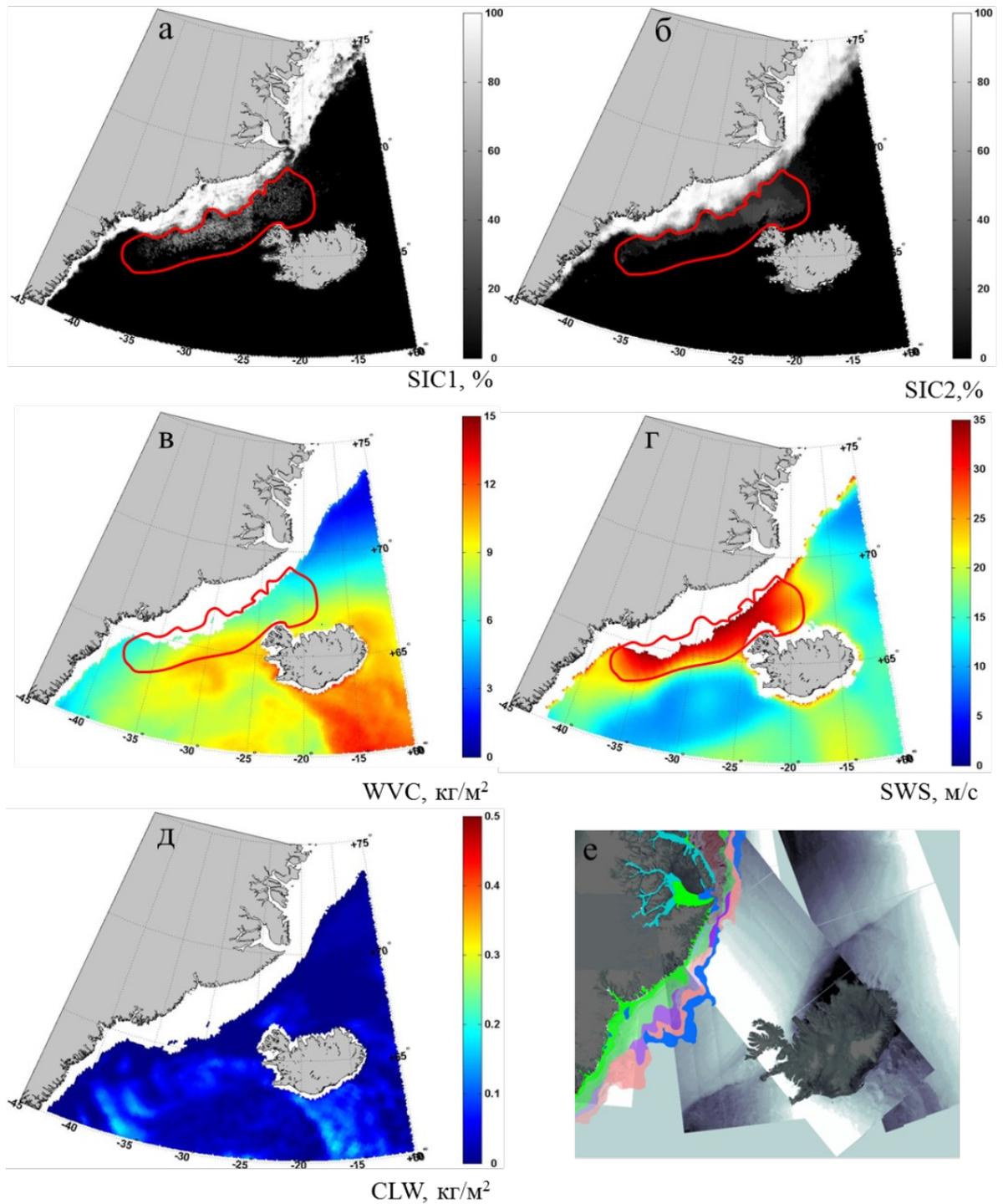


Рисунок 1. (а) SIC1 (среднесуточный продукт университета Бремена); (б) SIC2 (среднесуточный продукт университета JAXA); (в) WVC, (г) SWS и (д) CLW, восстановленные по данным AMSR2.; (е) изображение PCA Sentinel-1 В и карта типов льда ААНИИ 16 марта 2020.

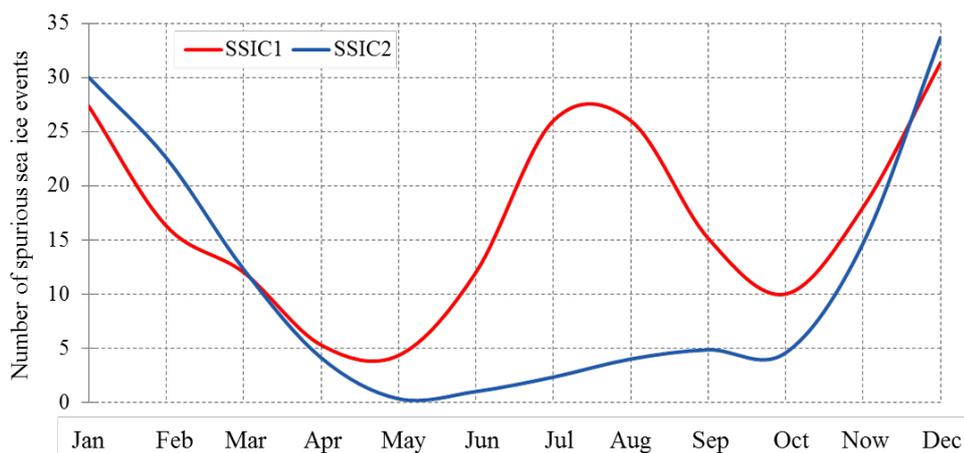


Рисунок 2. Среднемесячное количество случаев SSIC для продуктов SIC1 и SIC2 за период 2015-2020 гг.

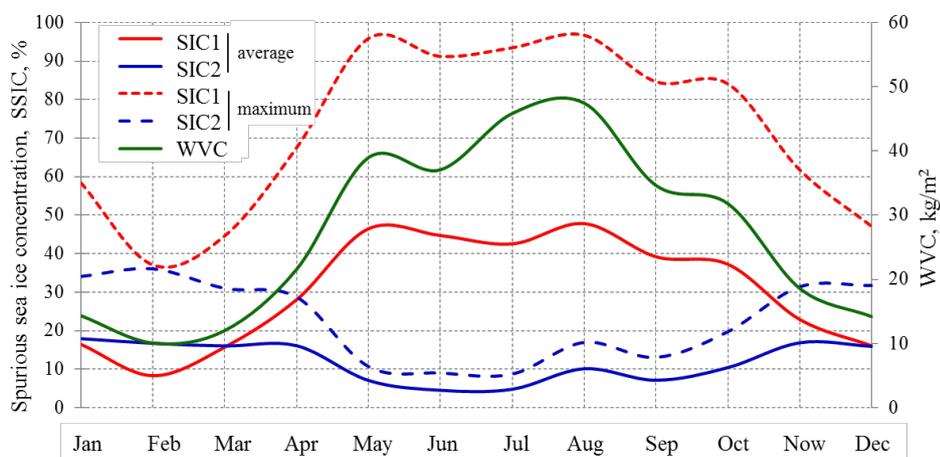


Рисунок 3. Среднемесячные и максимальные за месяц значения сплоченности SIC (SIC_{av}, SIC_{max}) и влагозапаса атмосферы WVC в областях SSIC для продуктов SIC1 и SIC2 за период 2012-2020 гг.

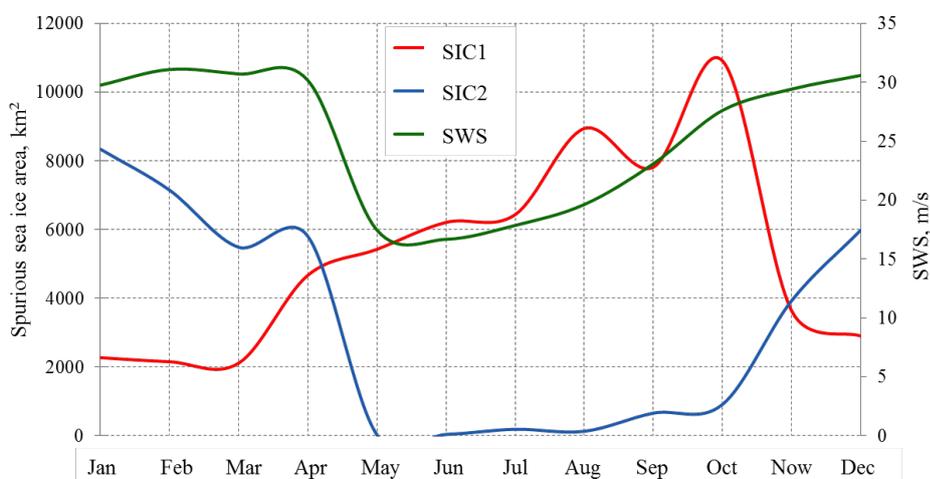


Рисунок 4. Среднемесячные значения площади ложно идентифицированного льда (Sa) и максимальные значения скорости приводного ветра SWS в областях SSIC для продуктов SIC1 и SIC2 за период 2012- 2020 гг.

Сопоставление среднемесячных значений площади ложно идентифицированного льда и скорости приводного ветра (рисунок 5) позволяет заключить, что причиной появления областей SSIC в продукте JAXA (SIC2) является именно сильный ветер. Зимний сезон в Арктике характеризуется увеличением частоты и интенсивности циклонов, что отражается и на увеличении площади областей SSIC. На SIC1 ветер не оказывает такого воздействия: несмотря на то, что количество случаев диагностики SSIC зимой так же велико, как и летом, площадь льда в областях SSIC существенно меньше, чем в летние месяцы, когда причиной служит повышенное содержание влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков.

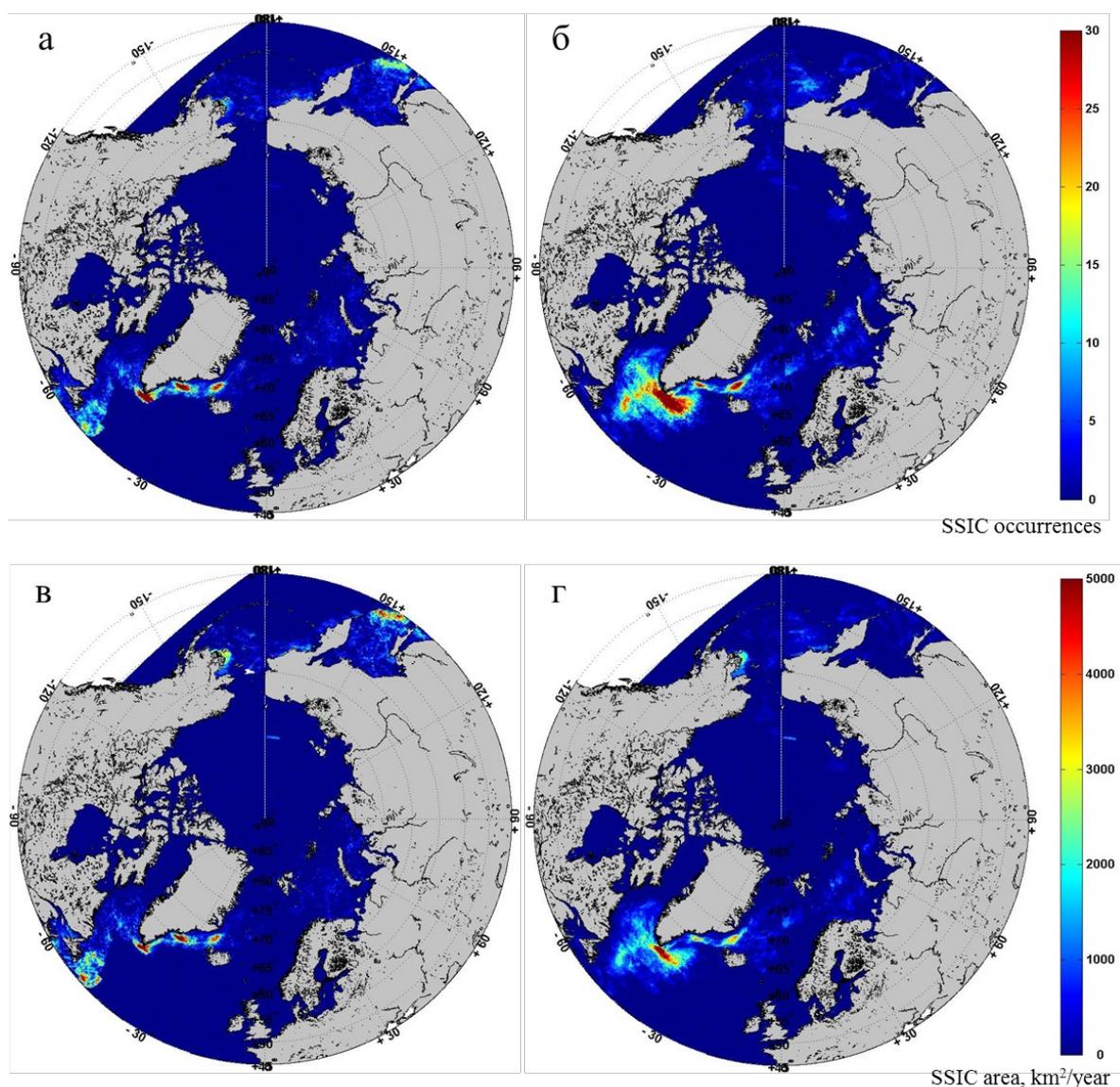


Рисунок 5. Количество случаев диагностики SSIC за в SIC1(а) и в SIC2(б), пространственное распределение площади SSIC1 (в) и SSIC2 (г) за период 2015-2020

На рисунке 5 представлено пространственное распределение количества событий ложной диагностики морского льда для SIC1 (рисунок 5а) и SIC2 (рисунок 5б), а также среднегодовые площади ложного морского льда для SIC1 (рисунок 5в) и SIC2 (рисунок 5г) за 2012-2020 гг. Чаще всего в обоих продуктах области SSIC появлялись в Северной Атлантике в районе южной оконечности о.Гренландия. В этом районе практически не бывает морского льда (за исключением прибрежного морского льда) в любое время года. Большое количество ВТЦ с ураганным ветром в этом районе [48] приводит к появлению областей SSIC. Карта распределения случаев появления и площади SSIC у двух продуктов отличается. В Датском проливе и море Ирмингера и у о. Ньюфаундленд SSIC1 присутствует чаще и имеет бóльшую площадь. В остальной же части этого региона SSIC2 имеет намного бóльшую область распространения и площадь. SSIC в SIC2 появляется чаще, чем в SIC1, и имеет бóльшую область распространения также и в Баренцевом, Гренландском и Норвежском морях, а также в морях Лаптевых, Чукотском и Беринговом.

2. Для валидации усовершенствованного метода восстановления сплочённости морского льда (Заболотских Е.В. и др., 2019) по данным измерений AMSR2 на 89 ГГц был использован набор данных MODIS Sea Ice Extent L3. Было решено использовать именно оптические данные многоспектрального радиометра в качестве in-situ данных, так как они позволяют однозначно отличить пиксели открытой воды от пикселей морского льда в безоблачных условиях, благодаря высокому контрасту между чистой водой и льдом.

Отличие усовершенствованного метода от других алгоритмов, использующих данные микроволнового радиометра AMSR2 на 89 ГГц, заключается в наличии нефиксированных точек привязки.

Для расчета SIC на сетке 3x3 км для арктического региона данные о площади морского льда (кодируется как 0 для открытой воды или 1 для

морского льда) были усреднены. Поскольку данные о площади морского льда MODIS недоступны в условиях облачности, в результирующем наборе MODIS SIC отсутствует много данных. SIC, полученная из AMSR2 с использованием усовершенствованного метода, также была получена с разрешением 3x3 км (измерения уровня 1R на частоте 89 ГГц).

Стоит отметить, что такой подход к извлечению SIC из данных MODIS приводит к дискретности полученных значений, поэтому для анализа площади морского льда использовались только пиксели с SIC, равным 0% и 100%.

На рисунке 6а показана среднемесячная площадь морского льда со 100%-ной сплочённостью льда и площадь 100% открытой воды, полученную по данным MODIS и усовершенствованным методом AMSR2, а на рис. 6б показана среднесуточная площадь 100% сплоченности морского льда и 100% открытой воды за март 2019 г. На обоих графиках MODIS показывает большую площадь 100% SIC и для 100% открытой воды. Это можно объяснить дискретностью значений MODIS SIC. Если расширенный метод AMSR2 показывает широкий диапазон значений SIC, MODIS показывает грубое усреднение. Значения AMSR2 превышают значения MODIS только на среднемесячной площади открытой воды в августе. Можно сделать вывод, что значения MODIS SIC почти всегда выше, чем AMSR2 SIC.

Были рассчитаны среднесуточные MODIS SIC и AMSR2 SIC за период с 1 марта 2019 г. по 31 августа 2019 г. для Арктического региона. Суммарная среднеквадратичная разница между MODIS SIC и AMSR2 SIC оказалась ~2%. На рис. 7 показано пространственное распределение средней разницы данных MODIS SIC с марта по август 2019 г. за вычетом SIC AMSR2. Наибольшие различия наблюдаются на краях льда вблизи открытой воды. Особенно это видно на картах среднемесячной разницы (не показаны). Также большие различия наблюдаются вдоль 80° - 85° с.ш., начиная со 100° до 180° в.д.

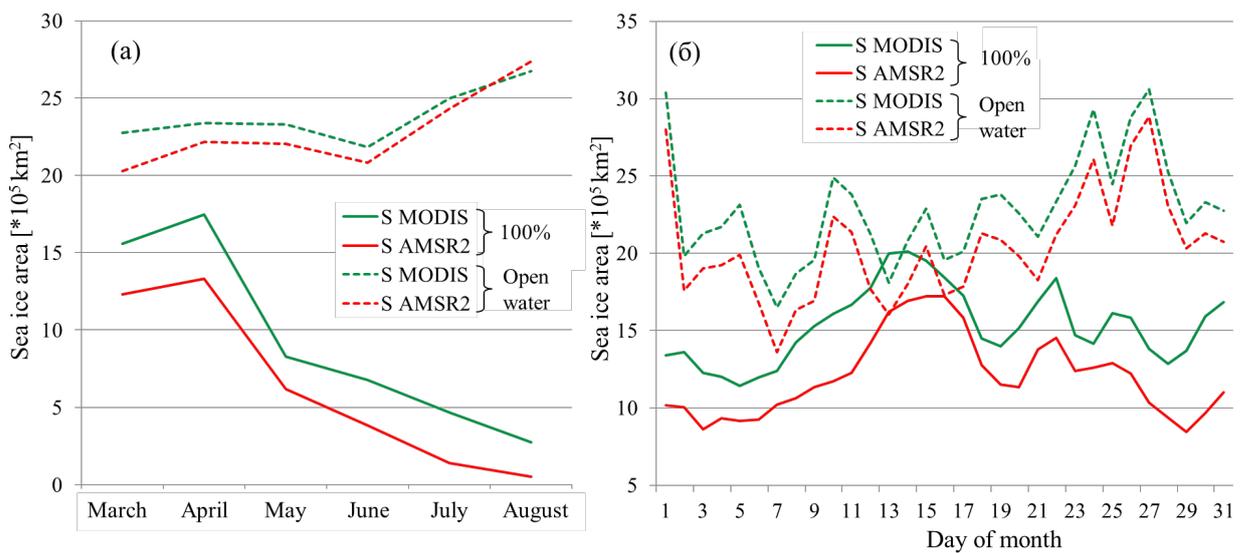


Рисунок 6. (а) Среднемесячные за период с марта по август 2019 г. и (б) среднедневные за март 2019 г. площади 100% сплочённого льда и 100% открытой воды

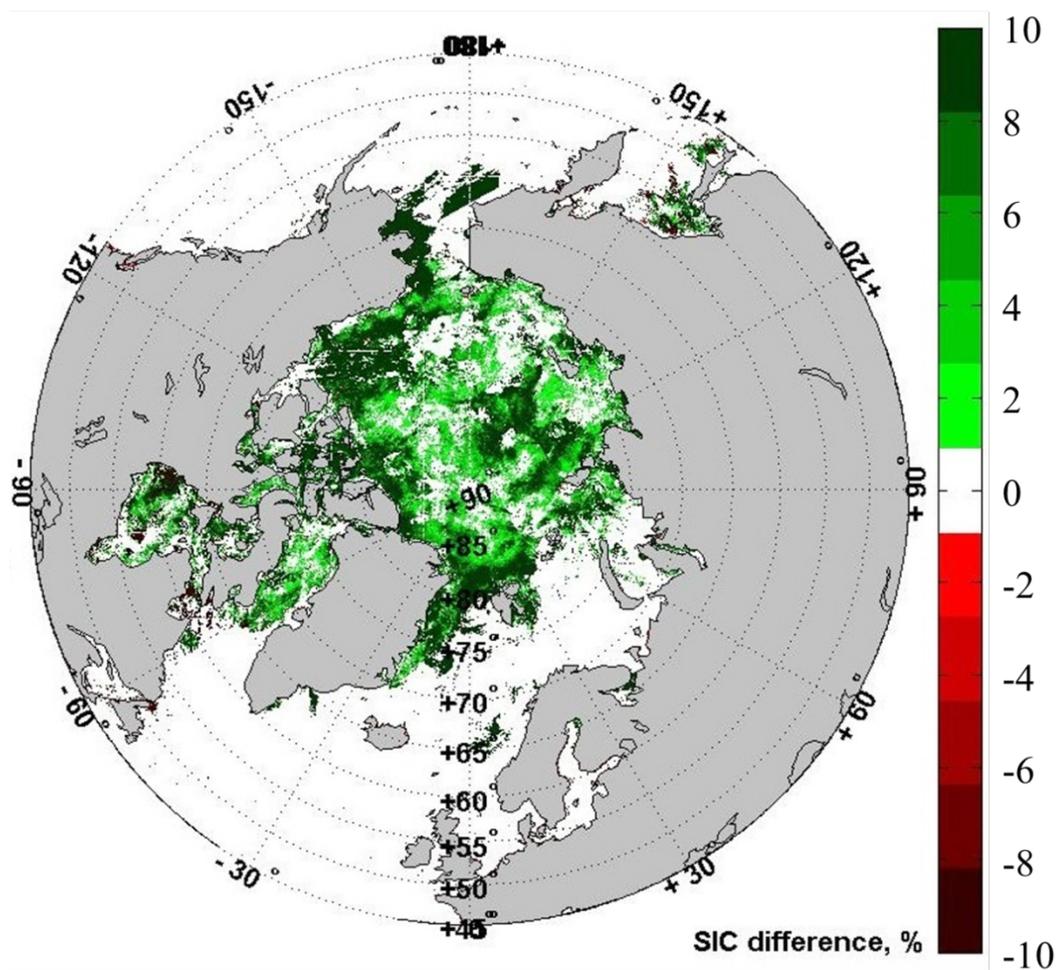


Рисунок 7. Пространственное распределение среднемесячной разницы между MODIS SIC и AMSR2 SIC за период с марта по август 2019 г.

3. Для расчёта и анализа характеристик заприпайных полыней Карского моря использовались поля сплочённости продукта университета Бремен с разрешением 6,25 x 6,25 км с 2003 по 2019 г., исключая сезон 2011/2012 гг. Для каждой полыньи определялись время жизни и средние значения морфометрических параметров. Для 15 лет наблюдений были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения срока существования, длины, ширины и площади для каждой из обнаруженных 2109 полыней.

На рисунке 8 представлено среднемесячное количество обнаруженных полыней для каждого из районов за весь период исследования. Для всех исследуемых районов среднемесячное максимальное количество полыней наблюдается в мае. В этом месяце происходит повышение температуры воздуха и изменение направления ветра на отжимное (Carsey F.D., 1992). Наибольшее среднемесячное количество полыней зафиксировано в мае для полыней ОЕ, что вызвано взломом припая на северных выходах в Обский и Енисейский заливы. Минимальное среднемесячное количество зарегистрировано для полыней ЮНЗ в ноябре.

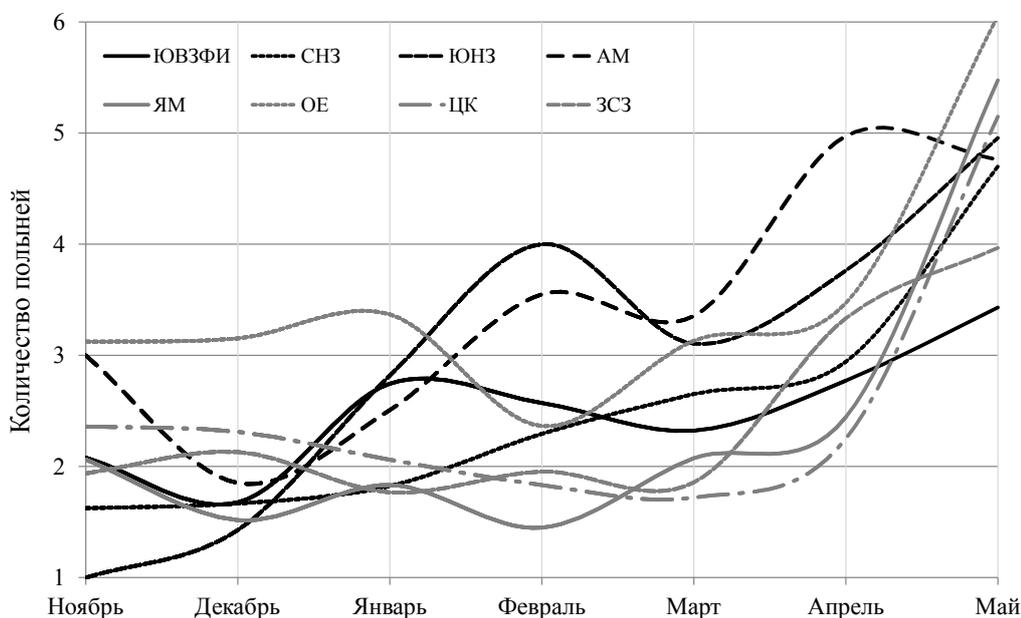


Рисунок 8. Среднемесячное количество обнаруженных полыней за исследуемые месяцы в каждом из исследуемых районов Карского моря за период 2003–2019 гг., исключая сезон 2011/2012 гг.: 1 — Юго-Восточная полынья Земли Франца Иосифа; 2 — Северная Новоземельская; 3 — Южная Новоземельская; 4 — Амдерминская; 5 — Ямальская; 6 — Обь-Енисейская; 7 — Центральная Карская; 8 — Западная Североземельская

На рис. 9 представлены среднемесячные площади полыней Карского моря за весь исследуемый период. Площадь полыней по всем районам увеличивается начиная с апреля и в мае достигает максимальных значений для каждого района. В это время припай в море разрушается, толщина ледяного покрова уменьшается, полыньи с лёгкостью образуются как под действием отжимных ветров, так и под влиянием тёплых вод. У полыней ЮНЗ, СНЗ и АМ также наблюдается повышение среднемесячной площади в феврале и марте, что может быть связано с действием западных и юго-западных ветров в эти месяцы.

В ходе этой части работы было установлено, что площадь полыней Карского моря за рассмотренный период увеличивается со скоростью $3,64 \text{ км}^2$ в год, что в условиях отсутствия трендов в скорости и направлении ветра свидетельствует об уменьшении толщины ледяного покрова Карского моря. Изменения климата Арктики привели к более позднему ледоставу осенью и раннему разрушению льда весной.

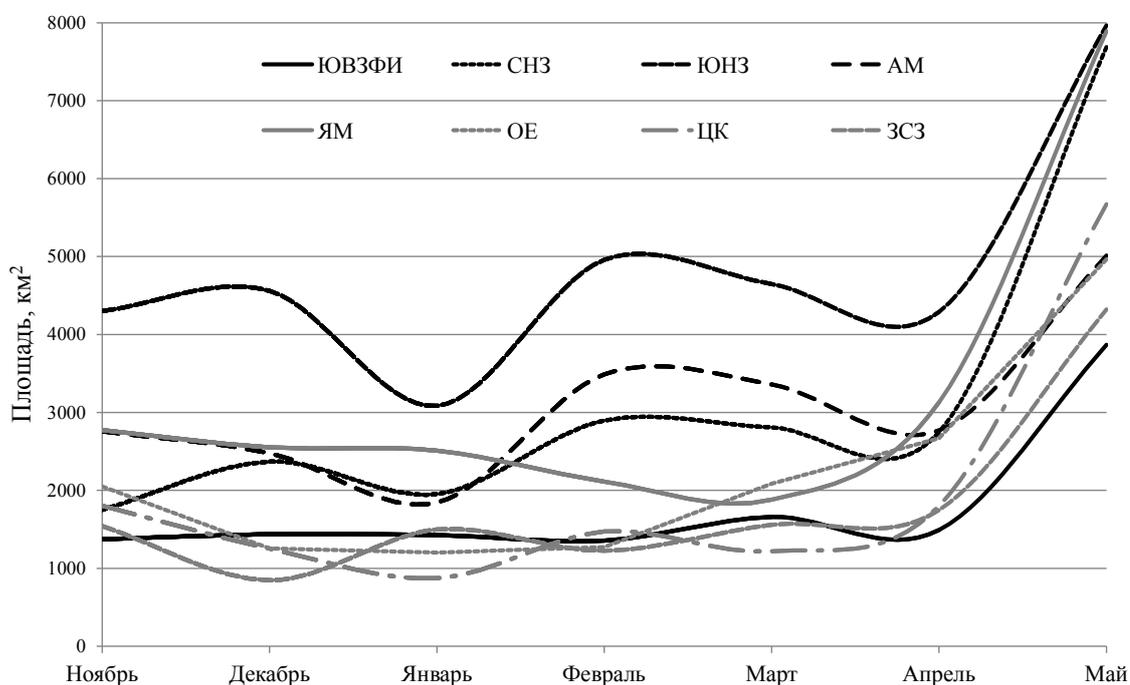


Рис. 9. Среднемесячные значения площади полыней Карского моря за период 2003–2019 гг., исключая сезон 2011/2012 гг.: 1 — Юго-Восточная полынья Земли Франца Иосифа; 2 — Северная Новоземельская; 3 — Южная Новоземельская; 4 — Амдерминская; 5 — Ямальская; 6 — Обь-Енисейская; 7 — Центральная Карская; 8 — Западная Североземельская

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- В работе исследованы основные закономерности появления ложного льда в алгоритмах восстановления сплочённости.

Было установлено, что причиной появления ложного льда в продукте университета Бремена являются, в основном, параметры влагосодержания атмосферы, тогда как в продукте JAXA - сильные ветры.

- Проверена эффективность усовершенствованного метода восстановления сплочённости морского льда.

Усовершенствованный метод показывает меньшие значения площади морского льда по сравнению с площадями, вычисленными с помощью набора данных MODIS.

- Проанализированы основные морфометрические характеристики заприпайных полыней Карского моря.

Период возрастания количества полыней начинается в конце апреля – начале мая, что является более ранним периодом, чем указано в предыдущих исследованиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review // *Surv. Geophys.* – 2014. V. 35. № 5. – P. 1175–1214.
2. Hollinger, J. P. DMSP Special Sensor Microwave/Imager calibration/validation / J. P. Hollinger. // U.S. Nav. Res. Lab., Washington, DC. – 1991.
3. Comiso, J. Characteristics of Arctic winter sea-ice from satellite passive microwave and infrared observations // *J. Geophys. Res.* – 1986. – Vol. 91, № C1. – pp. 975–994.
4. Kaleschke L., Lüpkes C., Vihma T., Haarpaintner J., Bochert A., Hartmann J., Heygster G. SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis // *Can. J. Remote Sens.* – 2001. V. 27. № 5. P. 526–537.
5. Spreen, G. Sea Ice Remote Sensing Using AMSR-E 89GHz Channels/ G. Spreen, L. Kaleschke, G. Heygster. – 2008. – 12 p.
6. Svendsen E., Matzler C., Grenfell T.C. A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz // *Int. J. Remote Sens.* – 1987. V. 8. № 10. – P. 1479–1487.
7. Смирнов В.Г. Бушуев А.В., Захваткина Н.Ю., Лоцилов В.С. Спутниковый мониторинг морских льдов // *Проблемы Арктики И Антарктики.* – 2010. Т.85. № 2. – С. 62–76.
8. P. Gloersen and D. J. Cavalieri Reduction of weather effects in the calculation of sea ice concentration from microwave radiances. *Journal of geophysical research.* – 1986. vol. 91. – p. 3913-1319
9. Andersen S., Tonboe R., Kaleschke L., Heygster G., Pedersen L.T. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice // *J. Geophys. Res.* – 2007. V. 112. № C8.
10. Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A. et al. Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: An optimal algorithm and challenges // *Cryosphere.* – 2015. V. 9. – P. 1797–1817
11. K. Hall, and G. A. Riggs, “MODIS/Aqua Sea Ice Extent Daily L3 Global 1km EASE-Grid Day, Version 6.” Distributed by NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.
12. Е. В. Заболотских, Е. А. Балашова, Б. Шапрон. Усовершенствованный метод восстановления сплочённости морского льда по данным спутниковых микроволновых измерений вблизи 90 ГГц // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* – 2019. Т. 16. № 4. – С. 233–243.
13. Carsey F.D. Microwave remote sensing of sea ice. Washington: American Geophysical Union. – 1992. – 462 p.