

Морфометрические неоднородности морского льда по данным дистанционного зондирования и наземных измерений

И. А. Репина^{1,2,3}, А. Ю. Артамонов¹

¹ *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: repina@ifaran.ru*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

³ *Майкопский государственный технологический университет
Майкоп, 385000, Россия*

Морской лёд играет важную роль в земной климатической системе, при этом в настоящее время происходят значительные изменения в площади и толщине морского ледяного покрова. Изменяется не только объём, но и структура морского льда. На основе натурных измерений и данных дистанционного зондирования в работе показана важность учёта морфометрических (структурных) неоднородностей морского льда при моделировании его взаимодействия с атмосферой. Рассматривается идентификация с помощью методов дистанционного зондирования снежиц, торосов и разводий. Особое внимание уделяется прикромочным зонам. Исследуется применимость различных спектральных диапазонов для определения относительной площади структурных неоднородностей на поверхности льда. Рассмотрена зависимость коэффициента сопротивления и аэродинамического параметра шероховатости от структуры поверхности. Коэффициент сопротивления нелинейно зависит от сплочённости ледяного покрова, относительной площади снежиц на поверхности, ширины и конфигурации разводий, пространственного расположения и высоты торосов, а также от стратификации атмосферы. Предложенные в работе параметризации могут быть использованы для расчёта потоков тепла и импульса в моделях погоды и климата, а также для интерпретации данных дистанционного зондирования.

Ключевые слова: морской лёд, морфометрические свойства, энергообмен, дистанционное зондирование, коэффициент сопротивления

Одобрена к печати: 01.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-205-221

Введение

Морской ледяной покров определяет изменение альбедо поверхности, потоки тепла и влаги, а также динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой (Макштас, 1984; Репина и др., 2019; Ivanov et al., 2019). Полярной зимой лёд препятствует теплообмену, но при наличии участков открытой воды (полюней, разводий) из-за большой разницы температуры вода – воздух турбулентные потоки тепла возрастают в десятки раз (Репина, Аниферов, 2018; Репина, Чечин 2012; Maykut, 1978). На формирование термического режима приводного слоя атмосферы существенное влияние также оказывают фазовые превращения на поверхности океана, связанные с замерзанием водной поверхности и таянием льдов. Важное свойство морского льда — его сложная поверхностная структура, что связано и с особенностями ледообразования, и с дрейфом ледяных полей. Каждая поверхностная неоднородность (торосы, разводья, снежицы) играет свою роль как во взаимодействии с приводным слоем атмосферы, так и в термическом и радиационном режиме поверхности. И учёт этих морфометрических особенностей важен не только для расчётов, связанных с динамикой и термодинамикой самого льда, но и для климатического моделирования. Наиболее сложны процессы энергообмена на границах льда и открытой воды в так называемых прикромочных зонах, где ледяной покров имеет ярко выраженный сезонный цикл и наблюдается максимальное разнообразие его характеристик (Batrak, Müller, 2018; Zippel, Thomson, 2016). Интерес к исследованию

этих районов объясняется тем, что именно здесь существует максимальная пространственная и временная изменчивость состояния дрейфующих льдов, которые, в свою очередь, играют важную роль в крупномасштабных океанических и атмосферных процессах. Активные исследования прикромочных зон начались ещё в 80-е гг. прошлого века (Muench et al., 1991 и цитируемая литература). В последние десятилетия исследования направлены в основном на определение реакции процессов в прикромочных зонах на ветер, океанские течения и внутреннюю динамику океана (Renfrew et al., 2019), а также на океанские волны (Collins et al., 2018; Stopa et al., 2018). Но несмотря на многочисленные исследования, процессы тепло- и энергообмена в прикромочных зонах морских дрейфующих льдов (или в более широком смысле — зонах сезонной миграции) остаются по-прежнему наименее изученными, особенно в зимнее время. И основные проблемы при моделировании морского льда и восстановлении его характеристик по спутниковым измерениям возникают как раз на границах ледяного покрова.

Для расчёта турбулентных потоков в системе «атмосфера — поверхность» применяют так называемые аэродинамические балк-формулы (Fairall et al., 2003):

$$\tau = \rho C_D U_z^2, \quad (1)$$

$$H = \rho c_p C_H U_z (T_s - T_z), \quad (2)$$

$$L_E = L_s C_E U_z (q_s - q_z), \quad (3)$$

где C_D , C_H , C_E — безразмерные коэффициенты обмена (коэффициент сопротивления, число Стентона и число Дальтона соответственно); c_p и ρ — теплоёмкость и плотность воздуха; L_s — удельная теплота испарения; τ , H и L_E — турбулентные потоки импульса, тепла и влаги соответственно; U_z , T_z и q_z — скорость ветра, температура и влажность на высоте z ; T_s и q_s — температура и влажность у поверхности.

Для расчёта характеристик взаимодействия атмосферы и океана, в частности потоков тепла, влаги и переноса импульса, в моделях над неоднородными поверхностями, где все пространственные неоднородности оказываются внутри ячейки сетки, применяются различные методы, которые получили название методов агрегирования (Степаненко и др., 2006; Molod et al., 2003). Наиболее часто используется два подхода: параметрический и мозаичный. В первом все параметры, характеризующие поверхность и её взаимодействие с атмосферой (параметр шероховатости, коэффициенты обмена, теплофизические свойства поверхности), осредняются внутри ячейки и по формулам (1)–(3) рассчитываются средние для ячейки потоки (Klaassen, Claussen, 1995; Pielke et al., 1997). В мозаичном методе (Avissar, Pielke, 1989; Pielke et al., 1997) потоки рассчитываются для каждого типа поверхности, после чего вычисляются средние значения потоков для всей ячейки, причём поток для каждой поверхности суммируется с площадным весом этой поверхности. Оба метода имеют свои достоинства и недостатки (Avissar, Chen, 1993; Pielke et al., 1997), но в любом случае информация об аэродинамических и теплофизических свойствах каждой поверхности, а также её пространственном распределении необходима для расчётов.

Дистанционное определение морфометрических неоднородностей морского льда

Определение относительной площади и характеристик морфометрических неоднородностей на поверхности ледяного покрова по данным дистанционного зондирования важно как для регионального моделирования, так и для составления карт ледовой обстановки.

Снежицы, или лужи талой воды, образующиеся на ледяном покрове в летний период, являются одним из важнейших элементов арктической климатической системы (Макштан, Богородский, 1996). Их глубина может изменяться от нескольких сантиметров до полутора метров, а площадь достигать сотни квадратных метров. Пространственное распределение

на льду, размер и глубина снежиц, так же как и их цвет, очень изменчивы и зависят от топографии, поверхностных и атмосферных условий. На ровном однолетнем льду их доля в общем покрытии может достигать 90 % (Perovich et al., 2011). В среднем в летний период снежицы покрывают 50–60 % площади ледяной поверхности и, обладая низким альбедо, поглощают в несколько раз больше приходящей коротковолновой радиации, чем остальная часть снежно-ледяного покрова. Также снежицы становятся одной из основных причин занижения летней сплочённости морского льда, определяемой по спутниковым данным. В первых попытках определения наличия снежиц на морском льду с помощью данных дистанционного зондирования использовались космические радиолокаторы с синтезированной апертурой (Yackel, Barber, 2000), далее были разработаны методики идентификации снежиц по данным спутниковых альтиметров и скаттерометров, в частности скаттерометра QuikSCAT (*англ.* Quick Scatterometer) (Howell et al., 2005). Но эти спутниковые системы не дают возможности проследить глобальную динамику изменчивости структуры ледяных полей как в пространственном, так и во временном масштабе. В настоящее время с этой целью используются данные спектрорадиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Rösel, Kaleschke, 2012; Tschudi et al., 2008). Метод определения площади снежиц по данным MODIS основан на различных спектральных свойствах снежиц, льда, открытой воды и снега в полосе наблюдений спектрорадиометра: для каждой из перечисленных поверхностей строятся спектральные модели, а потом решается обратная задача (Tschudi et al., 2008). Результаты анализа в виде карт распределения снежиц на поверхности льда Арктики находятся в открытом доступе на сайте Объединённого центра климатических данных Гамбургского университета (*англ.* Integrated Climate Data Center — ICDC, *англ.* University of Hamburg, *нем.* Universität Hamburg, <https://www.cen.uni-hamburg.de/en/icdc.html>). Но недостатком данных MODIS является, во-первых, относительно короткий ряд наблюдений (с 2000 г.), во-вторых, невозможность получать первичные данные при наличии облачности, что для Арктики представляется критичным, ибо большую часть года она покрыта сплошными облаками. Результаты использования алгоритма восстановления относительной площади снежиц и альбедо их поверхности, основанного на данных спектрометра MERIS (*англ.* Medium Resolution Imaging Spectrometer, 2002–2011) и аналогичного спектрометра OLCI (*англ.* Ocean and Land Colour Instrument, 2017–2020) на спутнике Sentinel-3, представлены на сайте Университета Бремена (*нем.* Universität Bremen, *англ.* University of Bremen, <https://seaice.uni-bremen.de/melt-ponds/>). От вышеприведённого алгоритма восстановления площади снежиц по данным MODIS данный алгоритм отличается использованием физической модели морского льда и талых водоёмов без каких-либо априорных предположений о спектральных коэффициентах отражения поверхности и представлением ежедневных данных вместо еженедельных, что полезно в случае быстрого таяния (Istomina et al., 2015, 2020; Malinka et al., 2018).

Чтобы устранить недостаток методов, основанных на анализе данных спектрометров и, соответственно, подверженных влиянию облачности, используются данные микроволнового зондирования (Тихонов и др., 2015, 2016; Tikhonov et al., 2015), что позволяет определить динамику средней площади снежиц в Арктике и их региональное распространение за относительно долгий период (Репина, Тихонов, 2018). Для уменьшения влияния влажности и облачности в данном алгоритме используется модель атмосферы с различными вертикальными профилями влажности воздуха и водности облаков, а также методы расчёта, сглаживающие влияние атмосферных эффектов.

Одной из важных особенностей морского ледяного покрова является существование разводий (каналов и трещин) — линейных подвижек льда, при которых образуются разрывы шириной 1 м — 1 км и длиной 1–100 км. Хотя в Арктике в зимнее время только один процент поверхности покрыт открытой водой и тонким молодым льдом, разводья способствуют интенсивному обмену явным и скрытым теплом (влагой) между относительно тёплым океаном и холодной зимней атмосферой. Через небольшую площадь разводий (относительно общей площади льда) проходит до 50 % всего турбулентного обмена в Арктике в зимний период (Maykut, 1982; Perovich et al., 2011). Разводья оказывают сильное влияние на пограничный слой

атмосферы (Lüpkes et al., 2008a, b; Marcq, Weiss, 2012; Michaelis et al., 2020) и через ледообразование — на процессы в океане (Barber et al., 2015). Кроме того, они играют существенную роль в газообмене атмосферы и океана, являясь источником парниковых газов (Kort et al., 2012), и служат важным звеном в биологической цепочке арктических экосистем (Stirling, 1997). Данные о пространственном распределении разводий представляются ценным диагностическим параметром для расчёта дрейфа морского льда (Kwok et al., 2013) и изменений в его устойчивости (Hutchings, Hibler, 2008). Информация о площади и динамике разводий необходима и для мониторинга климатических изменений в Арктике (Иванов и др., 2013). Но пространственное разрешение моделей морского льда, как правило, слишком грубое, чтобы явно моделировать разводья. Доля разводий в подсеточной области в глобальных и региональных моделях в основном параметризуется (Timmermann et al., 2009), а для проверки параметризаций необходимы сведения о реальном распределении разводий на поверхности льда. Определение площади и конфигурации разводий по данным дистанционного зондирования рассматривается во многих исследованиях, использующих разные типы данных и фокусирующихся на разных арктических регионах. Наибольшее распространение получили методы с одновременным использованием видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов, когда площадь разводья определяется последовательным наложением нескольких кадров в различных диапазонах частот (Drüe, Heinemann, 2005; Mahoney et al., 2012; Onana et al., 2013). В работе (Willmes, Heinemann, 2016) эта методика усовершенствована с помощью введения фильтра, удаляющего помехи, связанные с локальными изменениями яркостной температуры поверхности льда, в частности из-за теней от облаков. С использованием этого метода построены карты распространения разводий по всей Арктике в зимний период с разрешением 5 км за 2003–2015 гг. (Willmes, Heinemann, 2016), что позволило исследовать межгодовую и региональную изменчивость их распространения. В исследовании (Hoffman et al., 2019) представлен алгоритм, который позволяет на основе инфракрасных изображений определять ширину, ориентацию и площадь разводий. Хотя в качестве примера в работе используются данные MODIS, он применим и к любым другим спутниковым системам, работающим в ИК-диапазоне. Спутниковые микроволновые измерения, как пассивные, так и активные, также используются при исследовании разводий. Их значительное преимущество состоит в том, что в микроволновом спектральном диапазоне влияние облаков и водяного пара может быть минимизировано с использованием атмосферных коррекций. Данные микроволнового радиометра AMSR-E (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer — Earth Observing System) на частотах 18,7 и 89 ГГц за период с 2002 по 2011 г. использовались для получения карт распространения разводий с разрешением 6,25 км (Röhrs, Kaleschke, 2012; Röhrs et al., 2012), что позволило получить достаточно продолжительный временной ряд относительной площади разводий для всей Арктики. Этот метод был использован в работе (Bröhan, Kaleschke, 2014) для получения «климатологии» ориентации и площади разводий. Для определения локальных областей формирования и закрытия разводий и их пространственной структуры наиболее перспективными представляются, конечно, радиолокационные изображения (Fily, Rothrock, 1990). Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) обеспечивает наилучшее пространственное разрешение, но имеет ограниченный пространственный и временной охват. Данные РСА, как правило, используются для определения морфометрических характеристик разводий и для валидации алгоритмов, использующих другие спектральные диапазоны (Ivanova et al., 2016). В публикации (Murashkin et al., 2018) показано, что наибольшее количество разводий определяется при использовании каналов с перекрёстной поляризацией РСА Sentinel-1. Для исследования разводий также может применяться спутниковая альтиметрия. В работе (Zakharova et al., 2015) для обнаружения разводий использовался альтиметр SARAL/AltiKa (*англ.* Satellite with ARGOS and ALtiKa). Метод позволил определять разводья шириной от 200 м до 2–4 км. Относительная площадь и ширина разводий также исследовались и по данным радиолокационного высотометра спутника CryoSat-2 (Wernecke, Kaleschke, 2015).

Из-за сжатия морского льда на его поверхности формируются ледяные гряды, или торосы, которые сильно усложняют судоходство в Арктике. Высота торосов может достигать нескольких метров, они составляют до 50 % всего объёма льда в Арктике (Tucker et al., 1992)

и усиливают нагрузку морского льда на сооружения в прибрежной зоне. Но важно иметь информацию не только о наличии торосов и их пространственном расположении. Многолетние торосы, которые пережили как минимум два летних сезона таяния, более прочные и сплочённые, чем однолетние, поэтому для безопасности судоходства необходимо учитывать и это различие (Bobby, Gill, 2019). Преимущество использования спутникового определения высоты неровностей морского льда в сравнении с самолётным лидарным зондированием состоит в том, что оно обеспечивает более полный региональный охват и может отображать сезонные изменения его структуры. Для картирования высот поверхности морского льда используют микроволновые радиометрические и радиолокационные измерения, радиолокационную и лазерную альтиметрию и скаттерометрию (Kwok, 2014). Разрешение данных микроволновых радиометров составляет 6–25 км, и его недостаточно для получения информации о пространственном распределении торосов. Большой интерес представляют данные радиолокатора на спутнике Radarsat-2 с пространственным разрешением 500 м, наряду с наземными измерениями использовавшиеся для создания карт и классификации торосов (Gegiuc et al., 2018). Возможности РСА-съёмки для идентификации торосов также представлены в работах (Gupta et al., 2014; Haas et al., 1999; Melling, 1998). Радиолокационные альтиметры (например, на спутнике Cryosat-2 (Shepherd et al., 2012)) дают хорошее пространственное разрешение (1650–380 м), но в точности определения высоты торосов проигрывают лазерным (Kurtz et al., 2014). Скаттерометры также способны определять изменчивость высоты льда по изменениям шероховатости поверхности, хотя шероховатость является только одним из факторов, которые одновременно влияют на обратное рассеяние (Nghiem et al., 2007; Remund, Long, 2014). Лазерный альтиметр на спутнике ICESat (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) измеряет высоту морского льда с разрешением 170 м (Kurtz et al., 2008), но его пространственное покрытие не является непрерывным (Kwok et al., 2006).

В работе (Nolin et al., 2002) представлен алгоритм для восстановления высот образований на ледяных полях по данным съёмки многоуглового сканирующего спектрорадиометра MISR (*англ.* Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer) с использованием объединения изображений обзорных камер. По этому алгоритму возможно определение неровностей морского льда высотой от нескольких сантиметров до метров. Исследование (Nolin, Mar, 2019) развивает эту методику для картирования высот и пространственного расположения торосов и неровностей морского льда на большой площади. Здесь также используются данные MISR, но результаты многоугловой съёмки откалиброваны с использованием лидарного самолётного зондирования. Важным отличием данного метода представляется возможность выделения однолетних и многолетних торосов. Последние представляют большую угрозу для безопасности судоходства и сооружений в портах и на шельфе.

Коэффициент сопротивления морского льда

Аэродинамическая шероховатость льда z_0 напрямую связана с высотой его неровностей и необходима для моделирования процессов в пограничном слое атмосферы, так как она влияет на напряжение приземного ветра (Lüpkes et al., 2012; Weiss et al., 2011). Также она используется при моделировании дрейфа льда и расчёте ледового воздействия на суда и портовые сооружения. Шероховатость создаётся взаимодействием поверхности с атмосферой, движением льда и таянием его поверхности, а также зависит от скорости и направления ветра и взаимодействия с береговой линией (Rothrock, Thorndike, 2018). Она различна для разных типов морского льда (Gegiuc et al., 2018; Peterson et al., 2008), зависит от его морфометрических свойств и возраста (Gow, Tucker, 1990) и может служить индикатором толщины льда, его способности к образованию разводий и торошению (Gegiuc et al., 2018). Зависимость шероховатости от возраста объясняется тем, что лёд в начальных стадиях формирования (салонас и блинчатый лёд) является относительно гладким, в то время как паковый и многолетний лёд обладает большей шероховатостью, поскольку на него влияют сжатие и сдвиг (Gow, Tucker, 1990; Guest, Davidson, 1987). В прикромочной зоне дополнительное увеличение

шероховатости может вызывать волновое воздействие. Сезонное осаждение снега на морском льду сглаживает поверхность и уменьшает параметр аэродинамической шероховатости (Déry, Tremblay, 2004; Fassnacht et al., 2009), в то время как ветровая эрозия и повторное выпадение сдуваемого снега создают на льду заструги и сугробы (Déry, Tremblay, 2004; Sturm, 2002). Шероховатость морского льда влияет на турбулентный перенос энергии в приземном слое атмосферы и высоту пограничного слоя (Déry, Taylor, 2018; Smeets et al., 1999). Также существует связь между аэродинамической и термической шероховатостями и степенью таяния (увлажнённости) морского льда и, соответственно, его альбедо (Landy et al., 2015). В прикромочных зонах лёд состоит из ледяных полей размером от километра до нескольких метров. Лыдины окружены открытой морской водой, которая порой содержит мокрый снег, шугу и колотый лёд. Шероховатость поверхности в этом случае сильно меняется в пространстве в зависимости от размера лыдин и расстояния между ними.

Связанное с шероховатостью аэродинамическое сопротивление C_D ледовой поверхности также в большой степени зависит от морфометрических свойств льда. Кроме того, сопротивление зависит и от состояния снежного покрова, наличия позёмки и снегопадов, стратификации приземного воздуха. Поэтому коэффициент сопротивления и параметр шероховатости чрезвычайно изменчивы во времени и в пространстве, чем и объясняется большой разброс экспериментальных коэффициентов и параметров шероховатости, полученных по данным измерений в полярных районах.

В большинстве современных моделей климата и морского льда (например, ЕСНАМ (*англ.* European Centre HAMburg) (Roekner et al., 2003) и FESOM (*англ.* Finite-Element Sea-Ice Ocean Model) (Timmermann et al., 2009)) пространственная и временная изменчивость шероховатости поверхности морского льда не учитывается, а коэффициент сопротивления рассматривается как постоянная величина. При этом тонкий лёд, толстый лёд, лёд различного возраста и сплочённости параметризуются одинаково. Но результаты измерения коэффициента аэродинамического сопротивления представляют существенное увеличение его значений для неровного льда и в прикромочных зонах (Anderson, 1987; Castellani et al., 2014; Guest, Davidson, 1987; Overland, 1985). При этом исследование (Zhang, Rothrock, 2003) показывает, что дрейф морского льда, воспроизводимый по результатам моделирования, существенно зависит от способа задания шероховатости и сопротивления поверхности.

В настоящее время в региональных моделях (WRF (*англ.* Weather Research and Forecasting), а также в климатической модели COSMO-CLM (*англ.* Climate Limited-area Modeling) (<http://www.clm-community.eu>)) используются параметризации, в которых коэффициент шероховатости задаётся отдельно для льда и для воды, а потоки агрегируются как средние по двум поверхностям. Это приводит к линейной зависимости коэффициента сопротивления от сплочённости морского льда (Birnbaum, Lüpkes, 2002). В реальных условиях она не выполняется (Lüpkes, Gryanik, 2015). На основании обработки большого массива данных, полученных в ходе эксперимента SHEBA (*англ.* Surface Heat Budget of the Arctic Ocean), показано, что эта зависимость имеет нелинейный характер (Andreas et al., 2010). В работе (Lüpkes et al., 2012) установлено, что на перенос импульса в атмосфере влияет не только сопротивление открытой воды и плоских лыдин, но также и сопротивление формы, вызванное краями лыдин. Учёт сопротивления формы и приводит к нелинейной зависимости коэффициента сопротивления от сплочённости морского льда (Lüpkes, Birnbaum, 2005). Прикромочные зоны занимают довольно небольшую площадь в сравнении со всей площадью морского льда, и значимость параметризации сопротивления в них может показаться небольшой. Но в той же работе (Andreas et al., 2010) продемонстрировано, что сопротивление поверхности, покрытой снежниками (характерно для большей части Арктики в летний период), также зависит от формы поверхности, точнее от возвышения краёв снежников над водой. Анализ данных эксперимента SHEBA показал, что сопротивление усиливается с увеличением относительной площади снежников и достигает максимума при их 50%-й концентрации. Для прикромочных зон максимум сопротивления также наблюдается при сплочённости льда 50–60 %. То есть концепция параметризации сопротивления, первоначально выведенная для небольших прикромочных зон морского льда, может быть использована для гораздо большего географиче-

ского региона. В настоящее время для расчёта сопротивления наиболее распространён подход, когда отдельно считается сопротивление гладкой поверхности и отдельно — сопротивление формы, вызванное краями морских льдин или снежиц (Gryanik, Lüpkes, 2018; Lüpkes, Gryanik, 2015; Lüpkes et al., 2012). Также в параметризации учитывается стратификация атмосферы, которая сильно влияет на поверхностное сопротивление в зимний период (Gryanik, Lüpkes, 2018; Lüpkes et al., 2008b).

Для экспериментального определения зависимости коэффициентов обмена от разных факторов нами использовались данные измерений характеристик энергообмена в Арктике в период с 2004 по 2018 г. в рамках международного проекта NABOS (*англ.* Nansen and Amundsen Basin Observation System) (Polyakov et al., 2011). В ходе эксперимента выполнялось непрерывное измерение потоков тепла, влаги, импульса и радиационного обмена в приповерхностном слое атмосферы при различных условиях атмосферной стратификации и над различными типами поверхности. В основном измерения проводились в центральных районах Арктики на границах континентального шельфа в летне-осенний период, когда ледовые условия характеризуются разнообразными типами льда: формирующийся ледяной покров, однолетние и многолетние льды, льды, покрытые торосами и снежицами, ледяные поля с разводьями. Стратификация атмосферы в это время, как правило, нейтральная или неустойчивая, но над полями многолетнего льда в холодные дни могут наблюдаться и устойчивые пограничные слои.

Сопротивление формы, возникающее при обтекании воздушным потоком неровностей на поверхности льда, как показывают лабораторные и специальные полевые измерения (Smeets, van den Broeke, 2008), может в 5–7 раз превышать касательное напряжение ровной поверхности. Для исследования трансформации воздушного потока над грядой торосов были проведены прямые измерения потока импульса на различном расстоянии от неё с наветренной и подветренной сторон. Ширина основания торосов составляла 2–3 м, высота $h \approx 1,5$ м. Под влиянием взаимодействия с торосами существенно изменяется структура турбулентного потока: крупные турбулентные вихри разбиваются на более мелкие и интенсивность турбулентности резко возрастает. Среднее значение C_D над такими торосами составило: $3,1 \cdot 10^{-3}$. Значение z_0 при переходе от ровной поверхности к торосенной изменяется на два порядка. За грядой торосов вдоль по ветровому потоку распространяется зона повышенной интенсивности турбулентности. От степени развития этой зоны зависит горизонтальное расстояние, до которого распространяется влияние торосов. Непосредственно за грядой (от подстилающей поверхности до высоты порядка высоты торосов) поток некоторое время сохраняет свойства, которые сформировались у него при прохождении гряды. Скорость ветра здесь ослаблена, напряжение турбулентного трения растёт с высотой, и, следовательно, в этой области потока основные соотношения подобия для пристеночного течения не могут быть использованы.

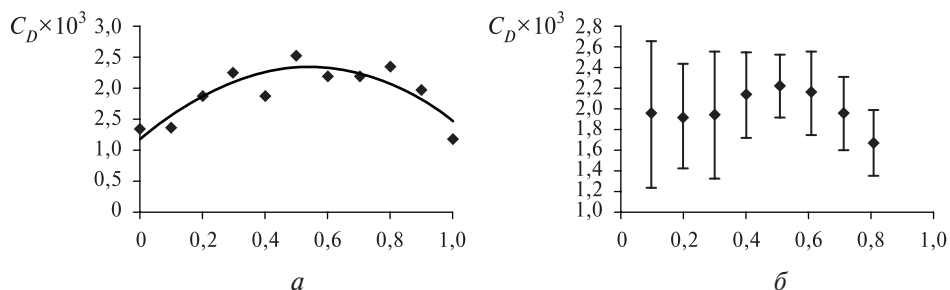


Рис. 1. Экспериментальная зависимость коэффициента сопротивления от сплочённости морского льда (а) и относительной площади снежиц на его поверхности (б)

Данные наших измерений над поверхностями со средней высотой неровностей 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 м дали зависимость:

$$C_D \times 10^3 = 1,4 + 0,2 \ln E.$$

Но эта зависимость выполняется только при наличии достаточно протяжённых гряд торосов и устойчивого направления ветра.

При измерениях в прикромочных зонах и над снежницами подтверждён факт нелинейной зависимости коэффициента сопротивления от сплочённости льда (рис. 1а, см. с. 211) и относительной площади снежниц (рис. 1б). Большой разброс при малом количестве снежниц связан с преобладанием других неоднородностей — торосов, заструг и пр. Зависимость коэффициента сопротивления от сплочённости льда может быть параметризована соотношением:

$$C_D \times 10^3 = 1,17 + 4,34(1 - A^2).$$

Заключение

Северная полярная область занимает особое место в современной климатической системе как индикатор происходящих изменений вследствие так называемого эффекта полярного усиления — более интенсивного потепления в высоких широтах, чем в остальной части Северного полушария. Одним из проявлений этих изменений является увеличение свободной ото льда площади в Северном Ледовитом океане, начавшееся с конца прошлого века. Состояние ледяного покрова во многом определяет тепловое взаимодействие между океаном и атмосферой в полярных регионах, а его уменьшение увеличивает интенсивность теплообмена между атмосферой и океаном.

Существенные изменения происходят не только с площадью и толщиной льда, но и с его структурой. Изменяется относительная площадь разводий и снежниц, усиливается торшение. В представленной статье продемонстрировано, что структурные неоднородности поверхности льда оказывают существенное влияние на его взаимодействие с атмосферой. Обзор методов дистанционного зондирования разводий, снежниц и неоднородностей высоты ледяного покрова показывает важность подспутниковых наблюдений. И особенно таких характеристик льда, как аэродинамическая шероховатость и коэффициент сопротивления. В статье по результатам наблюдений в Арктике и литературным данным показана существенная изменчивость этих параметров в зависимости от морфометрических свойств покрытой льдом поверхности. Коэффициент сопротивления нелинейно зависит от сплочённости ледяного покрова, относительной площади снежниц на поверхности, пространственного расположения и высоты торосов, а также от стратификации атмосферы. Морфометрические свойства льда, необходимые для расчётов, могут быть получены из данных дистанционного зондирования, а параметризации использованы при расчётах потоков в региональных и климатических моделях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-17-00249).

Литература

1. Иванов В. В., Алексеев В. А., Алексеева Т. А., Колдунов Н. В., Репина И. А., Смирнов А. В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65. DOI: 10.7868/S0205961413040076.
2. Макитас А. П. Тепловой баланс Арктических льдов в зимний период / под ред. Ю. В. Николаева. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 67 с.
3. Макитас А. П., Богородский П. В. К вопросу о формировании снежниц в Арктическом бассейне // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 72–80.
4. Репина И. А., Аниферов А. А. Исследование динамики атмосферного пограничного слоя над заприпайной полыней моря Лаптевых по данным WRF-моделирования // Современные про-

- блемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 282–295. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-282-295.
5. Репина И. А., Тихонов В. В. Снежицы на поверхности льда в летний период и их связь с климатическими изменениями в Арктике // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 15–30.
 6. Репина И. А., Чечин Д. Г. Влияние полыней и разводий в Арктике на структуру атмосферного пограничного слоя и региональный климат // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 162–170.
 7. Репина И. А., Артамонов А. Ю., Варенцов М. И., Хавина Е. М. Взаимодействие атмосферы и океана в Северном Ледовитом океане по данным измерений в летне-осенний период // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 49–61. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10075.
 8. Степаненко В. М., Миранда П. М., Лыкосов В. Н. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы и гидрологически неоднородной суши // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11. Ч. 3. С. 118–127.
 9. Тихонов В. В., Репина И. А., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Комарова Н. Ю. Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 78–93. DOI: 10.7868/S0205961415020104.
 10. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор. // Исслед. Земли из космоса. Т. 2016. № 4. С. 65–84. DOI: 10.7868/S0205961416040072.
 11. Anderson R. J. Wind stress measurements over rough sea ice during the 1984 Marginal Ice Zone Experiment // J. Geophysical Research. 1987. V. 92(C7). P. 6933–6941. DOI: 10.1029/JC092iC07p06933.
 12. Andreas E. L., Horst T. W., Grachev A. A., Persson P. O. G., Fairall C. W., Guest P. S., Jordan R. E. Parameterizing turbulent exchange over summer sea ice and the marginal ice zone // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2010. V. 136. P. 927–943. DOI: 10.1002/qj.618.
 13. Avissar R., Chen F. Development and analysis of prognostic equations for mesoscale kinetic energy and mesoscale (subgrid scale) fluxes for large-scale atmospheric models // J. Atmospheric Sciences. 1993. V. 50(22). P. 3751–3774. DOI: 10.1175/1520-0469(1993)050<3751:DAAOPE>2.0.CO;2.
 14. Avissar R., Pielke R. A. A parameterization of heterogeneous land-surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology // Monthly Weather Review. 1989. V. 117. P. 2113–2136. DOI: 10.1175/1520-0493(1989)117<2113:APOHLS>2.0.CO;2.
 15. Barber D. G., Hop H., Mundy C. J., Else B., Dmitrenko I. A., Tremblay J. E., Ehn J. K., Assmy P., Daase M., Candlish L. M., Rysgaard S. Selected physical, biological and biogeochemical implications of a rapidly changing Arctic Marginal Ice Zone // Progress in Oceanography. 2015. V. 139. P. 122–150. DOI: 10.1016/j.pocan.2015.09.003.
 16. Batrak Y., Müller M. Atmospheric response to kilometer-scale changes in sea ice concentration within the marginal ice zone // Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. P. 6702–6709. DOI: 10.1029/2018GL078295.
 17. Birnbaum G., Lüpkes C. A new parametrisation of surface drag in the marginal sea ice zone // Tellus. Ser. A. 2002. V. 54(1). P. 107–123. DOI: 10.3402/tellusa.v54i1.12121.
 18. Bobby P., Gill E. W. Modeling Scattering Differences between Sea Ice Ridges // Proc. OCEANS 2019. 17–20 June 2019, Marseille, France. 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867124.
 19. Bröhan D., Kaleschke L. A nine-year climatology of arctic sea ice lead orientation and frequency from AMSR-E // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 1451–1475. DOI: 10.3390/rs6021451.
 20. Castellani G., Lüpkes C., Hendricks S., Gerdes R. Variability of Arctic sea-ice topography and its impact on the atmospheric surface drag // J. Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119(10). P. 6743–6762. DOI: 10.1002/2013JC009712.
 21. Collins C., Doble M., Lund B., Smith M. Observations of surface wave dispersion in the marginal ice zone // J. Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123(5). P. 3336–3354. DOI: 10.1029/2018JC013788.
 22. Déry S. J., Taylor P. A. Some aspects of the interaction of blowing snow with the atmospheric boundary layer // Hydrological Process. 2018. V. 10. P. 1345–1358. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199610)10:10<1345:AID-HYP465>3.0.CO;2-2.
 23. Déry S. J., Tremblay L.-B. Modeling the Effects of Wind Redistribution on the Snow Mass Budget of Polar Sea Ice // J. Physical Oceanography. 2004. V. 34. P. 258–271. DOI: 10.1175/1520-0485(2004)034<0258:MTEOWR>2.0.CO;2.
 24. Drüe C., Heinemann G. Accuracy assessment of sea-ice concentrations from MODIS using in-situ measurements // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 95. P. 139–149. DOI: 10.1016/j.rse.2004.12.004.
 25. Fairall C. W., Bradley E. F., Hare J. E., Grachev A. A., Edson J. B. Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. V. 16(4). P. 571–591. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<0571:BPOASF>2.0.CO;2.
 26. Fassnacht S. R., Williams M. W., Corrao M. V. Changes in the surface roughness of snow from millimetre to metre scales // Ecological Complexity. 2009. V. 6. P. 221–229. DOI: 10.1016/j.ecocom.2009.05.003.

27. *Fily M., Rothrock D.* Opening and closing of sea ice leads: Digital measurements from synthetic aperture radar // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1990. V. 95. P. 789–796. DOI: 10.1029/JC095iC01p00789.
28. *Gegiuc A., Similä M., Karvonen J., Lensu M., Mäkynen M., Vainio J.* Estimation of degree of sea ice ridging based on dual-polarized C-band SAR data // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. P. 343–364. DOI: 10.5194/tc-12-343-2018.
29. *Gow A.J., Tucker W.B.* Sea Ice in the Polar Regions / ed. Smith W.O. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1990. P. 47–122.
30. *Gryanik V.M., Lüpkes C.* An efficient non-iterative bulk parametrization of surface fluxes for stable atmospheric conditions over polar sea-ice // *Boundary -Layer Meteorology*. 2018. V. 166(2). P. 301–325. DOI: 10.1007/s10546-017-0302-x.
31. *Guest P.S., Davidson K.L.* The effect of observed ice conditions on the drag coefficient in the summer East Greenland Sea marginal ice zone // *J. Geophysical Research*. 1987. V. 92(C7). P. 6943–6954. DOI: 10.1029/JC092iC07p06943.
32. *Gupta M., Barber D.G., Scharien R.K., Isleifson D.* Detection and classification of surface roughness in an Arctic marginal sea ice zone // *Hydrological Process*. 2014. V. 28. No. 3. P. 599–609. DOI: 10.1002/hyp.9593.
33. *Haas C., Liu Q., Martin T.* Retrieval of Antarctic sea-ice pressure ridge frequencies from ERS SAR imagery by means of in situ laser profiling and usage of a neural network // *Intern. J. Remote Sensing*. 1999. V. 20. No. 15/16. P. 3111–3123. DOI: 10.1080/014311699211642.
34. *Hoffman J.P., Ackerman S.A., Liu Y., Key J.R.* The Detection and Characterization of Arctic Sea Ice Leads with Satellite Imagers // *Remote Sensing*. 2019. V. 11(5). Art. No. 521. DOI: 10.3390/rs11050521.
35. *Howell S.E.L., Yackel J.J., De Abreu R., Goldsetzer T., Breneman C.* On the utility of SeaWinds/QuikSCAT data for the estimation of the thermodynamic state of first-year sea ice // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V. 43(6). P. 1338–1350. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846153.
36. *Hutchings J.K., Hibler W.D.* Small-scale sea ice deformation in the Beaufort Sea seasonal ice zone // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2008. V. 113. Art. No. C003971. DOI: 10.1029/2006JC003971.
37. *Istomina L., Heygster G., Huntemann M., Schwarz P., Birnbaum G., Scharien R., Polashenski C., Perovich D., Zege E., Malinka A., Prikhach A., Katsev I.* Melt pond fraction and spectral sea ice albedo retrieval from MERIS data. Pt. 1: Validation against in situ, aerial, and ship cruise data // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 1551–1566. DOI: 10.5194/tc-9-1551-2015.
38. *Istomina L., Marks H., Huntemann M., Heygster G., Spreen G.* Improved cloud detection over sea ice and snow during Arctic summer using MERIS data // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. V. 13. P. 6459–6472. DOI: 10.5194/amt-13-6459-2020.
39. *Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E.* Arctic Sea Ice Decline in the 2010s. The Increasing Role of the Ocean – Air Heat Exchange in the Late Summer // *Atmosphere*. 2019. V. 10. No. 4. Art. No. 184. 23 p. DOI: 10.3390/atmos10040184.
40. *Ivanova N., Rampal P., Bouillon S.* Error assessment of satellite-derived lead fraction in the Arctic // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. P. 585–595. DOI: 10.5194/tc-10-585-2016.
41. *Klaassen W., Claussen M.* Landscape variability and surface flux parameterization in climate models // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1995. V. 73(3–4). P. 181–188. DOI: 10.1016/0168-1923(94)05073-F.
42. *Kort E., Wofsy S., Daube B., Diao M., Elkins J., Gao R., Hintsa E., Hurst D., Jimenez R., Moore F. et al.* Atmospheric observations of Arctic Ocean methane emissions up to 82° north // *Nature Geoscience*. 2012. V. 5. P. 318–321. DOI: 10.1038/ngeo1452.
43. *Kurtz N.T., Markus T., Cavalieri D.J., Krabill W., Sonntag J.G., Miller J.* Comparison of ICESat data with airborne laser altimeter measurements over arctic sea ice // *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2008. V. 46. P. 1913–1924. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916639.
44. *Kurtz N.T., Galin N., Studinger M.* An improved CryoSat-2 sea ice freeboard retrieval algorithm through the use of waveform fitting // *The Cryosphere*. 2014. V. 8. P. 1217–1237. DOI: 10.5194/tc-8-1217-2014.
45. *Kwok R.* Declassified high-resolution visible imagery for Arctic sea ice investigations: An overview // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 142. P. 44–56. DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.015.
46. *Kwok R., Cunningham G.F., Zwally H.J., Yi D.* ICESat over Arctic sea ice: Interpretation of altimetric and reflectivity profiles // *J. Geophysical Research*. 2006. V. 111. Art. No. C06006. DOI: 10.1029/2005JC003175.
47. *Kwok R., Spreen G., Pang S.* Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2013. V. 118. P. 2408–2425. DOI: 10.1002/jgrc.20191.
48. *Landy J.C., Ehn J.K., Barber D.G.* Albedo feedback enhanced by smoother Arctic sea ice // *Geophysical Research Letters*. 2015. V. 42. P. 10714–10720. DOI: 10.1002/2015GL066712.
49. *Lüpkes C., Birnbaum G.* Surface drag in the Arctic marginal sea-ice zone: A comparison of different parameterisation concepts // *Boundary-Layer Meteorology*. 2005. V. 117. P. 179–211. DOI: 10.1007/s10546-005-1445-8.

50. *Lüpkes C., Gryanik V.M.* A stability-dependent parametrization of transfer coefficients for momentum and heat over polar sea ice to be used in climate models // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. V. 120. P. 552–581. DOI: 10.1002/2014JD022418.
51. *Lüpkes C., Gryanik V., Witha B., Gryschka M., Raasch S., Gollnik T.* (2008a) Modeling convection over arctic leads with LES and a non-eddyresolving microscale model // *J. Geophysical Research*. 2008. V. 113. Art. No. C09028. DOI: 10.1029/2007JC004099.
52. *Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U.* (2008b) Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night // *Geophysical Research Letters*. 2008. V. 35(3). Art. No. L03805. DOI: 10.1029/2007GL032461.
53. *Lüpkes C., Gryanik V.M., Hartmann J., Andreas E.L.* A parametrization, based on sea ice morphology, of the neutral atmospheric drag coefficients for weather prediction and climate models // *J. Geophysical Research*. 2012. V. 117. Art. No. D13112. DOI: 10.1029/2012JD017630.
54. *Mahoney A., Eicken H., Shapiro L., Gens R., Heinrichs T., Meyer F., Gaylord A.* Mapping and Characterization of Recurring Spring Leads and Landfast Ice in the Beaufort and Chukchi Seas: Final Report. Ocs Study Boem 2012-067. Fairbanks, AK, USA: Univ. Fairbanks, 2012.
55. *Malinka A., Zege E., Istomina L., Heygster G., Spreen G., Perovich D.* Reflective properties of melt ponds on sea ice // *The Cryosphere*. 2018. V. 12. No. 6. P. 1921–1937. DOI: 10.5194/tc-12-1921-2018.
56. *Marcq S., Weiss J.* Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 143–156. DOI: 10.5194/tc-6-143-2012.
57. *Maykut G.A.* Energy exchange over young sea ice in the central Arctic // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1978. V. 83. P. 3646–3658. DOI: 10.1029/JC083iC07p03646
58. *Maykut G.A.* Large-scale heat exchange and ice production // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1982. V. 87. P. 7971–7984. DOI: 10.1029/JC087iC10p07971.
59. *Melling H.* Detection of features in first-year pack ice by synthetic aperture radar (SAR) // *Intern. J. Remote Sensing*. 1998. V. 19. No. 6. P. 1223–1249. DOI: 10.1080/014311698215702.
60. *Michaelis J., Lüpkes C., Zhou X., Gryschka M., Gryanik V.M.* Influence of lead width on the turbulent flow over sea ice leads: modeling and parametrization // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. V. 125(15). Art. No. e2019JD031996. DOI: 10.1029/2019JD031996.
61. *Molod A., Salmun H., Waugh D.W.* A new look at modeling surface heterogeneity: extending its influence in the vertical // *J. Hydrometeorology*. 2003. V. 4. P. 810–825. DOI: 10.1175/1525-7541(2003)004<0810:ANLAMS>2.0.CO;2.
62. *Muench R.D., Jezek K., Kantha L.* Introduction: Third marginal ice zone research collection // *J. Geophysical Research: Ocean*. 1991. V. 96. Iss. C3. P. 4529–4530. DOI: 10.1029/90JC02327.
63. *Murashkin D., Spreen G., Huntemann M., Dierking W.* Method for detection of leads from Sentinel-1 SAR images // *Annals of Glaciology*. 2018. V. 59. P. 124–136. DOI: 10.1017/aog.2018.6.
64. *Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colón P., Weatherly J.W., Neumann G.* Rapid reduction of Arctic perennial sea ice // *Geophysical Research Letters*. 2007. V. 34. P. 1–6. DOI: 10.1029/2007GL031138.
65. *Nolin A.W., Mar E.* Arctic sea ice surface roughness estimated from multi-angular reflectance satellite imagery // *Remote Sensing*. 2019. V. 11(1). Art. No. 50. DOI: 10.3390/rs11010050.
66. *Nolin A.W., Fetterer F.M., Scambos T.A.* Surface roughness characterizations of sea ice and ice sheets: Case studies with MISR data // *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*. 2002. V. 40. P. 1605–1615. DOI: 10.1109/TGRS.2002.801581.
67. *Onana V., Kurtz N.T., Farrell S.L., Koenig L.S., Studinger M., Harbeck J.P.* A sea-ice lead detection algorithm for use with high-resolution airborne visible imagery // *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*. 2013. V. 51. P. 38–56. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2202666.
68. *Overland J.E.* Atmospheric boundary layer structure and drag coefficients over sea ice // *J. Geophysical Research*. 1985. V. 90. P. 9029–9049. DOI: 10.1029/JC090iC05p09029.
69. *Perovich D.K., Jones K.F., Light B., Eicken H., Markus T., Stroeve J., Lindsay R.* Solar partitioning in a changing Arctic sea-ice cover // *Annals of Glaciology*. 2011. V. 52(57). P. 192–196. DOI: 10.3189/172756411795931543.
70. *Peterson I.K., Prinsenber S.J., Holladay J.S.* Observations of sea ice thickness, surface roughness and ice motion in Amundsen Gulf // *J. Geophysical Research: Oceans*. 2008. V. 113. P. 1–14. DOI: 10.1029/2007JC004456.
71. *Pielke R.A., Zeng X., Lee T.J., Dalu G.* Mesoscale fluxes over heterogeneous flat landscapes for use in larger scale models // *J. Hydrology*. 1997. V. 190. P. 317–336. DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03132-0.
72. *Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fortier L., Gascard J.-C., Hansen E., Hölemann J., Ivanov V.V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.-D., McLaughlin F.A., Piechura J., Repina I., Timokhov L.A., Walczowski W., Woodgate R.* Fate of early 2000s arctic warm water pulse // *Bull. American Meteorological Society*. 2011. V. 92. No. 5. P. 561–566. DOI: 10.1175/2010BAMS2921.1.

73. Remund Q. P., Long D. G. A decade of QuikSCAT scatterometer sea ice extent data // IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing. 2014. V. 52. P. 4281–4290. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2281056.
74. Renfrew I. A., Elvidge A. D., Edwards J. M. Atmospheric sensitivity to marginal-ice-zone drag: Local and global responses // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2019. V. 145. No. 720. P. 1165–1179. DOI: 10.1002/qj.3486.
75. Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornblüeh L., Schlese U., Schulzweida U., Kirchner I., Manzini E., Rhodin A., Tompkins A. The atmospheric general circulation model ECHAM5. Pt. 1. Model description: Report No. 349. Hamburg, Germany: Max Planck Inst. Meteorology, 2003. 140 p.
76. Röhrs J., Kaleschke L. An algorithm to detect sea ice leads by using AMSR-E passive microwave imagery // The Cryosphere. 2012. V. 6. P. 343–352. DOI: 10.5194/tc-6-343-2012.
77. Röhrs J., Kaleschke L., Bröhan D., Siligam P. K. Corrigendum to “An algorithm to detect sea ice leads by using AMSR-E passive microwave imagery” // The Cryosphere. 2012. V. 6. Art. No. 365. DOI: 10.5194/tc-6-365-2012.
78. Rösel A., Kaleschke L. Exceptional melt pond occurrence in the years 2007 and 2011 on the Arctic sea ice revealed from MODIS satellite data // J. Geophysical Research. 2012. V. 117. Art. No. C05018. DOI: 10.1029/2011JC007869.
79. Rothrock D. A., Thorndike A. S. Geometric properties of the underside of sea ice // J. Geophysical Research. 2018. V. 85. P. 3955–3963. DOI: 10.1029/JC085iC07p03955.
80. Shepherd A., Ivins E. R., Geruo A., Barletta V. R., Bentley M. J., Bettadpur S., Briggs K. H., Bromwich D. H., Forsberg R., Galin N. et al. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance // Science. 2012. V. 338. P. 1183–1189. DOI: 10.1126/science.1228102.
81. Smeets C. J. P. P., van den Broeke M. R. The parameterisation of scalar transfer over rough ice // Boundary-Layer Meteorology. 2008. V. 128. P. 339–355. DOI: 10.1007/s10546-008-9292-z.
82. Smeets C., Duynkerke P., Vugts H. Observed wind profiles and turbulence fluxes over an ice surface with changing surface roughness // Boundary-Layer Meteorology. 1999. V. 92. P. 99–121. DOI: 10.1023/A:1001899015849.
83. Stirling I. The importance of polynyas, ice edges, and leads to marine mammals and birds // J. Marine Systems. 1997. V. 10. P. 9–21. DOI: 10.1016/S0924-7963(96)00054-1.
84. Stopa J. E., Arduin F., Thomson J., Smith M. M., Kohout A., Doble M., Wadhams P. Wave attenuation through an Arctic marginal ice zone on 12 October 2015: 1. Measurement of wave spectra and ice features from Sentinel-1A // J. Geophysical Research: Oceans. 2018. V. 123. No. 5. P. 3619–3634. DOI: 10.1029/2018JC013791.
85. Sturm M. Winter snow cover on the sea ice of the Arctic Ocean at the Surface Heat Budget of the Arctic Ocean (SHEBA): Temporal evolution and spatial variability // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. P. 8047–8064. DOI: 10.1029/2000JC000400.
86. Tikhonov V. V., Repina I. A., Raev M. D., Sharkov E. A., Ivanov V. V., Boyarskii D. A., Alexeeva T. A., Komarova N. Yu. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // Advances in Space Research. 2015. V. 56. No. 8. P. 1578–589. DOI: 10.1016/j.asr.2015.07.009.
87. Timmermann R., Danilov S., Schröter J., Böning C., Sidorenko D., Rollenhagen K. Ocean circulation and sea ice distribution in a finite element global sea ice-ocean model // Ocean Modelling. 2009. V. 27. P. 114–129. DOI: 10.1016/j.ocemod.2008.10.009.
88. Tschudi M. A., Maslanik J. A., Perovich D. K. Derivation of melt pond coverage on arctic sea ice using MODIS observation // Remote Sensing of Environment. 2008. V. 112. P. 2605–2614. DOI: 10.1016/j.rse.2007.12.009.
89. Tucker W. B., Perovich D. K., Gow A. J., Weeks W. F., Drinkwater M. R. Physical properties of sea ice relevant to remote sensing // Microwave Remote Sensing of Sea Ice. 1992. V. 68. P. 9–28.
90. Weiss A. I., King J., Lachlan-Cope T., Ladkin R. On the effective aerodynamic and scalar roughness length of Weddell Sea ice // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2011. V. 116. P. 1–9. DOI: 10.1029/2011JD015949.
91. Wernecke A., Kaleschke L. Lead detection in Arctic sea ice from CryoSat-2: Quality assessment, lead area fraction and width distribution // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 1955–1968. DOI: 10.5194/tc-9-1955-2015.
92. Willmes S., Heinemann G. Sea-ice wintertime lead frequencies and regional characteristics in the Arctic, 2003–2015 // Remote Sensing. 2016. V. 8(1). Art. No. 4. DOI: 10.3390/rs8010004.
93. Yackel J. J., Barber D. G. Melt ponds on sea ice in the Canadian Archipelago, 2: on the use of Radarsat-1 synthetic aperture radar for geophysical inversion // J. Geophysical Research. 2000. V. 105(C9). P. 22061–22069. DOI: 10.1029/2000JC900076.
94. Zakharova E. A., Fleury S., Guerreiro K., Willmes S., Remy F., Kouraev A. V., Heinemann G. Sea ice leads detection using Saral/AltiKa altimeter // Marine Geodesy. 2015. V. 38. P. 522–533. DOI: 10.1080/01490419.2015.1019655.

95. Zhang J., Rothrock D.A. Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates // *Monthly Weather Review*. 2003. V. 131. P. 845–861. DOI: 10.1175/1520-0493(2003)131<0845:MGSIIWA>2.0.CO;2.
96. Zippel S., Thomson J. Air-sea interactions in the marginal ice zone // *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2016. V. 4(1). Art. No. 000095. DOI: 10.12952/journal.elementa.000095.

Morphometric inhomogeneities of sea ice from remote sensing and field measurements

I. A. Repina^{1,2,3}, A. Yu. Artamonov¹

¹ *A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia*
E-mail: repina@ifaran.ru

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

³ *Maykop State Technology University, Maykop 385000, Russia*

Sea ice plays an important role in the Earth's climate system. Currently, significant changes in the extent and thickness of the sea ice sheet are occurring. Not only the volume but also the structure of the sea ice is changing. Based on field measurements and remote sensing data, the paper shows the importance of taking into account the morphometric (structural) inhomogeneities of sea ice when modeling its interaction with the atmosphere. Identification of snowfields, hummocks and leads with the help of remote sensing methods is considered. Particular attention is paid to the marginal zones. The applicability of different spectral ranges for determining the relative area of structural inhomogeneities on the ice surface is investigated. The dependence of the drag coefficient and the aerodynamic roughness parameter on the surface structure is considered. The drag coefficient depends nonlinearly on the concentration of the ice cover, the relative area of snow patches on the surface, on the width and configuration of the leads, on the spatial arrangement and height of the hummocks, and also on the stratification of the atmosphere. The parameterizations proposed in this paper can be used to calculate heat and momentum fluxes in weather and climate models, as well as to interpret remote sensing data.

Keywords: sea ice, morphometric properties, energy exchange, remote sensing, drag coefficient

Accepted: 01.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-205-221

References

- Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V., Does Arctic Ocean Ice Cover Become Seasonal? *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 50–65 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413040076.
- Makshatas A. P., *The Heat Budget of Arctic Ice in the Winter*, E. L. Andreas (Eng. transl.), Cambridge: Intern. Glaciological Society, 2021, 82 p.
- Makshatas A. P., Bogorodskii P. V., On the formation of puddles in the Arctic basin, *Meteorologiya i gidrologiya*, 1996, No. 8, pp. 72–80 (in Russian).
- Repina I.A., Aniferov A. A., Investigation of the atmospheric boundary layer dynamics over the Laptev Sea coastal polynya using WRF modelling, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 282–295 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-282-295.
- Repina I.A., Tihonov V.V., Melt pond on the sea ice surface during summer and its connection with Arctic climate change, *Rossiiskaya Arktika*, 2018, No. 2, pp. 15–30 (in Russian).
- Repina I.A., Chechin D.G., Influence of polynyas and leads in the Arctic on the atmospheric boundary layer structure and the regional climate, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 162–170 (in Russian).
- Repina I.A., Artamonov A. Yu., Varentsov M. I., Khavina E. M., Air-sea interaction in the Arctic Ocean from measurements in the summer-autumn period), *Rossiiskaya Arktika*, 2019, No. 7, pp. 49–61 (in Russian), DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10075.

8. Stepanenko V.M., Miranda P.M., Lykosov V.N., Numerical modeling of mesoscale interaction of the atmosphere and hydrologically inhomogeneous land, *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2006, Vol. 11, Ch. 3, pp. 118–127 (in Russian).
9. Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarsky D.A., Komarova N.Yu., Integrative algorithm of determining ice conditions in polar regions by data of satellite microwave radiometry (VASIA2), *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, Vol. 51, No. 9, pp. 914–928, DOI: 10.1134/S0001433815090194.
10. Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu., Satellite microwave radiometry of sea ice in polar regions. Review, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, Vol. 2016, No. 4, pp. 65–84, DOI: 10.7868/S0205961416040072 (in Russian).
11. Anderson R.J., Wind stress measurements over rough sea ice during the 1984 Marginal Ice Zone Experiment, *J. Geophysical Research*, 1987, Vol. 92(C7), pp. 6933–6941, DOI: 10.1029/JC092iC07p06933.
12. Andreas E.L., Horst T.W., Grachev A.A., Persson P.O.G., Fairall C.W., Guest P.S., Jordan R.E., Parametrizing turbulent exchange over summer sea ice and the marginal ice zone, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2010, Vol. 136, pp. 927–943, DOI: 10.1002/qj.618.
13. Avissar R., Chen F., Development and analysis of prognostic equations for mesoscale kinetic energy and mesoscale (subgrid scale) fluxes for large-scale atmospheric models, *J. Atmospheric Sciences*, 1993, Vol. 50(22), pp. 3751–3774, DOI: 10.1175/1520-0469(1993)050<3751:DAAOPE>2.0.CO;2.
14. Avissar R., Pielke R.A., A parameterization of heterogeneous land-surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology, *Monthly Weather Review*, 1989, Vol. 117, pp. 2113–2136, DOI: 1520-0493(1989)117<2113:APOHLS>2.0.CO;2.
15. Barber D.G., Hop H., Mundy C.J., Else B., Dmitrenko I.A., Tremblay J.E., Ehn J.K., Assmy P., Daase M., Candler L.M., Rysgaard S., Selected physical, biological and biogeochemical implications of a rapidly changing Arctic Marginal Ice Zone, *Progress in Oceanography*, 2015, Vol. 139, pp. 122–150, DOI: 10.1016/j.pocean.2015.09.003.
16. Batrak Y., Müller M., Atmospheric response to kilometer-scale changes in sea ice concentration within the marginal ice zone, *Geophysical Research Letters*, 2018, Vol. 45, pp. 6702–6709, DOI: 10.1029/2018GL078295.
17. Birnbaum G., Lüpkes C., A new parametrisation of surface drag in the marginal sea ice zone, *Tellus. Ser. A*, 2002, Vol. 54(1), pp. 107–123, DOI: 10.3402/tellusa.v54i1.12121.
18. Bobby P., Gill E.W., Modeling Scattering Differences between Sea Ice Ridges, *Proc. OCEANS 2019*, 17–20 June 2019, Marseille, France, 2019, pp. 1–4, DOI: 10.1109/OCEANSE.2019.8867124.
19. Bröhan D., Kaleschke L., A nine-year climatology of arctic sea ice lead orientation and frequency from AMSR-E, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 1451–1475, DOI: 10.3390/rs6021451.
20. Castellani G., Lüpkes C., Hendricks S., Gerdes R., Variability of Arctic sea-ice topography and its impact on the atmospheric surface drag, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2014, Vol. 119(10), pp. 6743–6762, DOI: 10.1002/2013JC009712
21. Collins C., Doble M., Lund B., Smith M., Observations of surface wave dispersion in the marginal ice zone, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2018, Vol. 123(5), pp. 3336–3354, DOI: 10.1029/2018JC013788.
22. Déry S.J., Taylor P.A., Some aspects of the interaction of blowing snow with the atmospheric boundary layer, *Hydrological Process*, 2018, Vol. 10, pp. 1345–1358, DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199610)10:10<1345:AID-HYP465>3.0.CO;2-2.
23. Déry S.J., Tremblay L.-B., Modeling the Effects of Wind Redistribution on the Snow Mass Budget of Polar Sea Ice, *J. Physical Oceanography*, 2004, Vol. 34, pp. 258–271, DOI: 10.1175/1520-0485(2004)034<0258:MTEOWR>2.0.CO;2.
24. Drüe C., Heinemann G., Accuracy assessment of sea-ice concentrations from MODIS using in-situ measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 95, pp. 139–149, DOI: 10.1016/j.rse.2004.12.004.
25. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., Edson J.B., Bulk parameterization of air–sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm, *J. Climate*, 2003, Vol. 16(4), pp. 571–591.
26. Fassnacht S.R., Williams M.W., Corrao M.V., Changes in the surface roughness of snow from millimetre to metre scales, *Ecological Complexity*, 2009, Vol. 6, pp. 221–229, DOI: 10.1016/j.ecocom.2009.05.003.
27. Fily M., Rothrock D., Opening and closing of sea ice leads: Digital measurements from synthetic aperture radar, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1990, Vol. 95, pp. 789–796, DOI: 10.1029/JC095iC01p00789.
28. Gegiuc A., Similä M., Karvonen J., Lensu M., Mäkynen M., Vainio J., Estimation of degree of sea ice ridging based on dual-polarized C-band SAR data, *The Cryosphere*, 2018, Vol. 12, pp. 343–364, DOI: 10.5194/tc-12-343-2018.
29. Gow A.J., Tucker W.B., *Sea Ice in the Polar Regions*, Smith W.O. (ed.), San Diego, CA, USA: Academic Press, 1990, pp. 47–122.
30. Gryanik V.M., Lüpkes C., An efficient non-iterative bulk parametrization of surface fluxes for stable atmospheric conditions over polar sea-ice, *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, Vol. 166(2), pp. 301–325, DOI: 10.1007/s10546-017-0302-x.

31. Guest P. S., Davidson K. L., The effect of observed ice conditions on the drag coefficient in the summer East Greenland Sea marginal ice zone, *J. Geophysical Research*, 1987, Vol. 92(C7), pp. 6943–6954, DOI: 10.1029/JC092iC07p06943.
32. Gupta M., Barber D. G., Scharien R. K., Isleifson D., Detection and classification of surface roughness in an Arctic marginal sea ice zone, *Hydrological Process*, 2014, Vol. 28, No. 3, pp. 599–609, DOI: 10.1002/hyp.9593.
33. Haas C., Liu Q., Martin T., Retrieval of Antarctic sea-ice pressure ridge frequencies from ERS SAR imagery by means of in situ laser profiling and usage of a neural network, *Intern. J. Remote Sensing*, 1999, Vol. 20, No. 15/16, pp. 3111–3123, DOI: 10.1080/014311699211642.
34. Hoffman J. P., Ackerman S. A., Liu Y., Key J. R., The Detection and Characterization of Arctic Sea Ice Leads with Satellite Imagers, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(5), Art. No. 521, DOI: 10.3390/rs11050521.
35. Howell S. E. L., Yackel J. J., De Abreu R., Goldsetzer T., Breneman C., On the utility of SeaWinds/QuikSCAT data for the estimation of the thermodynamic state of first-year sea ice, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43(6), pp. 1338–1350, DOI: 10.1109/TGRS.2005.846153.
36. Hutchings J. K., Hibler W. D., Small-scale sea ice deformation in the Beaufort Sea seasonal ice zone, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2008, Vol. 113, Art. No. C003971, DOI: 10.1029/2006JC003971.
37. Istomina L., Heygster G., Huntemann M., Schwarz P., Birnbaum G., Scharien R., Polashenski C., Perovich D., Zege E., Malinka A., Prikhach A., Katsev I., Melt pond fraction and spectral sea ice albedo retrieval from MERIS data. Part 1: Validation against in situ, aerial, and ship cruise data, *The Cryosphere*, 2015, Vol. 9, pp. 1551–1566, DOI: 10.5194/tc-9-1551-2015.
38. Istomina L., Marks H., Huntemann M., Heygster G., Spreen G., Improved cloud detection over sea ice and snow during Arctic summer using MERIS data, *Atmospheric Measurement Technique*, 2020, Vol. 13, pp. 6459–6472, DOI: 10.5194/amt-13-6459-2020.
39. Ivanov V., Varentsov M., Matveeva T., Repina I., Artamonov A., Khavina E., Arctic Sea Ice Decline in the 2010s. The Increasing Role of the Ocean – Air Heat Exchange in the Late Summer, *Atmosphere*, 2019, Vol. 10, No. 4, Art. No. 184, 23 p., DOI: 10.3390/atmos10040184.
40. Ivanova N., Rampal P., Bouillon S., Error assessment of satellite-derived lead fraction in the Arctic, *The Cryosphere*, 2016, Vol. 10, pp. 585–595, DOI: 10.5194/tc-10-585-2016.
41. Klaassen W., Claussen M., Landscape variability and surface flux parameterization in climate models, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, Vol. 73(3–4), pp. 181–188, DOI: 10.1016/0168-1923(94)05073-F.
42. Kort E., Wofsy S., Daube B., Diao M., Elkins J., Gao R., Hintsä E., Hurst D., Jimenez R., Moore F. et al., Atmospheric observations of Arctic Ocean methane emissions up to 82° north, *Nature Geoscience*, 2012, Vol. 5, pp. 318–321, DOI: 10.1038/ngeo1452.
43. Kurtz N. T., Markus T., Cavalieri D. J., Krabill W., Sonntag J. G., Miller J., Comparison of ICESat data with airborne laser altimeter measurements over arctic sea ice, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, pp. 1913–1924, DOI: 10.1109/TGRS.2008.916639.
44. Kurtz N. T., Galin N., Studinger M., An improved CryoSat-2 sea ice freeboard retrieval algorithm through the use of waveform fitting, *The Cryosphere*, 2014, Vol. 8, pp. 1217–1237, DOI: 10.5194/tc-8-1217-2014.
45. Kwok R., Declassified high-resolution visible imagery for Arctic sea ice investigations: An overview, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 142, pp. 44–56, DOI: 10.1016/j.rse.2013.11.015.
46. Kwok R., Cunningham G. F., Zwally H. J., Yi D., ICESat over Arctic sea ice: Interpretation of altimetric and reflectivity profiles, *J. Geophysical Research*, 2006, Vol. 111, Art. No. C06006, DOI: 10.1029/2005JC003175.
47. Kwok R., Spreen G., Pang S., Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2013, Vol. 118, pp. 2408–2425, DOI: 10.1002/jgrc.20191.
48. Landy J. C., Ehn J. K., Barber D. G., Albedo feedback enhanced by smoother Arctic sea ice, *Geophysical Research Letters*, 2015, Vol. 42, pp. 10714–10720, DOI: 10.1002/2015GL066712.
49. Lüpkes C., Birnbaum G., Surface drag in the Arctic marginal sea-ice zone: A comparison of different parameterisation concepts, *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, Vol. 117, pp. 179–211, DOI: 10.1007/s10546-005-1445-8.
50. Lüpkes C., Gryanik V. M., A stability-dependent parametrization of transfer coefficients for momentum and heat over polar sea ice to be used in climate models, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, Vol. 120, pp. 552–581, DOI: 10.1002/2014JD022418.
51. Lüpkes C., Gryanik V., Witha B., Gryschka M., Raasch S., Gollnik T. (2008a), Modeling convection over arctic leads with LES and a non-eddyresolving microscale model, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, Art. No. C09028, DOI: 10.1029/2007JC004099.
52. Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U. (2008b), Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35(3), Art. No. L03805, DOI: 10.1029/2007GL032461.
53. Lüpkes C., Gryanik V. M., Hartmann J., Andreas E. L., A parametrization, based on sea ice morphology, of the neutral atmospheric drag coefficients for weather prediction and climate models, *J. Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, Art. No. D13112, DOI: 10.1029/2012JD017630.

54. Mahoney A., Eicken H., Shapiro L., Gens R., Heinrichs T., Meyer F., Gaylord A., *Mapping and Characterization of Recurring Spring Leads and Landfast Ice in the Beaufort and Chukchi Seas: Final Report*, Ocs Study Boem 2012-067, Fairbanks, AK, USA: Univ. Fairbanks, 2012.
55. Malinka A., Zege E., Istomina L. Heygster G., Spreen G., Perovich D., Reflective properties of melt ponds on sea ice, *The Cryosphere*, 2018, Vol. 12, No. 6, pp. 1921–1937, DOI: 10.5194/tc-12-1921-2018.
56. Marcq S., Weiss J., Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere, *The Cryosphere*, 2012, Vol. 6, pp. 143–156, DOI: 10.5194/tc-6-143-2012.
57. Maykut G.A., Energy exchange over young sea ice in the central Arctic, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1978, Vol. 83, pp. 3646–3658, DOI: 10.1029/JC083iC07p03646.
58. Maykut G.A., Large-scale heat exchange and ice production, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1982, Vol. 87, pp. 7971–7984, DOI: 10.1029/JC087iC10p07971.
59. Melling H., Detection of features in first-year pack ice by synthetic aperture radar (SAR), *Intern. J. Remote Sensing*, 1998, Vol. 19, No. 6, pp. 1223–1249, DOI: 10.1080/014311698215702.
60. Michaelis J., Lüpkes C., Zhou X., Gryschka M., Gryanik V.M., Influence of lead width on the turbulent flow over sea ice leads: modeling and parametrization, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, Vol. 125(15), Art. No. e2019JD031996, DOI: 10.1029/2019JD031996.
61. Molod A., Salmun H., Waugh D.W., A new look at modeling surface heterogeneity: extending its influence in the vertical, *J. Hydrometeorology*, 2003, Vol. 4, pp. 810–825, DOI: 10.1175/1525-7541(2003)004<0810:ANLAMS>2.0.CO;2.
62. Muench R.D., Jezek K., Kantha L., Introduction: Third marginal ice zone research collection, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1991, Vol. 96, Issue C3, pp. 4529–4530, DOI: 10.1029/90JC02327.
63. Murashkin D., Spreen G., Huntemann M., Dierking W., Method for detection of leads from Sentinel-1 SAR images, *Annals of Glaciology*, 2018, Vol. 59, pp. 124–136, DOI: 10.1017/aog.2018.6.
64. Nghiem S.V., Rigor I.G., Perovich D.K., Clemente-Colón P., Weatherly J.W., Neumann G., Rapid reduction of Arctic perennial sea ice, *Geophysical Research Letters*, 2007, Vol. 34, pp. 1–6, DOI: 10.1029/2007GL031138.
65. Nolin A.W., Mar E., Arctic sea ice surface roughness estimated from multi-angular reflectance satellite imagery, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(1), Art. No. 50, DOI: 10.3390/rs11010050.
66. Nolin A.W., Fetterer F.M., Scambos T.A., Surface roughness characterizations of sea ice and ice sheets: Case studies with MISR data, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, pp. 1605–1615, DOI: 10.1109/TGRS.2002.801581.
67. Onana V., Kurtz N.T., Farrell S.L., Koenig L.S., Studinger M., Harbeck J.P., A sea-ice lead detection algorithm for use with high-resolution airborne visible imagery, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 2013, Vol. 51, pp. 38–56, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2202666.
68. Overland J.E., Atmospheric boundary layer structure and drag coefficients over sea ice, *J. Geophysical Research*, 1985, Vol. 90, pp. 9029–9049, DOI: 10.1029/JC090iC05p09029.
69. Perovich D.K., Jones K.F., Light B., Eicken H., Markus T., Stroeve J., Lindsay R., Solar partitioning in a changing Arctic sea-ice cover, *Annals of Glaciology*, 2011, Vol. 52(57), pp. 192–196, DOI: 10.3189/172756411795931543.
70. Peterson I.K., Prinsenberg S.J., Holladay J.S., Observations of sea ice thickness, surface roughness and ice motion in Amundsen Gulf, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2008, Vol. 113, pp. 1–14, DOI: 10.1029/2007JC004456.
71. Pielke R.A., Zeng X., Lee T.J., Dalu G., Mesoscale fluxes over heterogeneous flat landscapes for use in larger scale models, *J. Hydrology*, 1997, Vol. 190, pp. 317–336, DOI: 10.1016/S0022-1694(96)03132-0.
72. Polyakov I.V., Alexeev V.A., Ashik I.M., Bacon S., Beszczynska-Möller A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fortier L., Gascard J.-C., Hansen E., Hölemann J., Ivanov V.V., Kikuchi T., Kirillov S., Lenn Y.-D., McLaughlin F.A., Piechura J., Repina I., Timokhov L.A., Walczowski W., Woodgate R., Fate of early 2000s arctic warm water pulse, *Bull. American Meteorological Society*, 2011, Vol. 92, No. 5, pp. 561–566, DOI: 10.1175/2010BAMS2921.1.
73. Remund Q.P., Long D.G., A decade of QuikSCAT scatterometer sea ice extent data, *IEEE Trans. Geosciences Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, pp. 4281–4290, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2281056.
74. Renfrew I.A., Elvidge A.D., Edwards J.M., Atmospheric sensitivity to marginal-ice-zone drag: Local and global responses, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2019, Vol. 145, No. 720, pp. 1165–1179, DOI: 10.1002/qj.3486.
75. Roeckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Giorgetta M., Hagemann S., Kornbluh L., Schlese U., Schulzweida U., Kirchner I., Manzini E., Rhodin A., Tompkins A., *The atmospheric general circulation model ECHAM5. Pt. 1. Model description, Rep. No. 349*, Hamburg, Germany: Max Planck Inst. Meteorology, 2003, 140 p.
76. Röhrs J., Kaleschke L., An algorithm to detect sea ice leads by using AMSR-E passive microwave imagery, *The Cryosphere*, 2012, Vol. 6, pp. 343–352, DOI: 10.5194/tc-6-343-2012.

77. Röhrs J., Kaleschke L., Bröhan D., Siligam P. K., Corrigendum to “An algorithm to detect sea ice leads by using amsr-e passive microwave imagery, *The Cryosphere*, 2012, Vol. 6, Art. No. 365, DOI: 10.5194/tc-6-365-2012.
78. Rösel A., Kaleschke L., Exceptional melt pond occurrence in the years 2007 and 2011 on the Arctic sea ice revealed from MODIS satellite data, *J. Geophysical Research*, 2012, Vol. 117, Art. No. C05018, DOI: 10.1029/2011JC007869.
79. Rothrock D. A., Thorndike A. S., Geometric properties of the underside of sea ice, *J. Geophysical Research*, 2018, Vol. 85, pp. 3955–3963, DOI: 10.1029/JC085iC07p03955.
80. Shepherd A., Ivins E. R., Geruo A., Barletta V. R., Bentley M. J., Bettadpur S., Briggs K. H., Bromwich D. H., Forsberg R., Galin N. et al., A reconciled estimate of ice-sheet mass balance, *Science*, 2012, Vol. 338, pp. 1183–1189, DOI: 10.1126/science.1228102.
81. Smeets C. J. P. P., van den Broeke M. R., The parameterisation of scalar transfer over rough ice, *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, Vol. 128, pp. 339–355, DOI: 10.1007/s10546-008-9292-z.
82. Smeets C., Duynkerke P., Vugts H., Observed wind profiles and turbulence fluxes over an ice surface with changing surface roughness, *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, Vol. 92, pp. 99–121, DOI: 10.1023/A:1001899015849.
83. Stirling I., The importance of polynyas, ice edges, and leads to marine mammals and birds, *J. Marine Systems*, 1997, Vol. 10, pp. 9–21, DOI: 10.1016/S0924-7963(96)00054-1.
84. Stopa J. E., Arduin F., Thomson J., Smith M. M., Kohout A., Doble M., Wadhams P., Wave attenuation through an Arctic marginal ice zone on 12 October 2015: 1. Measurement of wave spectra and ice features from Sentinel-1A, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2018, Vol. 123, No. 5, pp. 3619–3634, DOI: 10.1029/2018JC013791.
85. Sturm M., Winter snow cover on the sea ice of the Arctic Ocean at the Surface Heat Budget of the Arctic Ocean (SHEBA): Temporal evolution and spatial variability, *J. Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, pp. 8047–8064, DOI: 10.1029/2000JC000400.
86. Tikhonov V. V., Repina I. A., Raev M. D., Sharkov E. A., Ivanov V. V., Boyarskii D. A., Alexeeva T. A., Komarova N. Yu., A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data, *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 56, No. 8, pp. 1578–589.
87. Timmermann R., Danilov S., Schröter J., Böning C., Sidorenko D., Rollenhagen K., Ocean circulation and sea ice distribution in a finite element global sea ice–ocean model, *Ocean Modelling*, 2009, Vol. 27, pp. 114–129, DOI: 10.1016/j.ocemod.2008.10.009.
88. Tschudi M. A., Maslanik J. A., Perovich D. K., Derivation of melt pond coverage on arctic sea ice using MODIS observation, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 2605–2614, DOI: 10.1016/j.rse.2007.12.009.
89. Tucker W. B., Perovich D. K., Gow A. J., Weeks W. F., Drinkwater M. R., Physical properties of sea ice relevant to remote sensing, *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*, 1992, Vol. 68, pp. 9–28.
90. Weiss A. I., King J., Lachlan-Cope T., Ladkin R., On the effective aerodynamic and scalar roughness length of Weddell Sea ice, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, Vol. 116, pp. 1–9, DOI: 10.1029/2011JD015949.
91. Wernecke A., Kaleschke L., Lead detection in Arctic sea ice from CryoSat-2: Quality assessment, lead area fraction and width distribution, *The Cryosphere*, 2015, Vol. 9, pp. 1955–1968, DOI: 10.5194/tc-9-1955-2015.
92. Willmes S., Heinemann G., Sea-ice wintertime lead frequencies and regional characteristics in the Arctic, 2003–2015, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8(1), Art. No. 4, DOI: 10.3390/rs8010004
93. Yackel J. J., Barber D. G., Melt ponds on sea ice in the Canadian Archipelago, 2: on the use of Radarsat-1 synthetic aperture radar for geophysical inversion, *J. Geophysical Research*, 2000, Vol. 105(C9), pp. 22061–22069, DOI: 10.1029/2000JC900076
94. Zakharova E. A., Fleury S., Guerreiro K., Willmes S., Remy F., Kouraev A. V., Heinemann G., Sea ice leads detection using Saral/AltiKa altimeter, *Marine Geodesy*, 2015, Vol. 38, pp. 522–533, DOI: 10.1080/01490419.2015.1019655.
95. Zhang J., Rothrock D. A., Modeling global sea ice with a thickness and enthalpy distribution model in generalized curvilinear coordinates, *Monthly Weather Review*, 2003, Vol. 131, pp. 845–861, DOI: 10.1175/1520-0493(2003)131<0845:MGSIIWA>2.0.CO;2.
96. Zippel S., Thomson J., Air-sea interactions in the marginal ice zone, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2016, Vol. 4(1), Art. No. 000095, DOI: 10.12952/journal.elementa.000095.