

Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии

В.В. Тихонов¹, М.Д. Раев¹, Е.А. Шарков¹,
Д.А. Боярский¹, И.А. Репина^{1,2,3}, Н.Ю. Комарова¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

² *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Москва, 119017, Россия*

³ *ФГБУ «Гидрометцентр России», Москва, 123242, Россия*

В работе представлен обзор пассивных микроволновых спутниковых методов мониторинга морского ледяного покрова полярных регионов. Приведен краткий анализ используемых в настоящее время алгоритмов определения характеристик морского льда по микроволновым спутниковым данным. Обсуждаются основные недостатки этих алгоритмов и методы их устранения. В работе представлен новый алгоритм определения сплоченности морского ледяного покрова Арктики и Антарктики по данным спутниковой микроволновой радиометрии, разработанный сотрудниками трех российских научных организаций: ИКИ РАН, ИФА им. А.М. Обухова РАН и ААНИИ. Методика построения нового алгоритма коренным образом отличается от методики создания существующих. Он разработан на основе физической модели излучения системы «морская поверхность – ледяной покров – снежный покров – атмосфера». В алгоритме не используются значения связующих точек. Все расчетные выражения получены на основе теоретического анализа модели излучения. Схема построения алгоритма позволила уменьшить влияние атмосферных изменений на определение сплоченности морского льда. Алгоритм позволяет не только восстанавливать характеристики сплоченности морского льда, но и показывать области, занятые снежниками. В статье дан краткий анализ работ, посвященных сравнению современных алгоритмов между собой, а также с радиолокационными, инфракрасными и с визуальными данными судовых наблюдений.

Ключевые слова: спутниковая микроволновая радиометрия, излучательная способность, яркостная температура, алгоритм, морской лед, сплоченность ледяного покрова, снежники

Введение

Морской лед является одним из главных сезонных геофизических явлений на поверхности Земли. В арктическом регионе покрытие льдом удваивается в период с сентября по март, в то время как в Антарктике соответствующее сезонное изменение достигает пятикратного размера (Gloersen et al., 1992). Большое пространство и сезонность морского льда являются предметом серьезного научного исследования. Актуальность этой темы значительно возросла в последние несколько десятилетий, когда изменение климата стало глобальной социальной и политической проблемой. Принимая во внимание труднодоступность полярных регионов и сильно разреженную сеть полярных метеорологических станций, большое значение приобрели дистанционные методы исследования морского льда. Приборы (активные и пассивные), работающие в микроволновом диапазоне, расположенные на искусственных спутниках Земли (ИСЗ), позволяют проводить измерения вне зависимости от времени суток и облачности. Наиболее оптимальными методами мониторинга, по временным параметрам (длительность и частота наблюдения) и пространственному обзору (покрытие и перекрытие зон), являются пассивные дистанционные методы (Йоханнессен и др., 2007; Смирнов, 2011; Carsey, 1992; Comiso, 2009; Rees, 2006; Teleti, Luis, 2013).

Одними из наиболее длительных и статистически однородных массивов данных спутниковой микроволновой радиометрии, позволяющих получать пространственно-распределенную ежедневную информацию по состоянию морского льда Арктики и Антарктики являются данные приборов SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) и SSMI/S (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) ИСЗ серии DMSP (Defence Meteorological Satellite Program). Первый спутник этой серии F8 с прибором SSM/I был запущен в июле 1987 г. В дальнейшем были запущены спутники F10, F11, F13, F14 и F15. С октября 2003 г. на спутники устанавливается прибор SSMI/S (F16, F17, F18). Семиканальные четырехчастотные радиометрические комплексы SSM/I принимают линейно-поляризованное излучение на частотах 19,35; 22,24 (вертикальная поляризация), 37,0 и 85,5 ГГц (91,655 ГГц для SSMI/S) в режиме конусного сканирования под углом 53° . Каждый из спутников этой серии находится на полярной солнечно-синхронной орбите и совершает 14,1 витка в сутки. Специфика траекторий ИСЗ этой серии и полей обзора радиометров такова, что наилучшее покрытие и разрешение наблюдается именно в высоких широтах, а на средних широтах и, особенно в экваториальных областях наблюдаются довольно большие лакуны. Полное покрытие Земли на широтах выше 58-го градуса происходит два раза в сутки за исключением незначительных областей у полюсов ($2,4^\circ$). Ширина полосы обзора приборов составляет 1394 км. Размер разрешения на поверхности Земли зависит от диапазона прибора и составляет 16×14 км на частоте 85,5 ГГц до 70×45 км для 19,35 ГГц (Гранков, Мильшин, 2004; Comiso, 2009; Gentemann et al., 2010; Rees, 2006; Sun, Weng, 2008; Weng et al., 2011).

Проблема недостаточного пространственного разрешения радиометров SSM/I и SSMI/S приблизилась к своему решению, когда в 2002 году были выведены на орбиту два новых радиометра: AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS) в мае на спутнике AQUA и AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) в декабре на спутнике ADEOS-II. В октябре 2003 г. ADEOS-II прекратил существование. AMSR-E передавал данные до 4 октября 2011 г. Главной особенностью этих радиометров являлось наличие низкочастотных каналов и повышенная разрешающая способность. Две поляризации в режиме конического сканирования принимались на всех частотных каналах (6,925; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5 и 89,0 ГГц). Ширина полосы обзора приборов составляла 1445 км. На широтах выше 55 параллели полный обзор осуществлялся за сутки. Пространственное разрешение на частоте 6,93 ГГц было 74×43 км, на частоте 18,7 ГГц – 27×16 км, а на частоте 89,0 ГГц – 6×4 км. Более низкие частотные каналы обеспечивали возможность определять температуру поверхности моря и ледяного покрова, что способствовало устранению атмосферных помех при исследовании морского льда с помощью высокочастотных каналов (Гранков, Мильшин, 2004; Шарков, 2004; Comiso, 2009; Gentemann et al., 2010). 18 мая 2012 был выведен на орбиту спутник Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) «Shizuku» (GCOM-W1) с прибором AMSR2 (http://global.jaxa.jp/press/2013/01/20130125_shizuku_e.html). Калибровочные работы были завершены к январю 2013 года, и в настоящее время данные доступны для использования.

AMSR2 подобен AMSR-E, но имеет улучшенную систему калибровки, дополнительный канал в 7,3 ГГц и пространственное разрешение 62×35 км на частоте 6,925 ГГц, 22×14 км на частоте 18,7 ГГц и 5×3 км на частоте 89,0 ГГц. С использованием данных канала 89 ГГц возможно достигать пространственного разрешения почти в четыре раза превышающего разрешение SSM/I при использовании канала 85 ГГц (Gentemann et al., 2010; Imaoka et al., 2010).

Однако необходимо отметить, что при всех преимуществах радиометров AMSR, миссия DMSP остается поставщиком наиболее долговременного однородного и непрерывного массива данных по морскому льду, что крайне важно для оценки климатических изменений в полярных регионах (Иванов и др., 2013).

Современные алгоритмы

Получаемая от спутников информация нуждается в обработке и интерпретации. Для этого используются различные алгоритмы восстановления характеристик морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии. Основными характеристиками, определяемыми с помощью таких алгоритмов, являются: сплоченность льда (отношение площади льдин в зоне, где они распределены сравнительно равномерно, к общей площади этой зоны), ледовитость (процент площади, занятой льдом любой сплоченности по отношению к общей площади региона) и, в некоторых случаях, возраст льда (Йоханнессен и др., 2007; Смирнов, 2011). Все эти характеристики являются важнейшими индикаторами глобальных климатических изменений.

В настоящее время существует большое количество алгоритмов для анализа сплоченности и ледовитости морского льда по данным спутниковых микроволновых радиометров: NASA Team (NT), NASA Team 2 (NT2), Bootstrap, ARTIST Sea Ice (ASI), NORSEX, Bristol, TUD, Svendsen, Near 90GHz, SEA LION (SL), AES/York, CalVal, ECICE, 2-Phasen-Algorithmus, Lomax-MY, Kongoli, и т.д. Есть ряд гибридных алгоритмов, которые используют методики нескольких алгоритмов: OSI SAF, использующий различные комбинации алгоритмов – Bristol + Bootstrap, Bristol + Bootstrap + TUD, Bristol + NT; DMI-Hybrid, который использует алгоритмы NT и Bootstrap, и ряд других гибридных алгоритмов (см., например, Ivanova et al., 2015).

В основе всех этих алгоритмов лежат экспериментальные данные по излучательной способности, яркостной и физической температуре различных морских льдов и открытой воды, полученные в ходе многочисленных экспериментов, как лабораторных (Grenfell, Comiso, 1986; Swift et al., 1992), так и натурных: в проливе Фрама, в Гренландском и Беринговом морях, в море Бофорта, в Чукотском море, в море Уэдделла и т.д. (Onstott et al., 1987; Tucker et al., 1991; Grenfell, 1986; Fliückiger et al., 1994; Grenfell, 1992; Drinkwater et al., 1991; Comiso et al., 1989). Помимо этого используются данные авиационных радиометрических наблюдений и спутниковые данные (Cavalieri et al., 1986).

По методике использования экспериментальных данных, существующие алгоритмы можно условно разделить на два типа. Первый тип использует известные экспериментальные зависимости излучательной способности или яркостной температуры от частоты излучения многолетнего и однолетнего морского льда и открытой воды (*рис. 1*). К этому типу можно отнести следующие алгоритмы: NT, NORSEX, ASI, Svendsen, CalVal, SL, и др. Другой тип алгоритмов, наравне с экспериментальными данными по излучательной способности морских льдов и открытой воды, применяет так называемую кластерную систему или систему областей. Она заключается в том, что строятся экспериментальные зависимости одной комбинации яркостных температур различных поверхностей от другой. На графике получаются области (кластеры) для различных льдов и открытой воды, на основании которых далее разрабатывается алгоритм. К этому типу алгоритмов относятся: NT2, Bootstrap, TUD, Bristol и т.п.

Анализ определения сплоченности ледяного покрова по разным алгоритмам, сравнение результатов между собой, с данными оптического диапазона и радиолокационными снимками, а также с данными визуальных корабельных наблюдений, показывают, что погрешность современных алгоритмов достигает 10% (Andersen et al., 2007; Meier et al., 2001; Meier, 2005; Spreen et al., 2008). В период летнего таяния и осеннего замерзания эта погрешность сильно увеличивается, достигая иногда 50% (Agnew, Howell, 2003; Andersen et al., 2007; Ivanova et al., 2014; Knuth, Ackley, 2006; Meier et al., 2001; Spreen et al., 2008).

Большинство публикаций указывают следующие источники ошибок в определении сплоченности ледяного покрова современными алгоритмами по данным спутниковой микроволновой радиометрии:

- неспособность большинства алгоритмов разделить излучение более чем двух типов льда (см., например, Teleti, Luis, 2013);
- сезонная изменчивость излучательной способности морского льда и снежного покрова (Agnew, Howell, 2003; Ivanova et al., 2015; Knuth, Ackley, 2006; Spreen et al., 2008);
- внесезонные региональные вариации излучательной способности снежно-ледяной поверхности (Agnew, Howell, 2003; Ivanova et al., 2015; Knuth, Ackley, 2006; Spreen et al., 2008);
- ошибки, связанные с поверхностными эффектами (шероховатость поверхности, снежный покров, снежицы) (Andersen et al., 2007; Hewison et al., 2002; Knuth, Ackley, 2006);
- погодные эффекты (осадки: дождь, снег, а также метель и т.п.) (Andersen et al., 2006; Andersen et al., 2007; Cho, Nishiura, 2010).

Разделение льда на типы (многолетний, однолетний и т.д.) по данным спутниковой микроволновой радиометрии является важной, но практически неразрешимой задачей. Решение данной проблемы основано на разных частотных зависимостях излучательной способности или яркостной температуры различных льдов (*рис. 1*). Однако эти зависимости были получены при наземных экспериментах (Spreen et al., 2008), для ровной и чистой поверхности льда. При наземных экспериментах размер пятна радиометра на поверхности льда составлял нескольких метров (см., например, Comiso et al., 1989).

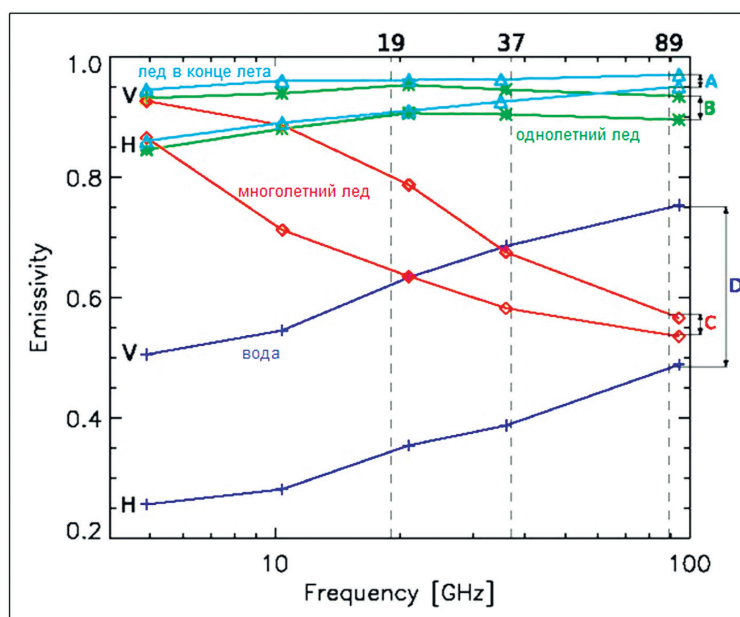


Рис. 1. Частотные зависимости излучательной способности различных льдов и открытой воды (Spreen et al., 2008). Поляризация: V – вертикальная, H – горизонтальная

Для спутниковых микроволновых радиометров размер пикселя составляет величину порядка 10 км. Излучение с такого большого участка будет определяться не только типом льда, но и шероховатостью и заснеженностью поверхности. Теоретические расчеты показывают, что глубина формирования излучения для сухого снежного покрова, для частот больше 19 ГГц, составляет величину менее 40 см (Tikhonov et al., 2013, 2014). Таким образом, слой снежного покрова на ледяной поверхности значительно изменит разницу в яркостной температуре многолетнего и однолетнего льда. Существенное влияние на величину яркостной температуры, получаемой по спутниковым данным, оказывает шероховатость поверхности. Эти заключения подтверждаются многими экспериментальными и теоретическими работами (Agnew, Howell, 2003; Cavalieri, Comiso, 2000; Comiso et al., 1989; Hewison et al., 2002; Matzler, 2000; Powell et al., 2006). Непонятно, как определяется тип льда, если в пиксел попадают одновременно области многолетнего и однолетнего льда. Необходимо отметить, что многие алгоритмы, используемые в настоящее время, конечным результатом дают сплоченность ледяного покрова, не разделяя лед по типам или возрасту (NT2, Bootstrap, ASI). Однако в некоторых случаях, алгоритмы, разделяющие морской лед на типы (NT, NORSEXS, ECICE), показывают хорошие результаты (Han, Lee, 2006; Shokr et al., 2008; Svendsen et al., 1983; Voss et al., 2003). Вероятнее всего, эти случаи соответствуют гладкой ледяной поверхности, без снежного покрова.

Использование в алгоритмах связующих точек (tie-points) – характерных значений излучательной способности, яркостной или физической температуры льдов и открытой водной поверхности, приводит к существенным ошибкам в определении сплоченности ледяного покрова (Agnew, Howell, 2003; Andersen, 1998). Излучательная способность льда, даже одного типа, не может оставаться постоянной величиной. Она зависит от температуры поверхности и климатических условий формирования льда. На излучение ле-

дяной поверхности влияет снежный покров, толщина, структура и влажность которого меняется в зависимости от сезона и региона формирования. Излучательная способность морского льда зависит от шероховатости поверхности, которая тоже имеет региональные и сезонные особенности.

Устранение ошибок в определении сплоченности льда сводится к решению двух проблем: более качественному учету атмосферных особенностей и повышению точности в определении связующих точек (Andersen et al., 2006; Cavalieri, Comiso, 2000; Cho, Nishiura, 2010; Comiso, 1995; Ivanova et al., 2014; Kaleschke et al., 2001; Kern, 2004; Lovas et al., 1994; Meier et al., 2001; Pedersen, 1994; Spreen et al., 2008). В качестве первого примера можно привести алгоритмы SL, CalVal, NT, NT2, ASI, в которых используются различные модели атмосферы и методы устранения атмосферных изменений. В качестве второго примера – все алгоритмы, так как определение связующих точек является основным этапом при расчете сплоченности ледяного покрова по микроволновым спутниковым данным. Для решения второй проблемы было предложено использовать в алгоритмах динамические связующие точки (dynamical tie-points), т.е. определять связующие точки отдельно для разных регионов и сезонов (Agnew, Howell, 2003; Andersen, 1998; Ivanova et al., 2015). Использование динамических связующих точек повышает точность алгоритмов. Однако такой подход усложняет использование алгоритмов, т.к. значения связующих точек будут изменяться в зависимости от региона и климатического сезона. Отсюда возникает задача постоянного регионального и сезонного контроля значений связующих точек. Решение этой задачи не может быть постоянным, т.к. происходит постепенное изменение климата. Изменяются климатические условия формирования льда и снежного покрова (Бобылев и др. 2008; Репина, Иванов, 2012; Иванов и др., 2013; Китаев, Титкова, 2013), что влечет за собой изменение характеристик излучения поверхности (Китаев, Титкова, 2011). Примером могут служить алгоритмы ASI и Bootstrap, у которых постоянные значения связующих точек изменились с течением времени (Comiso, 1995; Kaleschke et al., 2001).

В работах (Johannessen, Ivanova, 2010; Ivanova et al., 2014, 2015) выполнен подробный анализ и сравнение практически всех существующих алгоритмов. Сравнение сплоченности морского льда, полученной по этим алгоритмам, с ледовыми картами и данными других диапазонов показало, что наиболее эффективными оказываются гибридные алгоритмы, которые используют методику двух алгоритмов: NT+CalVal, OSI SAF, CalVal+Bristol (Ivanova et al., 2015). Этот вывод был сделан и в более ранних работах, другими авторами (см., например, Andersen, 2000; Meier et al., 2001). В работе (Ivanova et al., 2015) показано, что наиболее эффективным оказывается совместное использование алгоритмов CalVal и Bristol при работе с динамически связующими точками. Алгоритм CalVal показывает хорошие результаты при низкой сплоченности морского льда и по открытой водной поверхности, а алгоритм Bristol эффективен для сплоченного ледяного покрова. С другой стороны, эти авторы в более ранней своей работе утверждают, что наилучшие результаты показывает алгоритм ASI (Johannessen, Ivanova, 2010).

Алгоритмы VASIA и VASIA2

Алгоритмы VASIA и VASIA2 (Variation Arctic/Antarctic Sea Ice Algorithm) разработаны сотрудниками трех Российских научных институтов: Института космических исследований РАН, Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Первоначально был разработан алгоритм VASIA, тестирование которого показало, что алгоритм занижает сплоченность ледяного покрова в теплое время года (Тихонов и др., 2013, 2014). В дальнейшем выявленный недостаток алгоритма был устранен и модернизированный алгоритм получил название VASIA2 (Тихонов и др., 2015; Tikhonov et al., 2015).

Алгоритм принципиально отличается от всех современных алгоритмов. В основе этого алгоритма лежат не экспериментальные данные, а теоретическая модель излучения системы «морская поверхность – ледяной покров – снежный покров – атмосфера» (Репина и др., 2012; Tikhonov et al., 2014).

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 – t_{85-19}^v , тангенс для частот 85,5 ГГц и 37 ГГц горизонтальной поляризации – t_{85-37}^h и тангенс для частот 37 ГГц и 19,35 ГГц вертикальной поляризации – t_{37-19}^v :

$$t_{85-19}^v = \frac{T_{85}^v - T_{19}^v}{85,5 - 19,35}, \quad t_{85-37}^h = \frac{T_{85}^h - T_{37}^h}{85,5 - 37}, \quad t_{37-19}^v = \frac{T_{37}^v - T_{19}^v}{37 - 19,35},$$

где T^x – яркостная температура поляризации x и частоты y .

Тангенсы t_{85-19}^v и t_{85-37}^h определяются в основном сплоченностью ледяного покрова и слабо зависят от изменений различных характеристик поверхности (рис. 2). На рисунке показаны области значений тангенсов, вычисленные для различных физических и структурных характеристик поверхности: сплоченности и типа льда, температуре, толщине снежного покрова, влажности льда и снега, шероховатости поверхности, наличии снежниц на ледяном покрове. Диапазон этих характеристик выбирался в соответствии с климатическими и гляциологическими данными полярных регионов (Грей, Мэйл, 1986; Тышко и др., 2000; Котляков, 2000; Przybylak, 2003; Serreze, Barry, 2005; Cuffey, Paterson, 2010; Turner et al., 2009). Незаштрихованная область между двумя прямыми соответствует ледяному покрову, свободному от снега или покрытому сухим и влажным снегом. Область внутри заштрихованного треугольника соответствует ледяному покрову со снежницами различной стадии образования (Тихонов и др., 2015; Tikhonov et al., 2015).

Каждая из этих четырех областей была усреднена линейной функцией, зависящей только от сплоченности ледяного покрова. Были получены четыре линейных зависимости – две для ледяного покрова без снежниц (пунктирные линии на рис. 2):

$$f_{85-37}^h(I) = -0,085 \times I + 0,908, \quad (1)$$

$$f_{85-19}^v(I) = -0,086 \times I + 0,55, \quad (2)$$

и две для ледяного покрова со снежницами (штрихпунктирные линии на *рис. 2*):

$$\phi_{85-37}^h(I) = -0,039 \times I + 1,19, \quad (3)$$

$$\phi_{85-19}^v(I) = -0,04 \times I + 0,7, \quad (4)$$

где I – сплоченность ледяного покрова, выраженная в баллах.

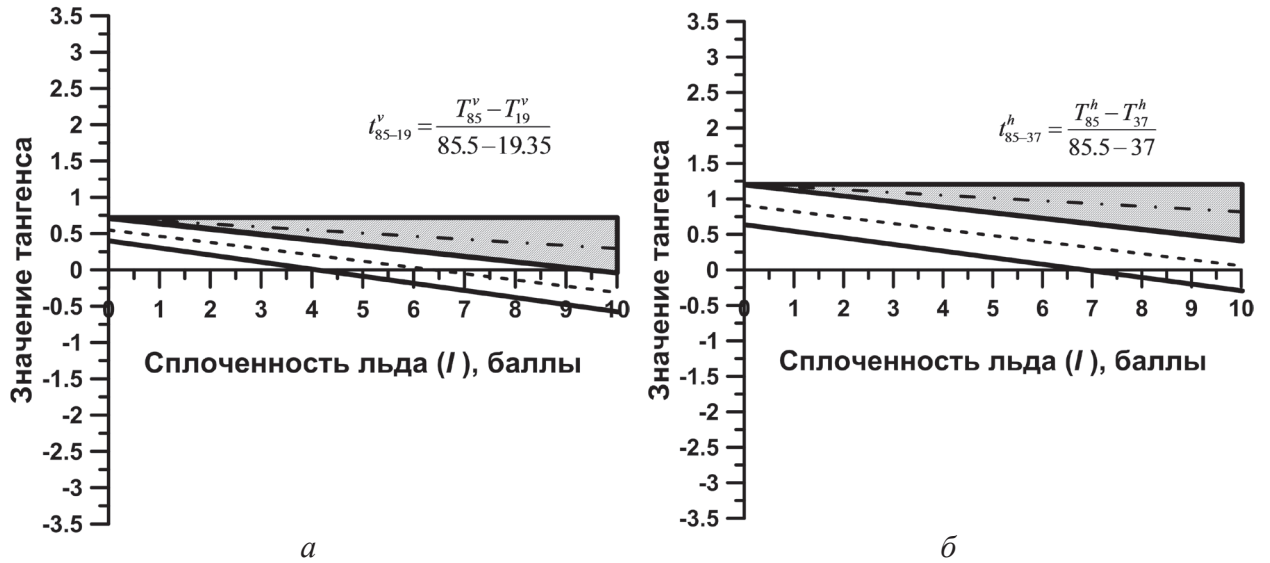


Рис. 2. Зависимости значений тангенсов t_{85-19}^v (а) и t_{85-37}^h (б) от сплоченности ледяного покрова. Незаштрихованная область между двумя прямыми – для ледяного покрова, область заштрихованного треугольника – для ледяного покрова со снежницами. Пунктирная и штрихпунктирная линии – средние соответствующих областей



Рис. 3. Зависимость значений тангенса t_{37-19}^v от сплоченности ледяного покрова

Критерием наличия или отсутствия снежниц на ледяном покрове является тангенс 37 ГГц и 19,35 ГГц вертикальной поляризации t_{37-19}^v . Зависимость значений этого тангенса от сплоченности ледяного покрова показана на *рис. 3*. Выбор этого параметра объясняется

сильной зависимостью данного тангенса от влажности поверхностного слоя – заштрихованный треугольник на *рис. 3* значительно больше заштрихованных треугольников на *рис. 2*. Нижняя граница области 1 (*рис. 3*) выбрана в качестве критерия наличия или отсутствия снежиц на ледяной поверхности. Если значение тангенса t_{37-19}^v , при определенной сплоченности лежит ниже этой границы, то на льду присутствуют снежицы (Тихонов и др., 2015; Tikhonov et al., 2015). Нижняя граница области 1 (*рис. 3*) аппроксимируется линейной функцией, зависящей только от I :

$$\delta_{37-19}^v(I) = -0,187 \times I + 1,1. \quad (5)$$

Схема алгоритма выглядит следующим образом.

По микроволновым спутниковым данным определяются три параметра (спутниковых тангенсов) t_{85-19}^v , t_{85-37}^h , t_{37-19}^v :

$$t_{85-19}^v = \frac{T_{85}^v - T_{19}^v}{85,5 - 19,35}, t_{85-37}^h = \frac{T_{85}^h - T_{37}^h}{85,5 - 37}, t_{37-19}^v = \frac{T_{37}^v - T_{19}^v}{37 - 19,35}.$$

Создается целевая функция F_I . Она является суммой квадратов коэффициентов вариации теоретических значений тангенсов (1) и (2) со значениями спутниковых тангенсов t_{85-19}^v и t_{85-37}^h :

$$F_I = \frac{1}{2} \left[\frac{(f_{85-37}^h(I) - t_{85-37}^h)^2}{(t_{85-37}^h)^2} + \frac{(f_{85-19}^v(I) - t_{85-19}^v)^2}{(t_{85-19}^v)^2} \right].$$

В интервале сплоченностей ледяного покрова от 0 до 10 баллов с шагом 0,1 вычисляется целевая функция F_I .

Минимум целевой функции F_I определяет сплоченность ледяного покрова I_I (сплоченность морского льда без коррекции ошибок, связанных с возможным наличием снежиц на ледяном покрове). Это сплоченность ледяного покрова, которую показывал алгоритм VASIA. Шаги 1–4 полностью повторяют алгоритм VASIA.

При найденной сплоченности I_I в каждом пикселе проводится сравнение значения, полученного из (5) и значения спутникового тангенса t_{37-19}^v :

$$\delta_{37-19}^v(I_I) \text{ ? } t_{37-19}^v.$$

Если: $\delta_{37-19}^v(I_I) < t_{37-19}^v,$

то сплоченность остается той, которая определена на шаге 4: $I_2 = I_I$.

Если: $\delta_{37-19}^v(I_I) \geq t_{37-19}^v,$

то создается целевая функция F_2 . Она является суммой квадратов коэффициентов вариации теоретических значений тангенсов (3) и (4) со значениями спутниковых тангенсов t_{85-19}^v и t_{85-37}^h :

$$F_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{(\varphi_{85-37}^h(I) - t_{85-37}^h)^2}{(t_{85-37}^h)^2} + \frac{(\varphi_{85-19}^v(I) - t_{85-19}^v)^2}{(t_{85-19}^v)^2} \right].$$

В интервале сплоченностей ледяного покрова от 0 до 10 баллов определяется минимум целевой функции F_2 .

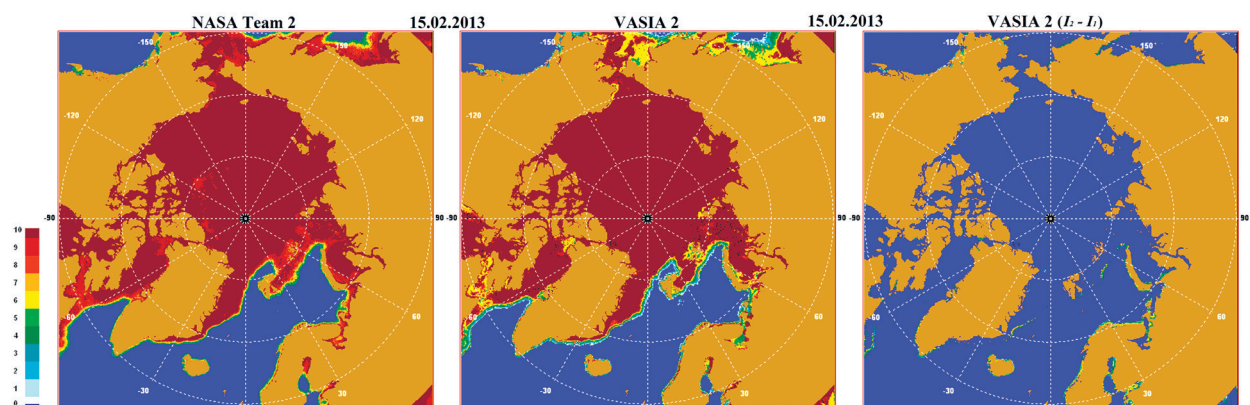
Минимум целевой функции определяет конечную сплоченность ледяного покрова I_2 .

Сплоченность ледяного покрова I_2 , соответствует реальной сплоченности льда в данном пикселе. Разница сплоченностей, полученная на шаге 9 и 4 ($I_2 - I_1$) показывает удельную площадь поверхности, занятую снежниками на ледяном покрове.

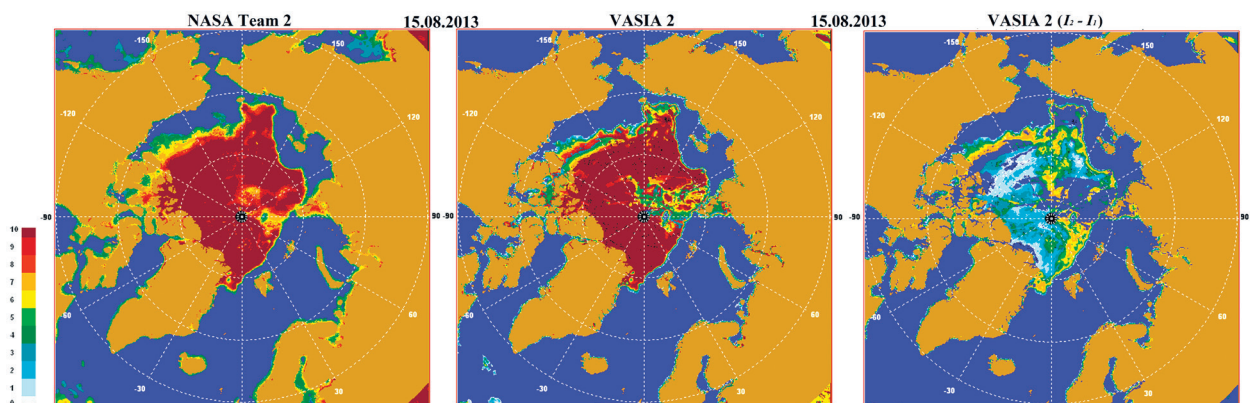
Линейные функции (1)–(5) являются аппроксимациями теоретических тангенсов, вычисленных для частот прибора SSM/I (19,35; 37 и 85,5 ГГц). Однако, как показали расчеты, эти аппроксимации действительны для радиометров SSMIS (19,35; 37 и 91,655 ГГц) и AMSR2 (18,7; 36,5 и 89 ГГц) (Tikhonov et al., 2015).

Использование тангенсов позволяет минимизировать влияние излучения атмосферы и связанных с ней погодных явлений, т.к. рассматривается только наклон прямой, проведенной через два значения яркостной температуры, а не сами значения (Tikhonov et al., 2014; Tikhonov et al., 2015).

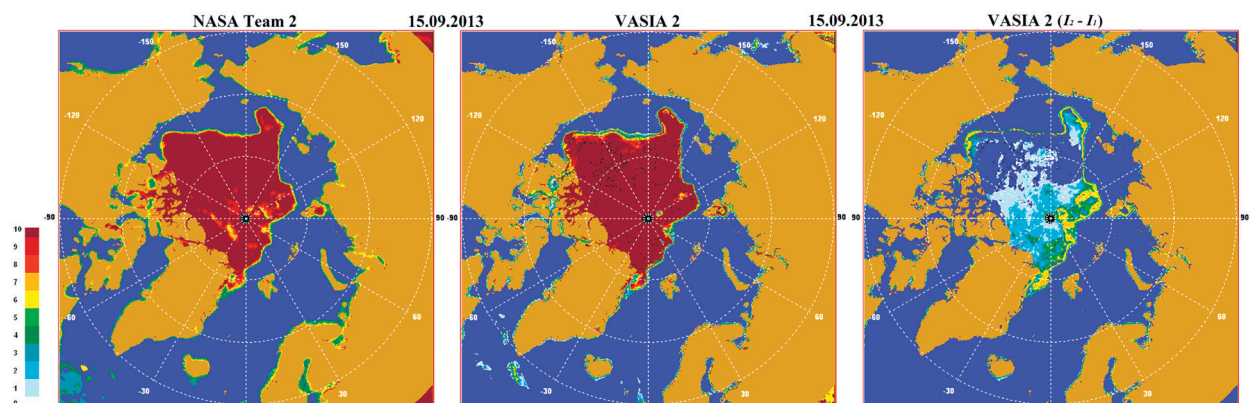
Алгоритм VASIA2 разработан совсем недавно и пока не проходил такую серьезную проверку, как другие алгоритмы (Andersen, 2000; Andersen et al., 2007; Ivanova et al., 2014, 2015; Meier et al., 2001). Однако сравнение результатов определения сплоченности морского льда полярных регионов по алгоритму VASIA2 с данными судовых визуальных наблюдений и алгоритмами NT и NT2, показало хорошие результаты. На *рис. 4* представлены карты сплоченности ледяного покрова Арктики, полученные по алгоритмам NT2 и VASIA2, а также площадь поверхности льда в баллах, занятую снежниками ($I_2 - I_1$), для середины февраля (а), августа (б), сентября (в) и ноября (г) 2013 года. Анализ *рис. 4* показывает, что общая картина ледяных полей, полученных по алгоритмам NT2 и VASIA2 практически идентична. Различия наблюдаются в прикромочных зонах, где алгоритм VASIA2 показывает плавный переход от сплошного льда к открытой воде через разные сплоченности льда. У алгоритма NT2 этот переход более резкий – практически сразу после сплоченности ледяного покрова в 8–10 баллов, следует открытая вода. Области ледяного покрова, занятые снежниками, в зимние месяцы отсутствуют (*рис. 4 а, г*). Исключение составляют только небольшие узкие участки морского льда вдоль восточного побережья Гренландии и южнее Земли Франца-Иосифа, между архипелагами Новая земля и Шпицберген (*рис. 4 а*), а также севернее архипелага Шпицберген и в районе восточного побережья Новой земли (*рис. 4 г*). Это области, где происходит постоянный контакт кромки ледяного покрова с морской водой. В этих областях кромка морского льда «пропитывается» морской водой, что и показывает алгоритм VASIA2. В летние месяцы области снежниц присутствуют практически по всей поверхности ледяного покрова. Наибольшая плотность снежниц наблюдается в периферийных от полюса областях, где климатические условия более теплые. В этих местах они покрывают до 60% поверхности ледяного покрова (*рис. 4 б, в*).



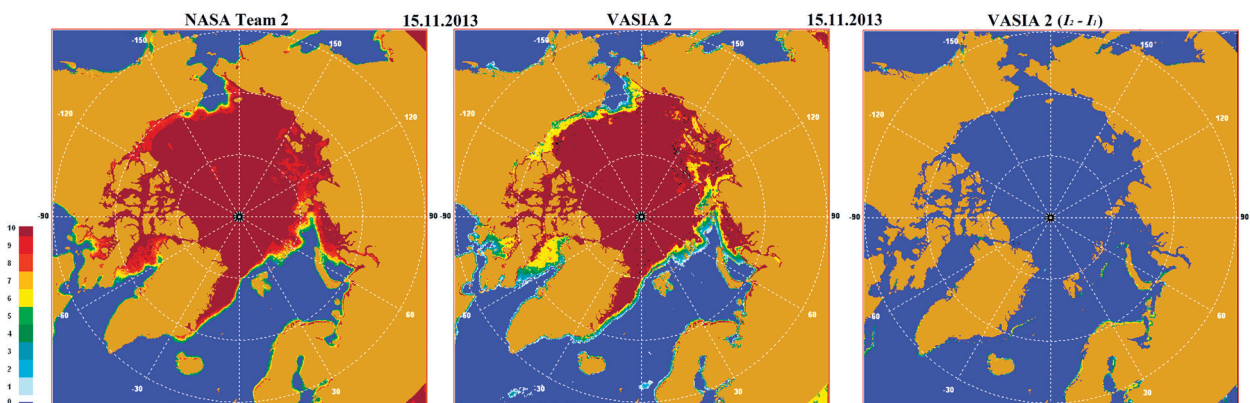
a



б



б



г

Рис. 4. Сплошенность ледяного покрова Арктики в 2013 г., рассчитанная по алгоритмам: NASA Team2, VASIA2, а также удельная площадь снежиц ($I_2 - I_1$).

Алгоритм VASIA2 показывает хорошие результаты в определении сплоченности ледяного покрова и для Южного океана. На *рис. 5* представлены карты сплоченности ледяного покрова Антарктического региона, полученные по алгоритмам NT2 и VASIA2, а также площадь поверхности морского льда в баллах, занятую снежницами ($I_{0032}-I_1$), для середины января (а), июня (б) и декабря (в) 2013 года. Результаты определения сплоченности морского льда, выполненные по алгоритмам NT2 и VASIA2, практически совпадают. Исключения составляют участки вдоль комки ледяного покрова. Здесь алгоритм VASIA2, также как и для Арктики, показывает плавный переход от сплошного льда к открытой водной поверхности. В летние месяцы снежницы присутствуют по всей кромке морского льда (*рис. 5 а, в*).

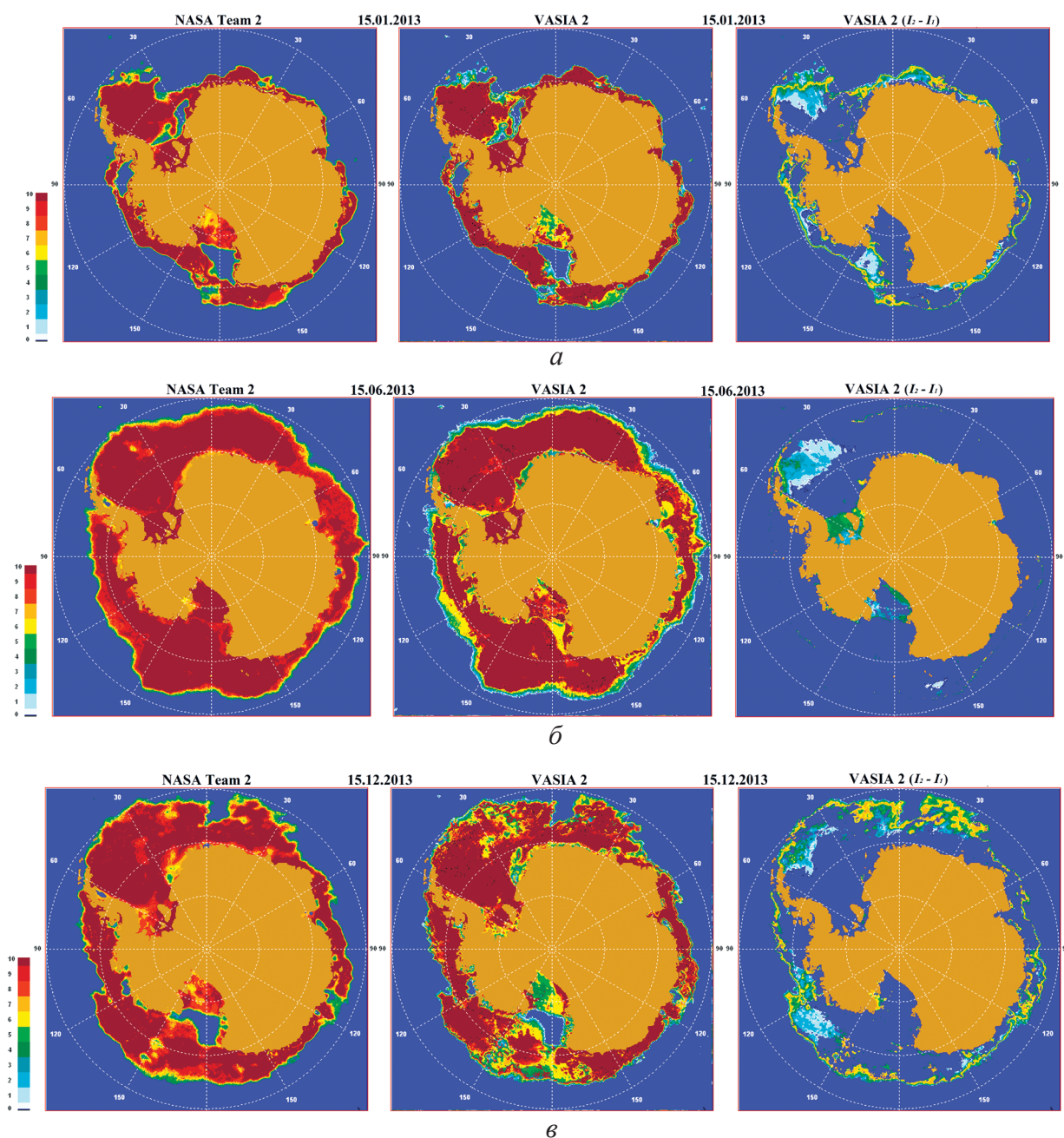


Рис. 5. Сплоченность ледяного покрова Южного океана в 2013 г., рассчитанная по алгоритмам: NASA Team2 и VASIA2, а также удельная площадь снежниц (I_2-I_1).

В Антарктике снежницы, в основном, бывают только начальной стадии образования (пропитанный водой снег). Области талой воды на поверхности льда (как в Арктике), как правило, не встречаются. Связано это с большой толщиной снежного покрова и более прохладными и сухими климатом в летний период (Thomas, Dieckmann, 2003). Летом, за счет притока тепла от океана, морской лед утончается. За счет своей массы снежный покров может опустить морской лед ниже уровня моря. Это приведет к подтапливанию нижних слоев снега и образованию снежниц – снега, пропитанного морской водой (Eicken et al., 2004; Lewis et al., 2011). Эти области и показывает алгоритм VASIA2 на *рис. 5 (а), (в)*. Зимой снежницы наблюдаются только в районе Антарктического полуострова, где более мягкий и теплый климат (*рис. 5 б*).

Сравнение общей сплоченности льда, полученной по алгоритму VASIA2, с данными судовых визуальных наблюдений (Tikhonov et al., 2015) выполнено отдельно для летнего и зимнего сезонов 2004 года. На *рис. 6* представлены графики разброса значений сплоченности льда по данным судовых наблюдений и алгоритмам NT и VASIA2 для летнего (*рис. 6 а, б*)

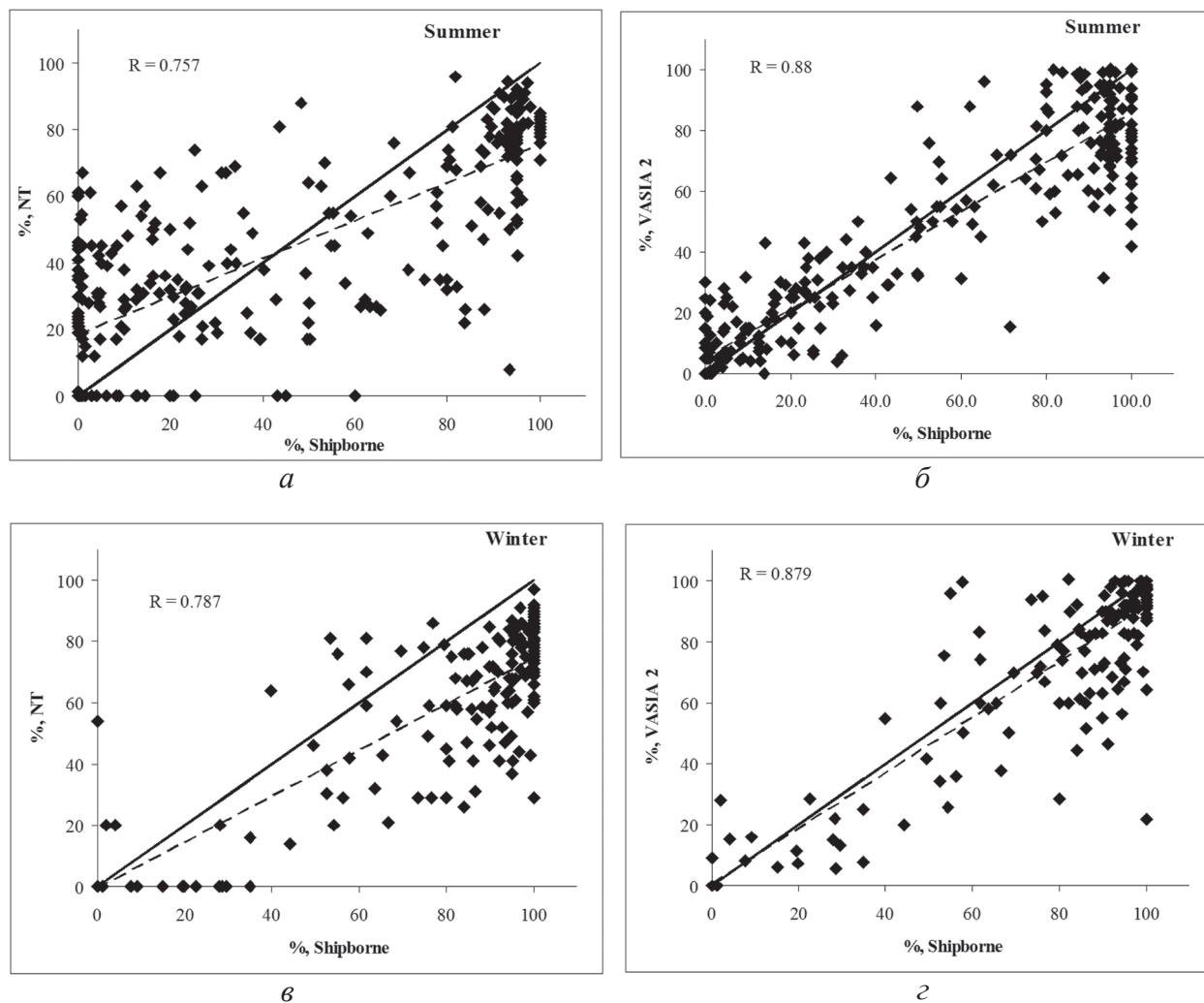


Рис. 6. Графики рассеяния значений сплоченности льда из визуальных наблюдений и
а) общей сплоченности по алгоритму NT в летний период; б) общей сплоченности по алгоритму
VASIA2 в летний период; в) общей сплоченности по алгоритму NT в зимний период;
г) общей сплоченности по алгоритму VASIA2 в зимний период

и зимнего (рис. 6 в, г) периодов. Сравнение показало высокие коэффициенты корреляции, как в летний, так и в зимний периоды, а также высокую положительную корреляцию. В летний период в районе редких льдов оба алгоритма завышают общую сплоченность ледяного покрова, тогда как в сплоченных, очень сплоченных и сплошных льдах алгоритмы занижают общую сплоченность ледяного покрова. В случае NT расхождение для льдов малой сплоченности больше, чем при расчетах с использованием алгоритма VASIA2. И для летнего, и для зимнего периода алгоритм VASIA2 дает лучшую корреляцию.

Заключение

Важнейшим географическим фактором климата полярных регионов является морской ледяной покров, который также является составной частью глобальной климатической системы Земли. Эта система непрерывно меняется. Вместе с ней изменяется и состояние морского ледяного покрова – площадь его распространения, толщина, сплоченность, сезонность и другие характеристики. Задачи исследования вариаций климата полярных регионов требуют интенсивного привлечения данных спутникового дистанционного зондирования, в частности, регулярных, длительных, глобальных микроволновых радиометрических наблюдений системы океан – атмосфера. Существующие алгоритмы интерпретации данных спутниковой микроволновой радиометрии позволяют осуществлять ежедневный контроль состояния морского ледяного покрова Арктики и Антарктики. Однако все эти алгоритмы имеют как свои преимущества, так и недостатки, связанные с климатическими сезонами и конкретной ледовой обстановкой. В периоды летнего таяния и осеннего замерзания величина ошибок алгоритмов может увеличиваться в два и более раза. Для уменьшения такой погрешности необходимо привлечение других методов мониторинга и данных других диапазонов, что значительно снижает оперативность алгоритмов.

Разработанный российскими учеными, в том числе и сотрудниками ИКИ РАН, алгоритм VASIA2 принципиально отличается от всех современных алгоритмов. Алгоритм разработан на основе теоретических моделей и вычислений. Алгоритм не использует значения связующих точек, поиск которых является основной задачей всех применяемых алгоритмов. Методика построения алгоритма позволила практически избавиться от влияния атмосферных изменений на расчеты сплоченности морского льда. Алгоритм позволяет определять не только сплоченность морского льда, но и площади областей ледяного покрова, занятые снежницами, которые во многом определяют термодинамику ледяного покрова, а также характер взаимодействия океана и атмосферы. Эта особенность алгоритма позволит в дальнейшем провести более качественный анализ климатических изменений в полярных регионах. Необходимо также отметить, что новый алгоритм является первым и единственным алгоритмом определения ледовой обстановки в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии, созданным российскими учеными.

Работа выполнена при поддержке Российской академии наук (тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. Бобылев Л.П., Шалина Е.В., Йоханнессен О.М., Заболотских Е.В., Сандвен С., Бабина О.И. Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. Т. 78. № 1. С. 38–47.
2. Гранков А.Г., Мильшин А.А. Взаимосвязь радиоизлучения системы океан-атмосфера с тепловыми и динамическими процессами на грани раздела. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 168 с.
3. Грей Д.М., Мэйл Д.Х. под ред. Снег. Справочник. 1986. Л.: Гидрометеиздат. 752 с.
4. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Колдунов Н., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.
5. Йоханнессен О.М., Александров В.Ю., Фролов И.Е., Сандвен С., Петтерссон Л.Х., Бобылев Л.П., Клостер К., Смирнов В.Г., Миронов Е.У., Бабич Н.Г. Научные исследования в Арктике. Том 3. Дистанционное зондирование морских льдов на северном морском пути: изучение и применение. С.-П.: Наука. 2007. 512 с.
6. Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Изменчивость альбеда снежного покрова Восточно-Европейской равнины – анализ спутниковых данных. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 47–56.
7. Китаев Л.М., Титкова Т.Б. Связь изменчивости площади морского льда Арктики и метеорологических характеристик зимнего периода на севере Евразии. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 179–192.
8. Котляков В.М. Избранные сочинения. Книга 1. Гляциология Антарктиды. М.: Наука. 2000. 432 с.
9. Репина И.А., Иванов В.В. Применение методов дистанционного зондирования в исследовании динамики ледового покрова и современной климатической изменчивости Арктики. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 89–103.
10. 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.
11. Смирнов В.Г. под редакцией. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. С.-П.: ААНИИ. 2011. 240 с.
12. 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.
13. Тихонов В.В., И.А. Репина, М.Д. Раев, Е.А. Шарков, Д.А. Боярский, Н.Ю. Комарова. Новый алгоритм восстановления сплоченности морского ледяного покрова по данным пассивного микроволнового зондирования. // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 35–43.
14. Тихонов В.В., И.А. Репина, М.Д. Раев, Е.А. Шарков, Д.А. Боярский, Н.Ю. Комарова. Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2). // Исследование Земли из космоса. 2015. № 2. С. 78–93.
15. Тышко К.П., Черепанов Н.В., Федотов В.И. Кристаллическое строение морского ледяного покрова. С.-П.: Гидрометеиздат. 2000. 66 с.
16. Шарков Е.А. Пассивное микроволновое зондирование Земли: прошлое, настоящее и планы на будущее // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. В. 1. Т. 1. С. 70–80.
17. Agnew T., Howell S. The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data. // Atmosphere-Ocean. 2003. Vol. 41. No. 4. P. 317–331.
18. Andersen S. Monthly Arctic Sea Ice Signatures for use in Passive Microwave Algorithms. Danish Meteorological Institute. Technical report 98–18. December 1998. 29 p. URL: <http://saf.met.no/docs/tiepoints.pdf>
19. Andersen S. Evaluation of SSM/I Sea Ice Algorithms for use in the SAF on Ocean and Sea Ice. Danish Meteorological Institute. Scientific report 00-10. July 2000. 49 p.
20. 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. of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. № C08004. DOI: 10.1029/2006JC003543.
21. 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. P. 374–392. DOI: 10.1016/j.rse.2006.05.013.
22. Carsey F.D. editor. Microwave remote sensing of sea ice. Washington: American Geophysical Union. 1992. 462 p.
23. Cavalieri D.J., Comiso J.C. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the AMSR-E Sea Ice Algorithm. Revised December 1 2000. 2000. Landover, Maryland USA: Goddard Space Flight Center. 79 p. URL: http://insdc.org/data/amsre/pdfs/amsr_atbd_seaice.pdf
24. Cavalieri D.J., P. Gloersen, and T.T. Wilheit. Aircraft and satellite passive microwave observations of the Bering Sea ice cover during MIZEX West. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1986. Vol. GE-24. No. 3. P. 368–377.
25. Cho K., Nishiura K. A study on cloud effect reduction for extracting sea ice area from passive microwave sensor data. // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2010. Vol. XXXVIII. No. 8. P. 1042–1045.
26. Comiso J.C. SSM/I Concentrations Using the Bootstrap Algorithm. NASA Reference Publication 1380. 1995. 50 pages.
27. Comiso J.C. Polar Oceans from Space (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library). New York: Springer. 2009. 507 p.

28. Comiso J.C., T.C. Grenfell, D.L. Bell, M.A. Lange, and S.F. Ackley. Passive microwave in situ observations of winter Weddell sea ice. // Journal of Geophysical Research. 1989. Vol. 94. No. C8. pp. 10891–10905.
29. Cuffey K.M., W.S.B. Paterson. The Physics of Glaciers. Elsevier. 2010. 704 p.
30. Drinkwater M.R., J.P. Crawford, and D.J. Cavalieri. Multi-frequency, multi-polarization SAR and radiometer sea ice classification. Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'91). New York, USA. 3–6 Jun 1991. Vol. I. P. 107–111.
31. Eicken H., Grenfell N. C., Perovich D. K., Richter-Menge J. A., Frey K. Hydraulic controls of summer Arctic pack ice albedo. // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109. No. C08007. DOI:10.1029/2003JC001989.
32. Fliückiger K., Gminder H., Matzler Ch. Microwave signatures of sea ice from ARKTIS 93 experiment. // EARSeL Advances in Remote Sensing. 1994. Vol. 3. No. 2-XII. P. 71–80.
33. Gentemann C.L., Wentz F.J., Brewer M., Hilburn K., Smith D. Passive Microwave Remote Sensing of the Ocean: An Overview // Oceanography from Space. Revisited. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010. Ch. 2, P. 13–33.
34. Gloersen P., Campbell W.J., Cavalieri D.J., Comiso J.C., Parkinson C.L., Zwally H.J. Arctic and antarctic sea ice, 1978–1987: Satellite passive-microwave observations and analysis. 1992. Washington D.C.: NASA. 290 p.
35. Grenfell T.C. Surface-based passive microwave observations of sea ice in the Bering and Greenland Seas. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1986. Vol. GE-24. No. 3. P. 378–382.
36. Grenfell T.C. Surface-based passive microwave studies of multiyear sea ice. // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1992. Vol. 97. No. C3. P. 3485–3501.
37. Grenfell T.C., and J.C. Comiso. Multifrequency passive microwave observations of first-year sea ice grown in a tank. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1986. Vol. GE-24. No. 6. P. 826–831.
38. Han H., Lee H. Comparison of SSM/I Sea Ice Concentration with Kompsat-1 EOC Images of the Arctic and Antarctic. // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2006. July 31-Aug. 4 2006. Denver, CO. P.714 –717.
39. Hewison T. J., Selbach N., Heygster G., Taylor J. P., McGrath A. J. Airborne Measurements of Arctic Sea Ice, Glacier and Snow Emissivity at 24–183 GHz. // Proceeding IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. Vol. 5. P. 2851–2855.
40. Imaoka K., Kachi M., Kasahara M., Ito N., Nakagawa K., Oki T. Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2 // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. 2010. Vol. XXXVIII. Part 8. P. 1–16.
41. Ivanova N.O., M. Johannessen, L.T. Pedersen, and R.T. Tonboe. Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2014. Vol. 52. No. 11. P. 7233–7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
42. Ivanova N.O., L.T. Pedersen, R.T. Tonboe, S. Kern, G. Heygster, T. Laverne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dybkjaer, L. Brucker, and M. Shokr. Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: an optimal algorithm and challenges. // The Cryosphere Discussions. 2015. Vol. 9. P. 1296–1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
43. Johannessen O.M., Ivanova N. Sea ice passive microwave algorithms and sar validation. // ESA Living Planet Symposium. At Bergen, Norway, 28 June –2 July 2010. Vol. ESA Proceedings SP-686.
44. Kaleschke L., C. Lupkes, T. Vihma, J. Haarpaintner, A. Bochert, J. Hartmann, and G. Heygster. SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis. // Can. J. Remote Sens. 2001. Vol. 27. No. 5. P. 526–537.
45. Kern S. A new method for medium-resolution sea ice analysis using weather-influence corrected Special Sensor Microwave/Imager 85 GHz data. // Int. J. Remote Sensing. 2004. Vol. 25. P. 1–28.
46. Knuth M. A., Ackley S. F. Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates. // Annals of Glaciology. 2006. Vol.4.No. 1. P. 303–309. DOI: 10.3189/172756406781811466.
47. Lewis M. J, Tison J. L, Weissling B., Delille B., Ackley S. F., Brabant F., Xie H. Sea ice and snow cover characteristics during the winter-spring transition in the Bellingshausen Sea: an overview of SIMBA 2007. // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2011. Vol. 58. No. 9–10. P. 993–1276. Antarctic Sea Ice Research during the International Polar Year 2007-2009. P. 1019–1038.
48. Lovas S.M., Rubinstein I., Ulstad C. Weather influence on passive microwave brightness temperatures. // Polar Research. 1994. Vol. 13. No. 1. P. 67–81.
49. Matzler C. editor. Radiative transfer models for microwave radiometry. COST 712: Final Report of Project 1. Bern, Switzerland. February 2000. 176 p.
50. Meier W.N. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic Peripheral Seas. // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2005. Vol. 43. No. 6. P.1324–1337.
51. Meier W.N., Van Woert M.L., Bertoia C. Evaluation of operational SSM/I ice-concentration algorithms. // Annals of Glaciology. 2001. Vol. 33. P. 102–108.
52. Onstott R.G., Grenfell T.C., Matzler C., Luther C.A., and Svendsen E.A. Evolution of microwave sea ice signatures during early summer and midsummer in the marginal ice zone. // Journal of Geophysical Research. 1987. Vol. 92. No. C7. P. 6825–6835.
53. Pedersen L.T. Merging microwave radiometer data and meteorological data for improved sea ice concentrations. // EARSeL Advances in Remote Sensing. 1994. Vol. 3. No. 2-XII. P. 81–89.
54. Powell D.C., Markus T., Cavalieri D.J., Gasiewski A.J., Klein M., Maslanik J. A., Stroeve J.C., and Mathew Sturm. Microwave Signatures of Snow on Sea Ice: Modeling. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2006. Vol. 44. No. 11. P. 3091–3102.
55. Przybylak R. The Climate of the Arctic. Dordrecht: Kluwer Academic Publish. 2003. 271 p.
56. Rees W.G. Remote Sensing of Snow and Ice. New York: Taylor&Franc. Group. 2006. 285 p.
57. Serreze M., Barry R. The Arctic Climate System. Cambridge: University Press. 2005. 385 p.
58. Shokr M., Lambe A., Tom Agnew T. A New Algorithm (ECICE) to Estimate Ice Concentration from Remote Sensing Observations: an Application to 85 GHz Passive Microwave Data. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46. No. 12. P. 4104–4121.

59. Spreen G. Kaleschke L., and Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. No. C02S03. DOI:10.1029/2005JC003384.
60. Sun N., Weng F. Evaluation of Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) Environmental Data Records // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008. Vol. 46. No. 4. P. 1006–1016.
61. Svendsen E., Kloster K., Farrelly 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 SMMR for sea ice research. // J. Geophys. Res. 1983. Vol. 88. P. 2781–2791.
62. Swift C.T., K.St. Germain, K.C. Jezek, S.P. Gogineni, A.J. Gow, D.K. Perovich, T.C. Grenfell, R.G. Onstott. Laboratory Investigations of the Electromagnetic Properties of Artificial Sea Ice. // Microwave remote sensing of sea ice. Carsey F.D., editor. Washington: American Geophysical Union. 1992. Ch. 9. P. 61–84.
63. Teleti P.R., Luis A.J. Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing // International Journal of Geosciences. 2013. Vol. 4. No. 7. P. 1031–1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
64. Thomas D. N., Dieckmann G. S. editors. Sea Ice. Blackwell Publishing. 2003.
65. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A. and T.A. Alexeeva. Snow Cover Effect on Brightness Temperature of Arctic Ice Fields Based on SSM/I Data. // Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) Proceedings, Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013. P. 514–518.
66. 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. Vol. 59. P. 123–133.
67. 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. Vol. 56. No. 8. P. 1578–1589. DOI: 10.1016/j.asr.2015.07.009.
68. Tucker W.B., T.C. Grenfell, R.G. Onstott, D.K. Perovich, A.J. Gow, R.A. Shuchman, and L.L. Sutherland. Microwave and Physical Properties of Sea Ice in the Winter Marginal Ice Zone. // J. Geophysical Research. 1991. Vol. 96. No. C3. P. 4573–4587.
69. Turner J., R. Bindshadler, P. Convey, G. di Prisco, E. Fahrbach, J. Gutt, D. Hodgson, P. Mayewski, C. Summerhayes - Eds. Antarctic Climate Change and the Environment. Scientific Committee on Antarctic Research Scott Polar Research Institute. Cambridge. 2009. 526 p.
70. Voss S., Heygster G., Ezraty R. Improving sea ice type discrimination by the simultaneous use of SSM/I and scatterometer data. // Polar Research. 2003. Vol. 22. No. 1. P. 35–42.
71. Weng F., Zou X., Yan B., Han Y., Liu Q. Applications of Special Sensor Microwave Imager and Sounder (SSMIS) Measurements in Weather and Climate Studies // Advances in Meteorological Science and Technology. 2011. No. 1. P. 14–24.

Polar sea ice monitoring using satellite microwave radiometer data

V.V. Tikhonov¹, M.D. Raev¹, E.A. Sharkov¹,
D.A. Boyarskii¹, I.A. Repina^{1,2,3}, N.Yu. Komarova¹

¹Space Research Institute RAS, Moscow, 117997, Russia
E-mail: vtikhonov@asp.iki.rssi.ru

²A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Moscow, 119017, Russia

³Hydrometeorological Centre of Russia, Moscow, 123242 Russia

An overview of passive microwave satellite monitoring methods of sea ice of the polar regions is presented. A brief description of microwave radiometers launched into Earth's orbit, the data which have been used so far for the study of sea ice in the Arctic and Antarctic is given. The article describes in detail the algorithms currently used for determining sea ice concentration in the polar regions by satellite microwave radiometers. The methods of construction of these algorithms and the associated disadvantages are considered. The paper presents a new algorithm for determining concentration of the sea ice cover in the Arctic and Antarctic, according to satellite microwave radiometers data. The algorithm is developed by members of the three Russian scientific organizations: IKI RAS, IAP RAS and AARI. The method of constructing the new algorithm is fundamentally different from that of the other algorithms. It is based on a physical model of emission of the "sea surface - ice - snow - atmosphere." The algorithm does not use the values of tie points. All calculated expressions of the algorithm are derived from theoretical modeling. The algorithm makes it possible to reduce the effects of atmospheric changes on sea ice concentration estimates. The algorithm not only derives sea ice concentration, but also shows the area of sea ice occupied by puddles. The last section of the article gives a brief overview of works devoted to comparison of modern algorithms with each other, as well as comparison of their results with radar and infrared data and visual observations from ships.

Keywords: satellite microwave radiometry, emissivity, brightness temperature, algorithm, sea ice, ice concentration, puddle

References

1. Bobylev L.P., Shalina E.V., Johannessen O.M., Zabolotskikh E.V., Sandven S., Babina O.I., *Izmenenie arkticheskogo ledyanogo pokrova po dannym sputnikovogo passivnogo mikrovolnovogo zondirovaniya* (Arctic sea ice transformation revealed from satellite passive microwave data), *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2008, Vol. 78, No. 1, pp. 38–47.
2. Grankov A.G., Mil'shin A.A., *Vzaimosvyaz radioizlucheniya sistemi okean-atmosfera s teplovimi i dinamicheskimi processami na grin razdela* (The relationship of the radio emission of the ocean-atmosphere with thermal and dynamic processes on the verge of partition), Moscow: FIZMATLIT, 2004, 168 p.
3. Gray D.M., and D.H.Male, Editors, *Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use*, Toronto: Pergamon Press, 1981, 776 p.
4. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N., Repina I.A., Smirnov A.V., *Arkticheskiy ledyanoy pokrov stanovitsya sezonnyy?* (Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal?), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 50–65.
5. Johannessen O.M., Alexandrov V., Frolov I.Y., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov Y.U., Babich N.G., *Remote Sensing of Sea Ice in the Northern Sea Route*, Chichester, UK: Springer, 2007, 472 p.
6. Kitaev L.M., Titkova T.B., *Izmenchivost' al'bido snezhnogo pokrova Vostochno-Evropeiskoi ravniny – analiz sputnikovykh dannyykh* (Variability of snow cover albedo – the analysis satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 47–56.
7. Kitaev L.M., Titkova T.B., *Svyaz' izmenchivosti ploshchadi morskogo l'da Arktiki i meteorologicheskikh kharakteristik zimnego perioda na severe Evrazii* (The connection of Arctic Sea ice changes and winter meteorological conditions of northern Eurasia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 179–192.
8. Kotlyakov V.M., *Izbrannye sochineniya. Kniga 1. Glyatsiologiya Antarktidi* (Selected works in six books. Book 1. Glaciology of Antarctica), Moscow: Nauka, 2000, 432 p.
9. Repina I.A., Ivanov V.V. *Primenenie metodov distantsionnogo zondirovaniya v issledovanii dinamiki ledovogo pokrova i sovremennoi klimaticheskoi izmenchivosti Arktiki* (Remote Sensing in Ice Sea Dynamic and Modern Arctic Climate Investigation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 5, pp. 89–103.
10. Repina I.A., Tikhonov V.V., Alekseeva T.A., Ivanov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., *Elektrodinamicheskaya model' izlucheniya arkticheskogo ledyanogo pokrova dlya resheniya zadach sputnikovoi mikrovolnovoi radiometrii* (Electrodynamics Model of Arctic Sea Ice Radiation to Solve the Problems of Satellite Microwave Radiometry), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 5, pp. 29–36.
11. Smirnov V.G., Editors, *Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morei* (Satellite methods for determining the characteristics of the ice cover of the seas), Saint-Petersburg: AANII, 2011, 240 pp.
12. Tikhonov V.V., Repina I.A., Alekseeva T.A., Ivanov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., *Vosstanovlenie splochnosti ledyanogo pokrova Arktiki po dannym SSM/I* (Arctic sea ice cover reconstruction on the basis of SSM/I data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 182–193.
13. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., *Novyyi algoritm vosstanovleniya splochnosti morskogo ledyanogo pokrova po dannim passivnogo mikrovolnovogo zondirovaniya* (New algorithm sea ice cover reconstruction on the basis of passive microwave data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 2, pp. 35–43.
14. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu., *Kompleksnii algoritm opredeleniya ledovikh uslovii v polyarnykh regionakh po dannim sputnikovoyi mikrovolnovoyi radiometrii (VASIA2)* (An integrative algorithm for ice conditions determination in polar regions from satellite microwave radiometry (VASIA2)), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 2, pp. 78–93.
15. Tyshko K.P., Cherepanov N.V., Fedotov V.I., *Kristallicheskie stroenie morskogo ledyanogo pokrova* (Crystal structure of the sea ice cover), Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 2000, 66 p.
16. Sharkov E.A., *Passivnoe mikrovolnovoe zondirovanie Zemli: proshloe, nastoyashchee i plani na budushchee* (Passive microwave sensing: Past, Present and Future Plans), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Issue 1, pp. 70–80.
17. Agnew T., Howell S., *The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data*, *Atmosphere-Ocean*, 2003, Vol. 41, No. 4, pp. 317–331.
18. Andersen S., *Monthly Arctic Sea Ice Signatures for use in Passive Microwave Algorithms*, Technical report 98–18, Danish Meteorological Institute, December 1998. 29 p. URL: <http://saf.met.no/docs/tiepoints.pdf>
19. Andersen S., *Evaluation of SSM/I Sea Ice Algorithms for use in the SAF on Ocean and Sea Ice*, Scientific report 00–10, Danish Meteorological Institute, July 2000, 49 p.
20. 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, Vol. 112, No. C08004, DOI: 10.1029/2006JC003543.
21. 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. DOI: 10.1016/j.rse.2006.05.013.
22. Carsey F.D. editor., *Microwave remote sensing of sea ice*, Washington: American Geophysical Union, 1992, 462 p.
23. Cavalieri D.J., Comiso J.C., *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the AMSR-E Sea Ice Algorithm*, Revised December 1 2000, Landover, Maryland USA: Goddard Space Flight Center, 79 p, available at: http://nsidc.org/data/amsre/pdfs/amsr_atbd_seaice.pdf
24. Cavalieri D.J., P. Gloersen, and T.T. Wilheit., *Aircraft and satellite passive microwave observations of the Bering Sea ice cover during MIZEX West*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, Vol. GE-24, No. 3, pp. 368–377.

25. Cho K., Nishiura K., A study on cloud effect reduction for extracting sea ice area from passive microwave sensor data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, Vol. XXXVIII, No. 8, pp. 1042–1045.
26. Comiso J.C., *SSM/I Concentrations Using the Bootstrap Algorithm*, NASA Reference Publication 1380, 1995, 50 p.
27. Comiso J.C., *Polar Oceans from Space (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library)*, New York: Springer, 2009, 507 p.
28. Comiso J.C., T.C. Grenfell, D.L. Bell, M.A. Lange, and S.F. Ackley, Passive microwave in situ observations of winter Weddell sea ice, *Journal of Geophysical Research*, 1989, Vol. 94, No. C8, pp. 10891–10905.
29. Cuffey K.M., W.S.B. Paterson, *The Physics of Glaciers*, Elsevier, 2010, 704 p.
30. Drinkwater M.R., J.P. Crawford, and D.J. Cavalieri, Multi-frequency, multi-polarization SAR and radiometer sea ice classification, *Proceeding of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'91)*, New York, USA, 3–6 Jun 1991, Vol. 1, pp. 107–111.
31. Eicken H., Grenfell N. C., Perovich D. K., Richter-Menge J. A., Frey K., Hydraulic controls of summer Arctic pack ice albedo, *Journal of Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, No. C08007. DOI:10.1029/2003JC001989.
32. Fliückiger K., Gmiinder H., Matzler Ch., Microwave signatures of sea ice from ARKTIS 93 experiment, *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 1994, Vol. 3, No. 2-XII, pp. 71–80.
33. Gentemann C.L., Wentz F.J., Brewer M., Hilburn K., Smith D., Passive Microwave Remote Sensing of the Ocean: An Overview, *Oceanography from Space. Revisited*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer, 2010, Ch. 2, pp. 13–33.
34. Gloersen P., Campbell W.J., Cavalieri D.J., Comiso J.C., Parkinson C.L., Zwally H.J., *Arctic and antarctic sea ice, 1978-1987: Satellite passive-microwave observations and analysis*, 1992, Washington D.C.: NASA, 290 p.
35. Grenfell T.C., Surface-based passive microwave observations of sea ice in the Bering and Greenland Seas, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, Vol. GE-24, No. 3, pp. 378–382.
36. Grenfell T.C., Surface-based passive microwave studies of multiyear sea ice, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, Vol. 97, No. C3, pp. 3485–3501.
37. Grenfell T.C., and J.C. Comiso, Multifrequency passive microwave observations of first-year sea ice grown in a tank, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, Vol. GE-24, No. 6, pp. 826–831.
38. Han H., Lee H., Comparison of SSM/I Sea Ice Concentration with Kompsat-1 EOC Images of the Arctic and Antarctic, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2006*, July 31–Aug. 4 2006, Denver, CO, pp. 714–717.
39. Hewison T. J., Selbach N., Heygster G., Taylor J. P., McGrath A. J., Airborne Measurements of Arctic Sea Ice, Glacier and Snow Emissivity at 24-183 GHz, *Proceeding IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '02*, 2002, Vol. 5, pp. 2851–2855.
40. Imaoka K., Kachi M., Kasahara M., Ito N., Nakagawa K., Oki T., Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, Vol. XXXVIII, Part 8, pp. 13–16.
41. Ivanova N.O., M. Johannessen, L.T. Pedersen, and R.T. Tonboe, Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 11, pp. 7233–7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
42. Ivanova N.O., L.T. Pedersen, R.T. Tonboe, S. Kern, G. Heygster, T. Laverne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dybkjaer, L. Brucker, and M. Shokr., Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: an optimal algorithm and challenges, *The Cryosphere Discussions*, 2015, Vol. 9, pp. 1296–1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
43. Johannessen O.M., Ivanova N., Sea ice passive microwave algorithms and sar validation. *ESA Living Planet Symposium*, At Bergen, Norway, 28 June –2 July 2010, Vol. ESA Proceedings SP-686.
44. Kaleschke L., C. Lupkes, T. Vihma, J. Haarpaintner, A. Bochert, J. Hartmann, and G. Heygster, SSM/I sea ice remote sensing for mesoscale ocean-atmosphere interaction analysis, *Can. J. Remote Sens.*, 2001, Vol. 27, No. 5, pp. 526–537.
45. Kern S., A new method for medium-resolution sea ice analysis using weather-influence corrected Special Sensor Microwave/Imager 85 GHz data, *Int. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, pp. 1–28.
46. Knuth M. A., Ackley S. F., Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates, *Annals of Glaciology*, 2006, Vol. 4, No 1, pp. 303–309. DOI: 10.3189/172756406781811466.
47. Lewis M. J., Tison J. L., Weissling B., Delille B., Ackley S. F., Brabant F., Xie H., Sea ice and snow cover characteristics during the winter-spring transition in the Bellingshausen Sea: an overview of SIMBA 2007, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2011, Vol. 58, No. 9–10, pp. 993–1276. Antarctic Sea Ice Research during the International Polar Year 2007–2009. pp. 1019–1038.
48. Løvas S.M., Rubinstein I., Ulstad C., Weather influence on passive microwave brightness temperatures, *Polar Research*, 1994, Vol. 13, No. 1, pp. 67–81.
49. Matzler C. editor, *Radiative transfer models for microwave radiometry*, COST 712: Final Report of Project 1, Bern, Switzerland, February 2000, 176 p.
50. Meier W.N., Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic Peripheral Seas, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2005, Vol. 43, No. 6, pp. 1324–1337.
51. Meier W.N., Van Woert M.L., Bertoia C., Evaluation of operational SSM/I ice-concentration algorithms, *Annals of Glaciology*, 2001, Vol. 33, pp. 102–108.
52. Onstott R.G., Grenfell T.C., Matzler C., Luther C.A., and Svendsen E.A., Evolution of microwave sea ice signatures during early summer and midsummer in the marginal ice zone, *Journal of Geophysical Research*, 1987, Vol. 92, No. C7, pp. 6825–6835.
53. Pedersen L.T., Merging microwave radiometer data and meteorological data for improved sea ice concentrations, *EARSeL Advances in Remote Sensing*, 1994, Vol. 3, No. 2-XII, pp. 81–89.
54. Powell D.C., Markus T., Cavalieri D.J., Gasiewski A.J., Klein M., Maslanik J.A., Stroeve J.C., and Mathew Sturm, Microwave Signatures of Snow on Sea Ice: Modeling, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, No. 11, pp. 3091–3102.

55. Przybylak R., *The Climate of the Arctic*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003, 271 p.
56. Rees W.G., *Remote Sensing of Snow and Ice*, New York: Taylor & Francis Group, 2006, 285 p.
57. Serreze M., Barry R., *The Arctic Climate System*, Cambridge: University Press, 2005, 385 p.
58. Shokr M., Lambe A., Tom Agnew T., A New Algorithm (ECICE) to Estimate Ice Concentration from Remote Sensing Observations: an Application to 85 GHz Passive Microwave Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 12, pp. 4104–4121.
59. Spreen G., Kaleschke L., and Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophys. Res.*, 2008, Vol. 113, No. C02S03, DOI:10.1029/2005JC003384.
60. Sun N., Weng F., Evaluation of Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) Environmental Data Records, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 4, pp. 1006–1016.
61. Svendsen E., Kloster K., Farrelly 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 SMMR for sea ice research, *J. Geophys. Res.*, 1983, Vol. 88(C5), pp. 2781–2791.
62. Swift C.T., K.St. Germain, K.C. Jezek, S.P. Gogineni, A.J. Gow, D.K. Perovich, T.C. Grenfell, R.G. Onstott, Laboratory Investigations of the Electromagnetic Properties of Artificial Sea Ice, In: *Microwave remote sensing of sea ice*, Carsey F. D. editor, Washington: American Geophysical Union, 1992, Ch. 9, pp. 61–84.
63. Teleti P.R., Luis A.J., Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing, *International Journal of Geosciences*, 2013, Vol. 4, No. 7, pp. 1031–1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
64. Thomas D. N., Dieckmann G. S. editors., *Sea Ice*. Blackwell Publishing, 2003.
65. Tikhonov V.V., Boyarskii D.A., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., and T.A. Alexeeva, Snow Cover Effect on Brightness Temperature of Arctic Ice Fields Based on SSM/I Data, *Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS)*, Proceedings, Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013, pp. 514–518.
66. 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, Vol. 59, pp. 123–133.
67. 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, Vol. 56, No. 8, pp. 1578–1589. DOI: 10.1016/j.asr.2015.07.009.
68. Tucker W.B., T.C. Grenfell, R.G. Onstott, D.K. Perovich, A.J. Gow, R.A. Shuchman, and L.L. Sutherland, Microwave and Physical Properties of Sea Ice in the Winter Marginal Ice Zone, *J. Geophysical Research*, 1991, Vol. 96, No.C3, pp. 4573–4587.
69. Turner J., R. Bindshadler, P. Convey, G. di Prisco, E. Fahrbach, J. Gutt, D. Hodgson, P. Mayewski, C. Summerhayes, Eds., *Antarctic Climate Change and the Environment*, Scientific Committee on Antarctic Research Scott Polar Research Institute, Cambridge, 2009, 526 p.
70. Voss S., Heygster G., Ezraty R., Improving sea ice type discrimination by the simultaneous use of SSM/I and scatterometer data, *Polar Research*, 2003, Vol. 22, No. 1, pp.35–42.
71. Weng F., Zou X., Yan B., Han Y., Liu Q., Applications of Special Sensor Microwave Imager and Sounder (SSMIS) Measurements in Weather and Climate Studies, *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2011, No. 1, pp. 14–24.