

Ложная диагностика морского льда в Арктике спутниковыми микроволновыми радиометрами в экстремальных погодных условиях

М. А. Животовская¹, Е. В. Заболотских¹, Б. Шапрон^{2,1}

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 192007, Россия
E-mail: m.zhivotovskaia@rshu.ru*

² *Французский научно-исследовательский институт эксплуатации моря
Плузане, 29280, Франция
E-mail: bertrand.chapron@ifremer.fr*

Работа посвящена исследованию закономерностей появления областей ложно идентифицированного морского льда (spurious sea ice concentration — SSIC) в спутниковых продуктах по сплочённости, основанных на измерениях микроволнового радиометра Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) в экстремальных погодных условиях, связанных с развитием полярных циклонов (ПЦ) и внетропических циклонов (ВТЦ). Для проведения исследования была создана база ПЦ и ВТЦ в Арктике за период 2015–2018 гг. Для этой базы были собраны оптические и радиолокационные изображения поверхности океана, а также карты сплочённости морского льда Норвежского метеорологического института (НМИ) и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ). Анализировались два спутниковых продукта по сплочённости морского льда (sea ice concentration — SIC): среднесуточные значения SIC, рассчитанные с использованием алгоритма ARTIST Sea Ice (ASI), предоставляемые университетом Бремена, и значения SIC исходного временного разрешения, рассчитанные с помощью алгоритма Bootstrap, предоставляемые Японским агентством аэрокосмических исследований (Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA). Сопоставление полей SIC и карт НМИ и ААНИИ, а также оптических и радиолокационных снимков позволило выявить области SSIC, для которых по данным AMSR2 были рассчитаны значения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и скорости приводного ветра. Влияние данных параметров на появление и характеристики областей SSIC было исследовано для обоих продуктов по сплочённости морского льда. Было установлено, что причиной SSIC в продукте университета Бремена являются в основном параметры влагосодержания атмосферы, тогда как в продукте JAXA — сильные ветры. Наибольшее количество случаев ложной идентификации морского льда наблюдалось в районах наиболее частых ПЦ и ВТЦ. Были оценены площади ложно идентифицированного льда для обоих продуктов, которые оказались практически одинаковыми для зимних месяцев, но разными в летние месяцы.

Ключевые слова: морской лёд, Арктика, AMSR2, спутниковые продукты, экстремальные погодные явления

Одобрена к печати: 04.10.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-209-220

Введение

Спутниковые пассивные микроволновые измерения традиционно используются для определения сплочённости морского льда (*англ.* sea ice concentration — SIC). Эти данные являются одними из самых надёжных для оценки изменений климата и уменьшения площади морского льда за последние десятилетия (Comiso et al., 2017). В настоящее время существует несколько десятков методов восстановления SIC по данным спутниковых микроволновых радиометров. Некоторые из них, включая алгоритмы NASA Team (NT) (Cavalieri et al., 1984), Bootstrap (Comiso, 1983) и NORSEX (Svendsen et al., 1983), основаны на радиометрических измерениях в диапазоне 18–37 ГГц. Эти алгоритмы используют значительный радиояркостный контраст между излучением морского льда и морской воды. Другая группа алгоритмов, куда входят Svendsen (SVE) (Svendsen et al., 1987), Environment Canada’s Ice Concentration Extractor (ECICE) (Shokr et al., 2008) и ARTIST Sea Ice (ASI) (Kaleschke et al., 2001; Spreen et al., 2008),

использует измерения на частотах около 90 ГГц. Эти алгоритмы основаны на поляризационной разнице (*англ.* polarization difference — PD) между измерениями на вертикальной и горизонтальной поляризации. Микроволновое излучение морского льда на частотах W-диапазона слабо поляризовано независимо от его типа, в отличие от излучения морской воды. Значения PD поэтому, как правило, намного меньше для измерений надо льдом, чем для морской поверхности, что также делает возможным восстановление SIC. Использование высокочастотных (вблизи 90 ГГц) измерений спутниковых микроволновых радиометров позволяет получать карты сплочённости морского льда со сравнительно высоким пространственным разрешением, характерным для таких измерений. Соответствующие каналы измерений имеются, например, у таких спутниковых радиометров, как Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) и Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR).

Крупнейшие международные центры обработки данных спутниковых микроволновых радиометров распространяют спутниковые продукты по сплочённости морского льда и постоянно совершенствуют методы восстановления SIC. Ошибки при определении сплочённости морского льда по данным измерений спутниковых микроволновых радиометров могут быть связаны с изменчивостью как электромагнитных свойств морской поверхности, так и состояния атмосферы, поскольку на микроволновое излучение системы «морской лёд — океан — атмосфера» влияет большое количество параметров: тип льда и его температура, характеристики снежного покрова, приводный ветер, параметры влагосодержания атмосферы (влагозапас атмосферы и водозапас облаков, осадки) (Смирнов и др., 2010). При оценке точности методов используются, как правило, данные по сплочённости, 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, 2019). При повышении влагозапаса атмосферы (*англ.* water vapor content — WVC), водозапаса облаков (*англ.* cloud liquid water — CLW) и скорости приводного ветра (*англ.* surface wind speed — SWS) погрешности восстановления SIC увеличиваются, поскольку способность методов разделять радиояркие сигналы морского льда и морской воды ухудшается.

Это связано с тем, что и параметры влагосодержания атмосферы, и приводный ветер приводят как к увеличению радиояркой температуры ($T_{я}$) излучения системы на частотах K- и Ka-диапазонов, так и к уменьшению PD на частотах W-диапазона, т. е. к тому же эффекту, что и наличие в элементе разрешения морского льда. В результате на картах сплочённости появляются области ошибочно диагностированного морского льда (*англ.* spurious sea ice concentration — SSIC) (Cavalieri et al., 1995; Gloersen, Cavalieri, 1986).

Многоканальность спутниковых микроволновых радиометров позволяет минимизировать влияние атмосферы на восстановление сплочённости льда. Для эффективного удаления областей SSIC с карт морского льда используются специальные подходы, основанные на применении так называемых погодных фильтров, которые представляют собой пороговые значения для нормализованных градиентных соотношений (*англ.* gradient ratio — GR) измерений на 18–37 ГГц (Gloersen, Cavalieri, 1986). Пороговые значения определяются на основании результатов физического моделирования $T_{я}$ для системы «морской лёд — океан — атмосфера». Измерения, для которых GR превышают установленное пороговое значение, классифицируются как измерения над морской водой. Для фильтрации атмосферных эффектов при интерпретации измерений радиометра AMSR2 применяются два градиентных соотношения:

$$GR(36V18V) = \frac{T_{я}(36,5V) - T_{я}(18,7V)}{T_{я}(36,5V) + T_{я}(18,7V)}, \quad (1)$$

$$GR(23V18V) = \frac{T_{я}(23,8V) - T_{я}(18,7V)}{T_{я}(23,8V) + T_{я}(18,7V)}, \quad (2)$$

где $T_{я}(18,7V)$, $T_{я}(23,8V)$, $T_{я}(36,5V)$ — вертикально поляризованная $T_{я}$ микроволнового излучения системы «морской лёд — океан — атмосфера» на частотах 18,7; 23,8 и 36,5 ГГц соответственно.

Отношение $GR(23V18V)$ чувствительно к наличию парообразной влаги в атмосфере, а отношение $GR(23V18V)$ — к наличию жидкокапельной влаги облаков и осадков. Как правило, использование атмосферных фильтров позволяет успешно разделять причины избыточной радиояркостной температуры, хотя и приводит в ряде случаев к потере данных с низкими значениями сплочённости льда и/или к ухудшению пространственного разрешения полей сплочённости (Andersen et al., 2006; Ivanova et al., 2015). Тем не менее использование погодных фильтров помогает удалить области SSIC совсем не во всех случаях.

В работе (Заболотских, Шапрон, 2019) показано, что выбор пороговых значений для градиентных соотношений в значительной мере определяется видом используемой при моделировании геофизической модельной функции (ГМФ) зависимости излучения от скорости ветра. И поскольку неопределённость ГМФ тем больше, чем выше скорость ветра (Zabolotskikh, Charpon, 2018), эффективность использования погодных фильтров снижается в условиях, сопровождающихся высокими значениями скорости приводного ветра SWS.

Такие условия в Арктике часто связаны с экстремальными погодными явлениями внетропических (ВТЦ) и полярных (ПЦ) циклонов (Васильева и др., 2018; Smirnova et al., 2015). За год в Северном полушарии может формироваться более двухсот ВТЦ с диаметром в несколько тысяч километров. Наиболее интенсивные ВТЦ с ураганным ветром ($>32,7$ м/с) развиваются в зимний период и получают энергию из бароклинных регионов крупных тёплых течений, где в холодное время года преобладают большие контрасты температур в атмосфере. Пик активности мезоциклонической деятельности в Арктике над свободными ото льда морскими поверхностями также приходится на зимние месяцы. Вызвано это увеличением значений температурного градиента между сушей и океаном в холодное время года (Harold et al., 1999).

Цель данной работы заключалась в исследовании закономерностей появления областей ошибочно идентифицированного морского льда в Арктике, связанных с экстремальными погодными условиями. Эти закономерности были выявлены анализом карт сплочённости морского льда, построенных по данным стандартных спутниковых продуктов. Решение о наличии области SSIC принималось на основе сопоставления полей сплочённости льда и спутниковых оптических и радиолокационных снимков высокого пространственного разрешения и/или ледовых карт, построенных ледовыми экспертами. Детально методология исследования и использованные данные описаны в следующем разделе.

Методология и данные

Для исследования закономерностей появления и характеристик областей SSIC использовались два стандартных продукта по сплочённости морского льда, созданных применением разных алгоритмов восстановления SIC к данным измерений спутникового микроволнового радиометра AMSR2. Первый — это среднесуточный продукт уровня Level 3 (SIC1) университета Бремена (нем. Universität Bremen, англ. University of Bremen) (<https://seaice.uni-bremen.de>), основанный на использовании измерений PD на частоте 89 ГГц и алгоритма ARTIST Sea Ice (ASI) с пространственным разрешением $6,25 \times 6,25$ км (Spreen et al., 2008). Второй — продукт уровня Level 2 (SIC2) японского аэрокосмического агентства (Japan Aerospace Exploration Agency — JAXA) (<https://gportal.jaxa.jp>). SIC2 создаётся применением алгоритма Bootstrap (Comiso, 1983) к $T_{\text{я}}$ 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.

С целью анализа закономерностей появления областей SSIC в погодных условиях, сопровождающихся развитием скоростей ветра >15 м/с, была создана база данных экстремальных погодных явлений (ПЦ и ВТЦ) в Арктике за период 2015–2018 гг. Для принятия решения о ложной диагностике наличия морского льда для данной базы были собраны и проанализированы сопутствующие снимки радиолокатора с синтезированной апертурой (PCA) Sentinel-1A/B и оптические изображения MODIS, а также карты морского льда Арктического

и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) (<http://www.aari.ru>) и Норвежского метеорологического института (НМИ) (<https://www.met.no>). Далее рассматривались только случаи ложной диагностики льда: зоны SSIC определялись как области морского льда, диагностированные в полях SIC1 и/или SIC2 и не подтверждённые 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. Расчёт проводился применением алгоритмов восстановления параметров, описанных в работе (Zabolotskikh et al., 2013), к данным AMSR2 уровня Level 1R. Для каждой зоны SSIC были определены максимальные для данной области значения CLW, WVC, SWS и τ с целью оценки влияния атмосферных параметров на параметры SSIC: площадь области, для которой $SIC > 15\%$ (Se), общую площадь ложно диагностированного льда (Sa) и его максимальные и средние значения сплочённости (SIC_{max} и SIC_{av} соответственно) для обоих продуктов:

$$Sa = \sum S_i \cdot SIC_i, \quad (3)$$

$$Se = \sum S_i, \quad (4)$$

где S_i — площадь i -го пикселя, для которого $SIC_i > 15\%$.

Были рассчитаны и проверены на значимость общие коэффициенты корреляции между атмосферными параметрами и параметрами SSIC для всей Арктики, а также коэффициенты корреляции отдельно для каждого из морей, где наблюдались случаи появления SSIC.

Результаты

За период 2015–2018 гг. было найдено 638 случаев появления областей SSIC для продукта SIC1 и 427 случаев — для продукта SIC2. Области морского льда, диагностированные как SSIC, не всегда совпадали для продуктов SIC1 и SIC2. То есть количество случаев и регионы появления SSIC оказались разными для разных продуктов. Но иногда в полях сплочённости наблюдалось одно и то же событие.

Рисунок 1 (см. с. 213) иллюстрирует анализ одного из случаев SSIC. На нём приведён пример полей SIC1 (см. *рис. 1а*) и SIC2 (см. *рис. 1б*) в высокоширотном внетропическом циклоне 20 января 2017 г. Этот ВТЦ возник рано утром 19 января 2017 г. в Норвежском море и переместился в северо-западном направлении в сторону Шпицбергена. 20 января он полностью развился. Скорость ветра превышала 30 м/с. Развитие этого зимнего ВТЦ сопровождалось не очень высокими значениями параметров влагосодержания атмосферы: максимальные значения WVC не превышали 7 кг/м², а максимальные значения CLW составляли около 0,2 кг/м². На *рис. 1в–д* показаны поля WVC, SWS и CLW 20 января 2017 г. примерно в 01:15 GMT. На *рис. 1е* приведено изображение PCA Sentinel-1B, анализ которого позволяет диагностировать отсутствие морского льда в районе, обведённом красной линией. Данный вывод подтверждается ледовой картой НМИ за 20 января 2017 г. Красная линия очерчивает область, в которой $SIC1 \neq 0$ и/или $SIC2 \neq 0$. Для этой области были рассчитаны значения Se и Sa для пикселей с $SIC > 15\%$ по формулам (3) и (4): $Se1 = 5026$ км², $Se2 = 19521$ км², тогда как $Sa1 = 1188$ км² и $Sa2 = 4740$ км². Se означает площадь пикселей, в которых присутствует лёд любой сплочённости, превышающей 15%, в то время как Sa — площадь только морского льда в указанной области, т. е. по определению Se всегда больше, чем Sa . Для продуктов SIC1 и SIC2 соотношение Sa/Se составляет около 0,23–0,24, площадь ложного льда в SIC2 примерно в четыре раза превышает площадь ложного льда в SIC1. Пространственное распределение SSIC у обоих продуктов имеет форму облачной запятой, коррелирующей как с формой поля облачности, так и с формой самих полей ветра. При этом видно, что область SSIC во втором продукте (SIC2 от JAXA, показанная на *рис. 1б*) выглядит более плотной. Это обус-

ловлено оригинальным временным разрешением продукта SIC2 по сравнению со среднесуточным продуктом университета Бремена SIC1. Помимо Se и Sa были рассчитаны средние по выделенной области значения SIC (SIC_{av}) и его максимумы (SIC_{max}): $SIC1_{av} = 13\%$, $SIC1_{max} = 57\%$; $SIC2_{av} = 16\%$, $SIC2_{max} = 43\%$.

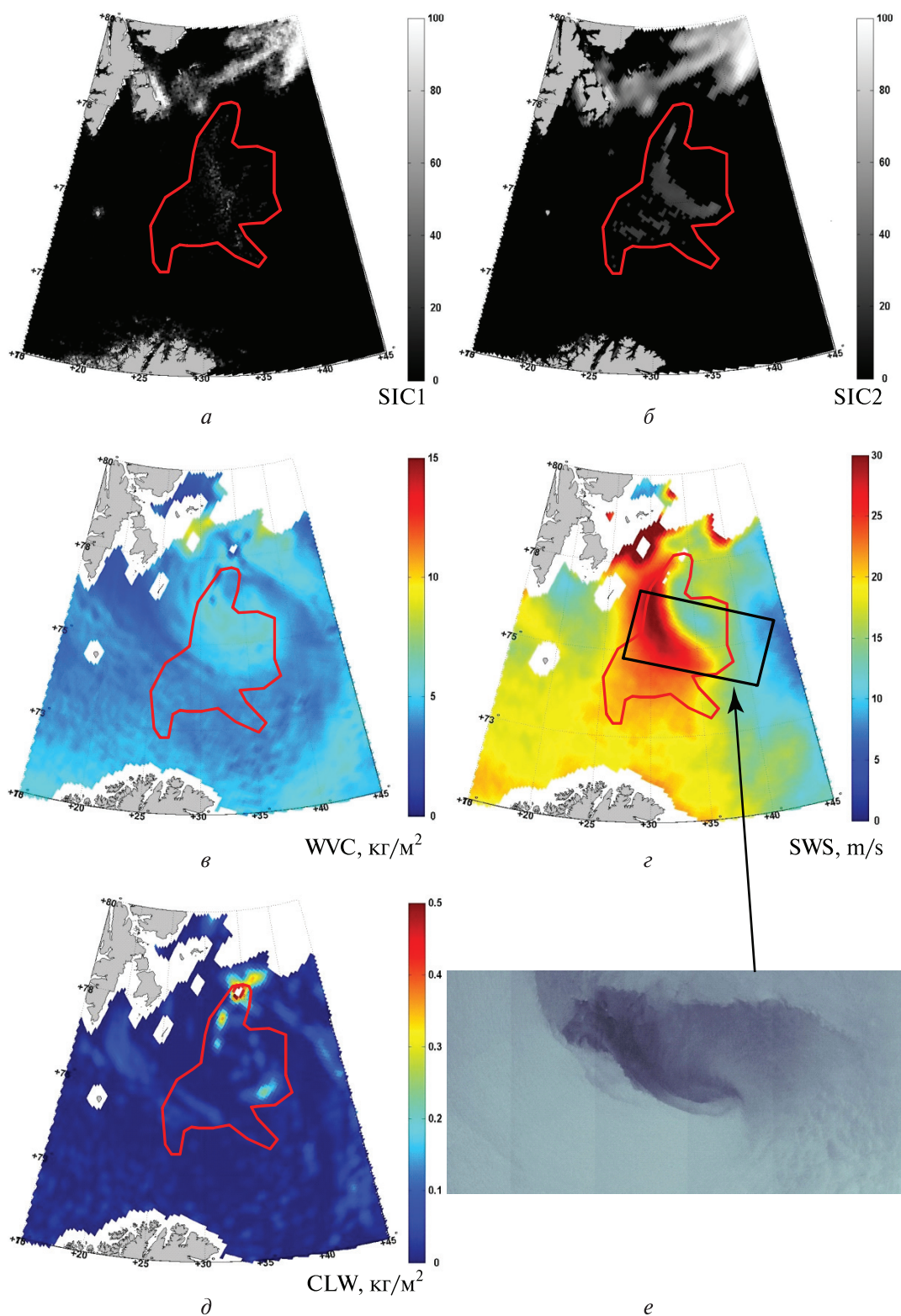


Рис. 1. SIC1 — среднесуточный продукт университета Бремена (а); SIC2 — продукт JAXA в 01:15 GMT (б); WVC (в), SWS (г) и CLW (д), восстановленные по данным AMSR2 в 01:15 GMT; изображение PCA Sentinel-1B в ~04:40 GMT 20 января 2017 г. (е)

Аналогичные расчёты были проведены для всех случаев диагностики SSIC.

Среднемесячное (за период 2015–2018 гг.) количество случаев появления SSIC для обоих продуктов представлено на *рис. 2*. В течение сезона замерзания в Арктике (зимний сезон, октябрь – май) оно примерно одинаково для обоих продуктов. Максимум приходится на декабрь: 121 случай всего, 94 случая для SIC1 и 101 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 (максимально 17 случаев в сентябре против 101 в декабре). В свою очередь, в полях SIC, построенных по данным университета Бремена (SIC1), в июле и августе диагностируется по 78 случаев SSIC — совсем ненамного меньше, чем в декабре.

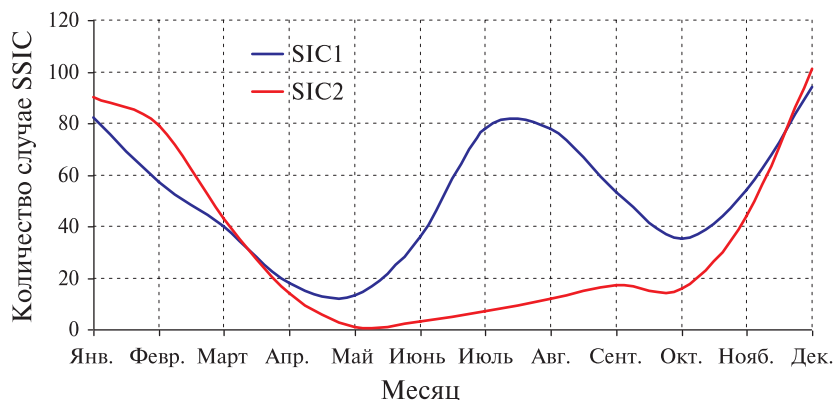


Рис. 2. Среднемесячное количество случаев SSIC за период 2015–2018 гг. для продуктов SIC1 и SIC2

Таким образом, SIC1 в летний сезон имеет гораздо больше ложно диагностированного льда, чем SIC2. Эти результаты 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.

На *рис. 3* 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 влагосаза атмосферы WVC в областях SSIC. Данный график иллюстрирует сделанное выше предположение о причине появления областей SSIC в продукте SIC1: и $SIC1_{av}$, и $SIC1_{max}$ коррелируют с влагосаза атмосферы. Аналогичная корреляция наблюдается и с водозапасом облаков (не иллюстрируется).

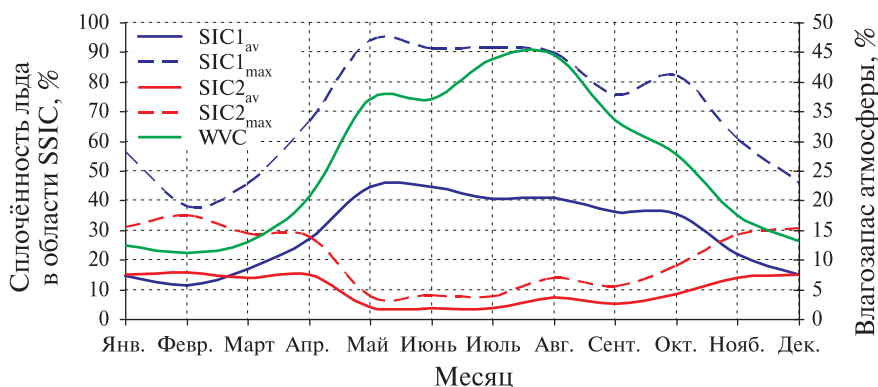


Рис. 3. Среднемесячные и максимальные за месяц значения сплочённости SIC (SIC_{av} , SIC_{max}) и влагосаза атмосферы WVC в областях SSIC для продуктов SIC1 и SIC2

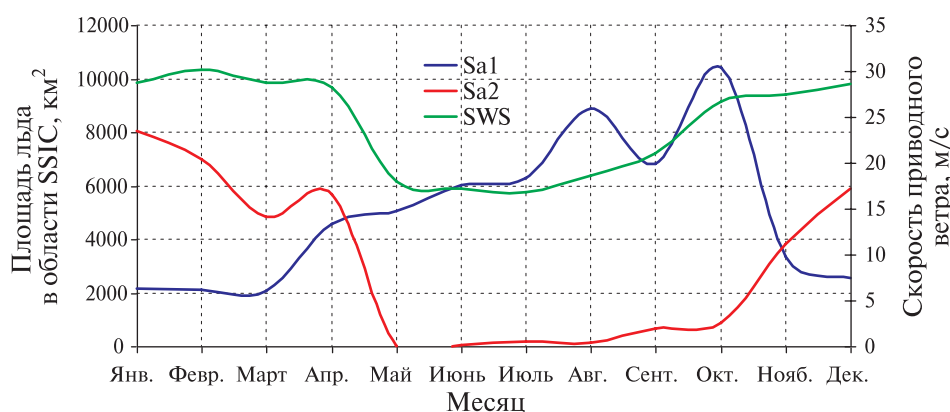


Рис. 4. Среднемесячные значения площади ложно идентифицированного льда (Sa) и максимальные значения скорости приводного ветра SWS в областях SSIC для продуктов SIC1 и SIC2

Сопоставление среднемесячных значений площади ложно идентифицированного льда и скорости приводного ветра (рис. 4) 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.

Коэффициенты корреляции между параметрами SSIC и параметрами атмосферы

Чтобы количественно оценить наблюдаемую корреляцию, были рассчитаны и проверены на значимость коэффициенты корреляции между параметрами SSIC для обоих продуктов и параметрами атмосферы для всего исследуемого региона и отдельных регионов: морей Баренцева, Карского, Лаптевых, Чукотского, Берингова, Охотского, Норвежского, Гренландского, Ирмингера и Девисова пролива, моря Лабрадор и северной части Атлантического океана. Почти во всех регионах коэффициенты корреляции $SIC1_{av}/WVC_{max}$ и $SIC1_{av}/CLW_{max}$ имеют высокую ($>0,7$) силу связи (по шкале Чеддока). Параметры SSIC2 ($SIC2_{av}$ и $SIC2_{max}$) имеют наибольшую положительную связь с SWS и отрицательную с параметрами влагосодержания (WVC_{max} и CLW_{max}) во всех регионах, кроме Северной Атлантики, Гренландии, Охотского моря. Стоит отметить также, что параметры SSIC1 имеют отрицательную корреляцию с SWS и положительную с остальными параметрами, и наоборот: параметры SSIC2 имеют положительную корреляцию с SWS, но отрицательную со всеми другими параметрами.

Пространственное распределение ложно диагностированного морского льда

На рис. 5 представлено пространственное распределение количества событий ложной диагностики морского льда для SIC1 и SIC2 за 2015–2018 гг., а на рис. 6 — среднегодовая площадь льда в областях SSIC. Чаще всего в обоих продуктах области SSIC появлялись в Северной Атлантике в районе южной оконечности о. Гренландия. Здесь в любое время года практически не бывает морского льда (за исключением прибрежного). Большое количество ВТЦ с ураганным ветром в этом районе (Васильева и др., 2018) приводит к появлению областей SSIC. Карты распределения случаев появления и площади SSIC у двух продуктов различаются. В Датском проливе, в море Ирмингера и у о. Ньюфаундленд SSIC1 присутствует чаще и с

бóльшей площадью. В остальной же части данного региона SSIC2 имеет намного более широкую область распространения и площадь. SSIC в SIC2 появляется чаще, чем в SIC1, и имеет бóльшую область распространения также в морях Баренцевом, Гренландском, Норвежском, Лаптевых, Чукотском и Беринговом.

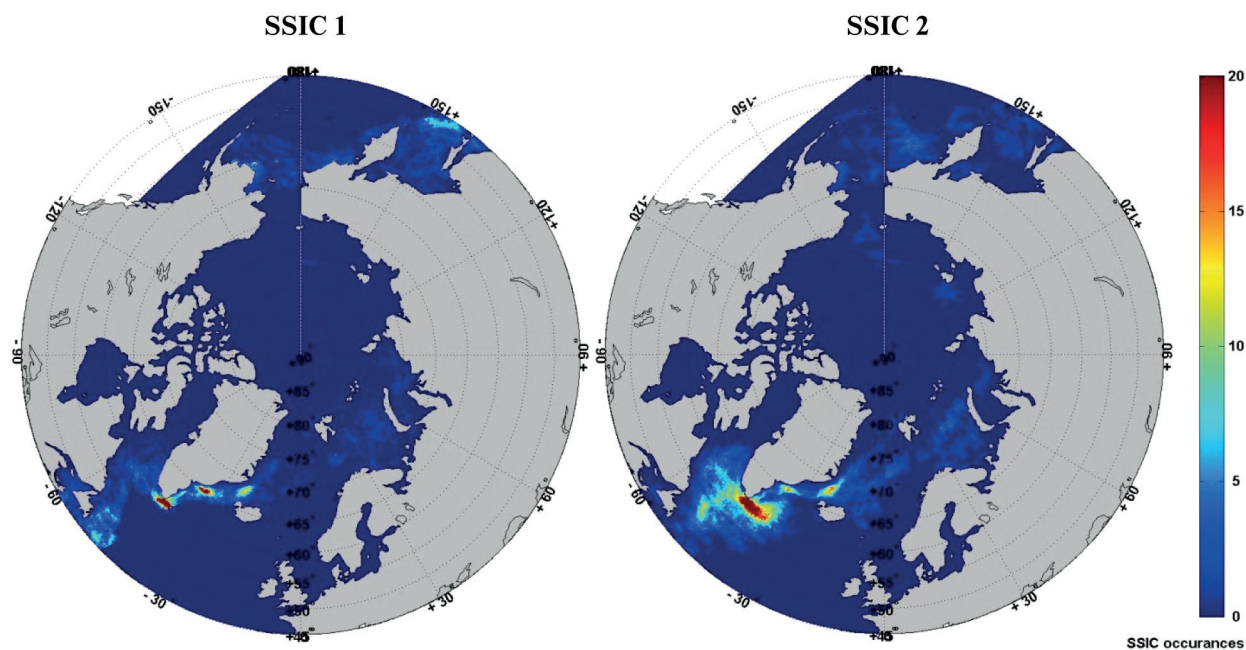


Рис. 5. Количество случаев диагностики SSIC за 2015–2018 гг.

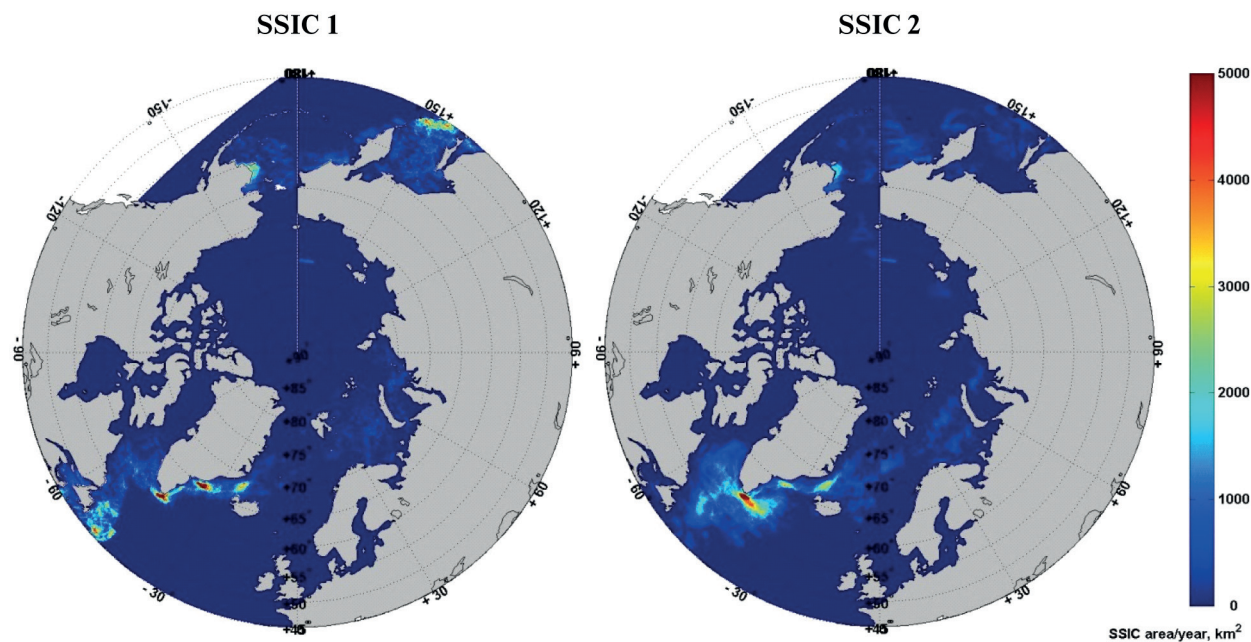


Рис. 6. Пространственное распределение площади SSIC1 и SSIC2, осреднённое за 2015–2018 гг.

Анализ пространственного распределения случаев появления SSIC для обоих продуктов показал, что чаще всего SSIC1 наблюдались в 2016 г., SSIC2 — в 2015 и 2018 гг. При этом ошибочный лёд в SIC1 в основном появлялся в Охотском море летом и осенью, в Беринговом море — с июня по декабрь, в Баренцевом море — в декабре–феврале и июне–августе,

в Карском море — только в летний период из-за полного оледенения моря зимой, в море Ирмингера — в основном зимой, в Северной Атлантике — весь год. Ошибочный лёд в SIC2 практически отсутствует с мая по август. Наибольшее число ВТЦ с ураганным ветром фиксируется в декабре и январе, и именно в эти месяцы наблюдаются наибольшие области SSIC1 и SSIC2.

Заключение

На основе анализа двух спутниковых продуктов по сплочённости морского льда SIC, основанных на данных измерений AMSR2, были исследованы закономерности появления областей ложно идентифицированного морского льда SSIC в экстремальных погодных условиях, связанных с развитием полярных и внетропических циклонов в Арктике за период 2015–2018 гг. Анализировались два спутниковых продукта по SIC: сплочённость SIC1, рассчитанная с использованием алгоритма ASI университетом Бремена, и сплочённость SIC2, рассчитанная с помощью алгоритма Bootstrap японским институтом JAXA. Сопоставление полей SIC с оптическими и радиолокационными снимками, а также с ледовыми картами НМИ и ААНИИ позволило выявить области SSIC, для которых по данным AMSR2 были рассчитаны значения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и скорости приводного ветра.

Было установлено, что причиной появления SSIC в продукте университета Бремена являются в основном параметры влагосодержания атмосферы, тогда как в продукте JAXA — сильные ветры. Наибольшее количество случаев ложной идентификации морского льда наблюдалось в районах наиболее частых ПЦ и ВТЦ. Были оценены площади ложно идентифицированного льда для обоих продуктов, которые для зимних месяцев оказались практически одинаковыми. В летний сезон SIC1 имеет гораздо больше ложно диагностированного льда, чем SIC2. С мая по август SSIC2 практически отсутствует, но в другие месяцы имеет большую область распространения и площадь в Баренцевом, Гренландском и Норвежском морях, а также в морях Лаптевых, Чукотском и Беринговом и в некоторых районах Северной Атлантики.

Исследования, представленные в данной статье, выполнены за счёт гранта Российского научного фонда № 19-17-00236.

Литература

1. Васильева П. В., Заболотских Е. В., Шапрон Б. Сравнительный анализ характеристик внетропических циклонов в северной Атлантике и северной части Тихого океана по данным реанализа ERA-Interim и спутникового радиометра AMSR-E // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 236–248.
2. Заболотских Е. В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Изв. Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151.
3. Заболотских Е. В., Шапрон Б. Учет атмосферных эффектов при восстановлении сплоченности морского льда по данным спутниковых микроволновых радиометров // Метеорология и гидрология. 2019. № 2. С. 57–65.
4. Смирнов В. Г., Бушувев А. В., Захваткина Н. Ю., Лоцилов В. С. Спутниковый мониторинг морских льдов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. Т. 85. № 2. С. 62–76.
5. Andersen S., Tonboe R., Kern S., Schyberg H. Improved retrieval of sea ice total concentration from spaceborne passive microwave observations using numerical weather prediction model fields: An intercomparison of nine algorithms // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 104. No. 4. P. 374–392.
6. Cavalieri D. J., Gloersen P., Campbell W. J. Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR // J. Geophysical Research: Atmospheres. 1984. V. 89. P. 5355–5369.
7. Cavalieri D. J., Germain K. M. S., Swift C. T. Reduction of weather effects in the calculation of sea-ice concentration with the DMSP SSM/I // J. Glaciology. 1995. V. 41. No. 139. P. 455–464.
8. Comiso J. C. Sea ice effective microwave emissivities from satellite passive microwave and infrared observations // J. Geophysical Research: Oceans. 1983. V. 88. P. 7686–7704.

9. *Comiso J. C., Meier W. N., Gersten R.* Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. No. 8. P. 6883–6900.
10. *Gloersen P., Cavalieri D. J.* Reduction of weather effects in the calculation of sea ice concentration from microwave radiances // *J. Geophysical Research*. 1986. V. 91. No. C3. P. 3913–3919.
11. *Harold J. M., Bigg G. R., Turner J. M.* Mesocyclone activity over the North-East Atlantic. Part 1: Vortex distribution and variability // *Intern. J. Climatology*. 1999. V. 19. P. 1187–1204.
12. *Ivanova N., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M.* 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.
13. *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 // *Canadian J. Remote Sensing*. 2001. V. 27. No. 5. P. 526–537.
14. *Shokr M., Lambe A., Agnew T.* A New Algorithm (ECICE) to Estimate Ice Concentration From Remote Sensing Observations: An Application to 85-GHz Passive Microwave Data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 12. P. 4104–4121.
15. *Smirnova J. E., Golubkin P. A., Bobilev L. P., Zabolotskikh E. V., Chapron B.* Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. No. 13. P. 5603–5609.
16. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. P. 1–14.
17. *Svendsen E., Kloster K., Farrelly K. B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Campbell W. J., Gloersen P., Cavalieri D. J., Matzler C.* Norwegian Remote Sensing Experiment: Evaluation of the Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer for sea ice research // *J. Geophysical Research*. 1983. V. 88. No. C5. P. 2781–2792.
18. *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 // *Intern. J. Remote Sensing*. 1987. V. 8. P. 1479–1487.
19. *Zabolotskikh E. V., Chapron B.* New Geophysical Model Function for Ocean Emissivity at 89 GHz Over Arctic Waters // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018. V. 16. No. 4. P. 573–577.
20. *Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B.* New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing // *Geophysical Research Letters*. 2013. V. 40. No. 13. P. 3347–3350.

Spurious Arctic sea ice identification by satellite microwave radiometers under extreme weather conditions

M. A. Zhivotovskaia¹, E. V. Zabolotskikh¹, B. Chapron^{2,1}

¹ *Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia*
E-mail: m.zhivotovskaia@rshu.ru

² *French Research Institute for Exploitation of the Sea, Plouzané 29280, France*
E-mail: bertrand.chapron@ifremer.fr

The appearance of spurious sea ice concentration (SSIC) areas in sea ice concentration (SIC) products was studied under extreme weather conditions associated with the development of polar lows (PLs) and extratropical cyclones (ECs). The SIC products are based on measurements of the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2). The database of the PLs and ECs in the Arctic was created for the period 2015–2018 and consists of optical and radar images of the ocean surface and sea ice maps of the Norwegian Meteorological Institute (NMI) and the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI). Two satellite products were analyzed: daily average SIC, calculated with the ARTIST Sea Ice algorithm (ASI) and provided by the University of Bremen, and swath SIC of original time resolution calculated with the Bootstrap algorithm and provided by the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). A comparison of the SIC fields with the NMI and AARI maps, as well as with optical and radar images, allowed us to identify SSIC areas for which the atmospheric water vapor content,

cloud liquid water content, and sea surface wind speed were calculated from the AMSR2 data. The influence of these parameters on the appearance and characteristics of the SSIC areas was studied for both products. It was found that the reason of SSIC appearance in the product of the University of Bremen is mainly the atmospheric water, whereas in the JAXA product — strong winds. The largest number of the SSIC cases was observed in the regions of the most frequent PLs and ECs. The areas of SSIC were estimated for both products, which proved to be almost the same in winter months but different in summer months.

Keywords: sea ice, Arctic, AMSR2, satellite products, extreme weather conditions

Accepted: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-209-220

References

1. Vasilyeva P.V., Zabolotskikh E.V., Chapron B., Sravnitel'nyi analiz kharakteristik vnetropicheskikh tsiklonov v severnoi Atlantike i severnoi chasti Tikhogo okeana po dannym reanaliza ERA-Interim i sputnikovogo radiometra AMSR-E (Comparative analysis of the North Atlantic and North Pacific extratropical cyclone characteristics retrieved from ERA-Interim reanalysis and AMSR-E data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 236–248.
2. Zabolotskikh E.V., Obzor metodov vosstanovleniya parametrov ledyanogo pokrova po dannym sputnikovykh mikrovolnovykh radiometrov (Review of Methods to Retrieve Sea Ice Parameters from Satellite Microwave Radiometer Data), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 128–151.
3. Zabolotskikh E.V., Shapron B., Uchet atmosferykh effektov pri vosstanovlenii splochnosti morskogo l'da po dannym sputnikovykh mikrovolnovykh radiometrov (Consideration of atmospheric effects for sea ice concentration retrieval from satellite microwave observations), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2019, No. 2, pp. 57–65.
4. Smirnov V.G., Bushuev A.V., Zakhvatkina N.Yu., Loshchilov V.S., Sputnikovyi monitoring morskikh l'dov (Satellite Monitoring of the Sea Ice), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2010, Vol. 85, No. 2, pp. 62–76.
5. Andersen S., Tonboe R., Kern S., Schyberg H., Improved retrieval of sea ice total concentration from spaceborne passive microwave observations using numerical weather prediction model fields: An intercomparison of nine algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 104, No. 4, pp. 374–392.
6. Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W.J., Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 1984, Vol. 89, pp. 5355–5369.
7. Cavalieri D.J., Germain K.M.S., Swift C.T., Reduction of weather effects in the calculation of sea-ice concentration with the DMSP SSM/I, *J. Glaciology*, 1995, Vol. 41, No. 139, pp. 455–464.
8. Comiso J.C., Sea ice effective microwave emissivities from satellite passive microwave and infrared observations, *J. Geophysical Research: Ocean*, 1983, Vol. 88, pp. 7686–7704.
9. Comiso J.C., Meier W.N., Gersten R., Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, No. 8, pp. 6883–6900.
10. Gloersen P., Cavalieri D.J., Reduction of weather effects in the calculation of sea ice concentration from microwave radiances, *J. Geophysical Research*, 1986, Vol. 91, No. C3, pp. 3913–3919.
11. Harold J.M., Bigg G.R., Turner J.M., Mesocyclone activity over the North-East Atlantic. Part 1: Vortex distribution and variability, *Intern. J. Climatology*, 1999, Vol. 19, pp. 1187–1204.
12. Ivanova N., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M., Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations, *The Cryosphere*, 2015, Vol. 9, No. 5, pp. 1797–1817.
13. 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, *Canadian J. Remote Sensing*, 2001, Vol. 27, No. 5, pp. 526–537.
14. Shokr M., Lambe A., Agnew T., A New Algorithm (ECICE) to Estimate Ice Concentration From Remote Sensing Observations: An Application to 85-GHz Passive Microwave Data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 12, pp. 4104–4121.
15. Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B., Polar low climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data, *Geophysical Research Letters*, 2015, Vol. 42, No. 13, pp. 5603–5609.

16. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, pp. 1–14.
17. Svendsen E., Kloster K., Farrelly K. B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Campbell W. J., Gloersen P., Cavalieri D. J., Matzler C., Norwegian Remote Sensing Experiment: Evaluation of the Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer for sea ice research, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 88, No. C5, pp. 2781–2792.
18. 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, *Intern. J. Remote Sensing*, 1987, Vol. 8, pp. 1479–1487.
19. Zabolotskikh E. V., Chapron B., New Geophysical Model Function for Ocean Emissivity at 89 GHz Over Arctic Waters, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, Vol. 16, No. 4, pp. 573–577.
20. Zabolotskikh E. V., Mitnik L. M., Chapron B., New approach for severe marine weather study using satellite passive microwave sensing, *Geophysical Research Letters*, 2013, Vol. 40, No. 13, pp. 3347–3350.