

РАЗРЫВЫ В АРКТИЧЕСКОМ ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ: ОТ НАБЛЮДЕНИЙ К ПРОГНОЗАМ

© 2024 г. А. А. Ершова^{1*}, Л. Н. Дымент¹, Т. А. Алексеева¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

* e-mail: aaershova@aari.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 31.03.2024 г.

Ключевые слова: нарушения сплошности льда, деформация ледяного покрова, спутниковые снимки, автоматическое дешифрирование разрывов, навигация во льдах, Северный Ледовитый океан

В работе приводится обзор процесса накопления данных о разрывах в арктическом морском ледяном покрове и развития представлений о причинах их образования. Описаны современные способы получения информации о разрывах со спутниковых снимков и проблемы идентификации разрывов на них. Рассмотрены области применения данных о разрывах. Приводимые сведения основаны на результатах исследований отечественных и зарубежных авторов.

DOI: 10.31857/S2076673424010086

ВВЕДЕНИЕ

Морской ледяной покров Северного Ледовитого океана (далее — СЛО) неоднороден. Одной из характерных его составляющих являются нарушения сплошности льда (далее — НСЛ) — относительно узкие протяжённые пространства чистой воды в виде трещин, каналов или разводий (рис. 1). Образовавшиеся НСЛ довольно быстро покрываются начальными и молодыми формами льда.



Рис. 1. Разрыв в ледяном покрове Гренландского моря, 2007 г. Фото Т. А. Алексеевой.

Fig. 1. Sea ice lead in the Greenland Sea, 2007. Photo by T. A. Alekseeva.

Начало употребления термина «нарушения сплошности льда» относится к первой половине 70-х годов прошлого века (Купецкий, 1974). В дальнейшем трещины, каналы и разводья, возникающие в сплочённом дрейфующем льду в холодное время года в арктических морях и в течение всего года в Арктическом бассейне, стали называть разрывами (Горбунов и др., 1986). Благодаря линейной форме разрывов в некоторых источниках они обозначаются как линеаменты нарушений сплошности ледяного покрова по аналогии с линеаменами земной коры (Лосев, Горбунов, 1998).

Изучение этого природного феномена представляет интерес как с научной, так и с практической точек зрения. Климатические изменения в Арктике обуславливают повышенный интерес к мониторингу состояния морского льда. Для усовершенствования глобальных и региональных климатических моделей и описания процессов взаимодействия между океаном и атмосферой в высоких широтах требуется учёт всех составляющих элементов ледяного покрова, в том числе НСЛ.

Практическая востребованность исследования разрывов в арктических морях в настоящее время связана с национальными целями России в арктической зоне, которые предусматривают значительное увеличение объёма грузооборота в акватории Северного морского пути (далее — СМП). Наличие ледяного покрова делает СМП одной из самых сложных в навигационном отношении морских транспортных артерий. Между тем разрывы представляют собой

естественные пути более лёгкого плавания во льдах, и их использование может повысить эффективность и безопасность судоходства в Арктике.

Несмотря на высокую актуальность всестороннего исследования НСЛ, на текущий момент отсутствуют публикации, которые представляли бы как «вертикальное» обобщение информации о разрывах, подразумевающее историю развития знаний о данном природном феномене, так и «горизонтальное», суммирующее современные публикации в отечественных и зарубежных источниках. В большинстве случаев в опубликованных работах НСЛ представлены только в каком-то одном аспекте. В настоящей работе впервые обобщены имеющиеся в открытом доступе сведения о разрывах в арктическом морском ледяном покрове. Уделено внимание истории накопления информации о разрывах от материалов единичных наблюдений во время ледовых авиаразведок до создания электронных архивов многолетних данных, которые становятся основой современных способов оценки и прогнозирования ледовых условий. Рассматривается развитие представлений о причинах образования и изменения характеристик НСЛ во времени и пространстве. Приводится описание современных методов получения исходных данных. На основе результатов исследований отечественных и зарубежных авторов рассмотрены основные области применения имеющейся информации о разрывах.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА РАЗРЫВАМИ

Наличие НСЛ в арктических морях в зимний период было обнаружено в 40-е годы XX века во время ледовых авиационных разведок. В 1950-е годы существование разрывов также подтверждалось инструментальными измерениями с использованием радиолокаторов. Начиная с 1955 г. во время ледовых авиаразведок в зимний период стали проводиться специальные наблюдения за трещинами и каналами. В их состав входило фиксирование места пересечения маршрута полёта с разрывом, приближённое определение ориентации разрыва относительно курса самолёта, оценка ширины наиболее крупных пересекаемых каналов и разводий. Результаты наблюдений наносились на ледовые карты. На основе расстояний между разрывами была создана шкала для оценки раздробленности льда (Шильников, 1973). По материалам ледовых авиаразведок были также выявлены особенности образования и формы трещин и каналов в районах активного плавания в зимний период в Карском море (Комов, Купецкий, 1975).

Применение аэрофотосъёмки и боковой радиолокационной съёмки ледового покрова с самолёта способствовало увеличению полученных сведений о разрывах. Серия повторных аэрофотосъёмок,

выполненных на полигонах в Арктическом бассейне с интервалами около 10 суток в апреле 1969 г., показала, что при значительном изменении направления ветра ориентация разрывов в зоне наблюдений также изменяется. Сформировавшиеся ранее разрывы закрываются, вместо них появляются разрывы с новой ориентацией (Бородачев, 1974). По материалам этих съёмок удалось установить, что наряду с отдельными единичными трещинами и каналами встречаются их совокупности, в которых разрывы сосредоточены в сравнительно узких протяжённых зонах и не имеют чётко выраженной преобладающей ориентации.

Аэрофотосъёмка была источником данных и для статистического описания геометрии каналов и разводий. Полученные по данным аэрофотосъёмки характеристики разрывов в море Бофорта использовались, в частности, при создании моделей динамики ледяного покрова в рамках международной программы по изучению динамики арктического льда AIDJEX (Arctic Ice Dynamics Joint Experiment) в 1970-е годы (Coon et al., 1974).

В 1970-е годы информацию о разрывах также получали с судов, подводных лодок и ледовых станций. Для изучения разрывов проводились натурные эксперименты на полигонах как отечественными (например, Волков и др., 1971), так и зарубежными учёными (Хиблер и др., 1974). Удалось выявить связь образования разрывов с изменением анемобарических условий, приводящим к положительным значениям дивергенции скорости дрейфа льда.

По материалам радиолокационной съёмки в ноябре 1979 г. на полигоне в море Лаптевых рассчитаны статистические характеристики разрывов, обобщённые по однородным мезомасштабным зонам, площадь которых составляла 1500–3000 км² (Бресткин и др., 1988). Был подтверждён факт изменения ориентации разрывов при существенном изменении направления ветровых потоков.

С помощью радиолокационной станции с синтезированной апертурой осенью 1984 г. были получены достоверные оценки плотности в пространстве, форме и ориентации разрывов в море Бофорта (Lyden, Shuchman, 1987). Во время экспериментов исследовательской программы SHEBA (Surface Heat Budget of the Arctic Ocean) по изучению теплового баланса СЛО по материалам съёмок микроволновым радиометром с борта самолёта в мае 1998 г. была получена информация о ширине и ориентации разрывов в Чукотском море и море Бофорта (Tschudi et al., 2002).

ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ РАЗРЫВОВ

С появлением информации о существовании в ледяном покрове СЛО в зимне-весенний период протяжённых разрывов и их упорядоченных систем возник вопрос о природе их происхождения. В одной из первых публикаций на эту тему (Купецкий,

1973) приводится гипотеза, согласно которой образование систем разломов в ледяном покрове обусловлено ротационными силами Земли. Авторы (Marko, Thomson, 1975) связывают механизм образования трещин и каналов с воздействием на морской ледяной покров топографических волн Россби. В работе (Назирова, 1982) причиной появления периодически открывающихся и закрывающихся разрывов названы долгопериодные приливные волны.

В настоящее время можно считать общепризнанным, что причиной возникновения разрывов в морском ледяном покрове в зимний период является пространственная неравномерность скорости дрейфа льда (Coon, Evans, 1977; Горбунов и др., 1986; Richter-Menge et al., 2002), которая вызывает мезо- и макродеформации ледяного покрова. Деформация растяжения приводит к образованию разрывов, а деформация сжатия — к закрытию разрывов и образованию торосов. Основной причиной возникновения неравномерности поля скорости дрейфа льда служит изменчивость скорости и направления ветровых потоков (Maslanik, Barry, 1989). Кроме этого, на структуру полей скорости дрейфа льда оказывают воздействие расположение суши, особенности рельефа дна, наличие подводных течений, приливно-отливные явления, наклон уровня моря, а также характеристики самого ледяного покрова, такие как толщина и торосистость.

СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ РАЗРЫВОВ

Натурные данные о разрывах получены на отдельных полигонах посредством аэрофотосъёмки или съёмки радиолокатором бокового обзора. Появление в 1980-х годах изображений ледяного покрова, передаваемых с искусственных спутников Земли (далее — ИСЗ), предоставило новые возможности для исследования разрывов. В настоящее время спутниковые данные являются основным источником информации о НСЛ.

Характерная линейная форма разрывов позволяет легко опознавать их на спутниковых снимках, а резкий контраст между физическими свойствами разрывов и окружающего льда служит основой их дешифрирования по спутниковым данным. Покрытие снимками ИСЗ значительных акваторий СЛО и регулярность их поступления расширили представление о разрывах. В частности, было установлено существование крупномасштабных систем разрывов, в которых их ориентация определённым образом упорядочена. Такие системы охватывают целые моря и обширные районы Арктического бассейна (Карелин, 1998).

В открытых районах арктических морей и Арктического бассейна чаще всего отмечаются

квазипараллельная и полигональная системы НСЛ. Первой системе присуще одно преобладающее направление, так как разрывы близки к прямолинейным и почти параллельны между собой. Полигональная система состоит из пересекающихся разрывов и характеризуется двумя преобладающими направлениями, которые в большинстве случаев различаются на $40\text{--}80^\circ$. У выступающих в море мысов и у островов происходит формирование радиально изогнутой системы разрывов. На подходах к проливам при дрейфе льда, направленном в их сторону, возникают системы дугообразных разрывов, обращённых выпуклостью навстречу дрейфу (арочная система разрывов) (Горбунов и др., 1986). Примеры систем разрывов в морском ледяном покрове представлены на рис. 2.

Появление данных о разрывах, полученных со снимков ИСЗ, позволило рассчитать целый ряд их пространственных характеристик. Так, была определена общая площадь разрывов на акватории СЛО. По оценкам разных авторов, зимой она составляет $1\text{--}3\%$ от площади ледяного покрова в Арктическом бассейне и $5\text{--}12\%$ от площади льда в арктических морях (Lindsay, Rothrock, 1995; Li et al., 2022 и др.). Расхождения в получаемых значениях площади разрывов связаны с тем, что исследователи используют для анализа разные типы исходных спутниковых данных.

В настоящее время информация о разрывах может быть получена по снимкам видимого и инфракрасного (далее — ИК) диапазонов, пассивного микроволнового излучения, а также по радиолокационным данным. Выбор типа приборов дистанционного зондирования зависит от целей и задач конкретного исследования. Для мониторинга ледовой обстановки чаще всего используются снимки оптического диапазона, представленного данными видимого и ИК-спектра. На спутниковых снимках видимого диапазона разрывы отображаются более тёмными линиями на светлом фоне поверхности льда. Снимки видимого спектра излучения могут быть как низкого, так и высокого пространственного разрешения, однако необходимо наличие солнечного освещения и отсутствие плотной облачности. Снимки ИСЗ высокого разрешения применяются для верификации данных о разрывах, полученных с помощью других источников информации. Например, снимки оптического диапазона ИСЗ Landsat-8 с разрешением 30 м были использованы для оценки точности определения разрывов по данным альтиметра AlTiKa (Zakharova et al., 2015).

Дешифрирование разрывов на снимках теплового ИК-диапазона основано на разнице температур холодного ледяного покрова и относительно тёплой воды. Как и у снимков видимого диапазона, у ИК-снимков имеются ограничения, связанные с присутствием облачности. Кроме

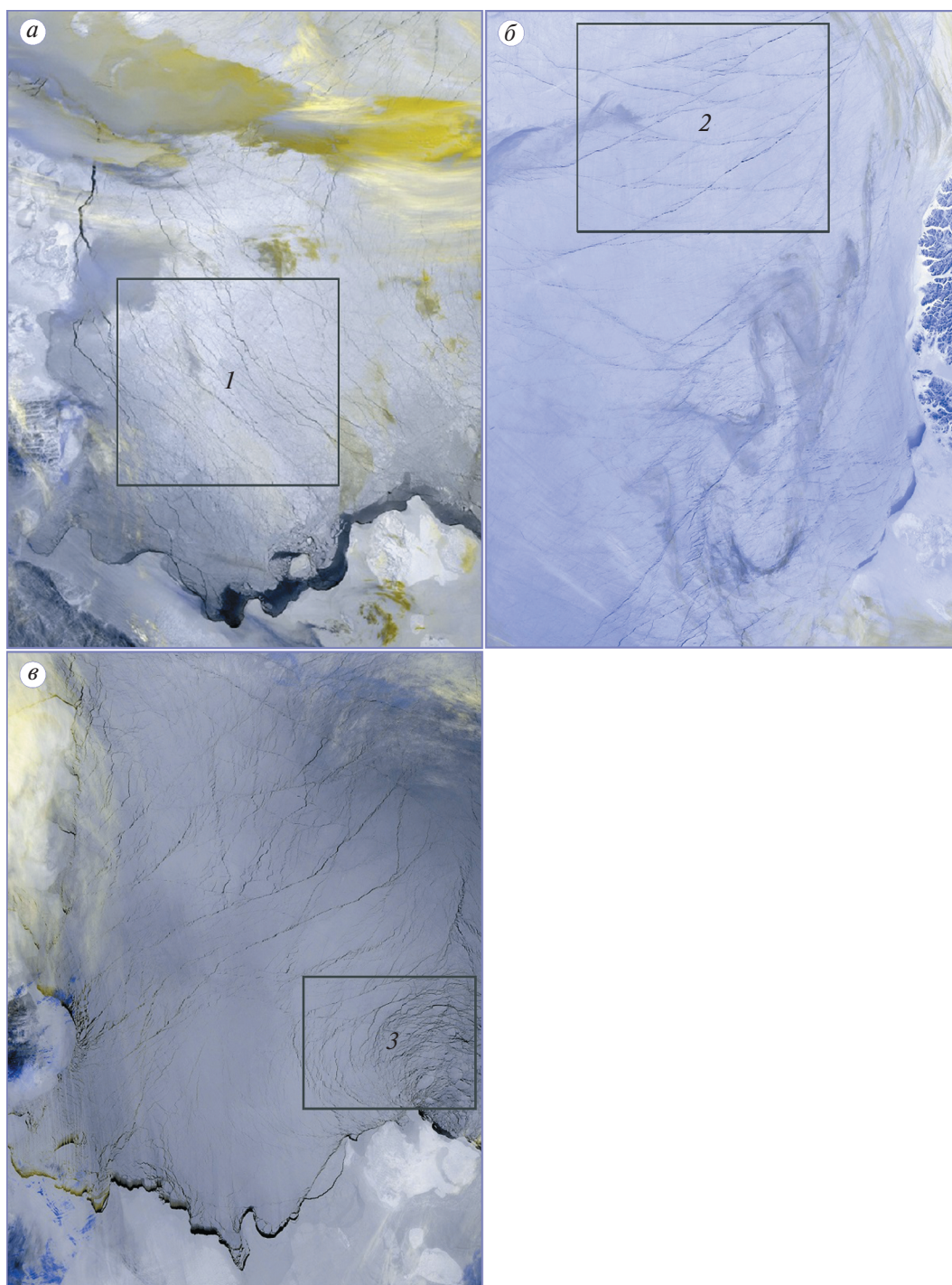


Рис. 2. Системы разрывов в ледяном покрове на спутниковых снимках VIIRS ИСЗ SuomiNPP ИК-диапазона (11 мкм): *a* — море Лаптевых, 14.04.2023; *б* — море Бофорта, 04.04.2023; *в* — море Лаптевых, 05.01.2022; *1* — квазипараллельная система разрывов; *2* — полигональная система разрывов; *3* — радиально-изогнутая система разрывов.

Fig. 2. Systems of sea ice leads in the satellite images VIIRS Suomi NPP in infrared range (11 μm): *a* — Laptev Sea, April 14, 2023; *b* — Beaufort Sea, April 4, 2023; *c* — Laptev Sea, January 5, 2022; *1* — quasiparallel system of leads; *2* — polygonal system of leads; *3* — radial-type system of leads.

того, возможность их использования появляется только при наличии большого температурного контраста, т.е. в холодный сезон (Lindsay, Rothrock, 1995). Учитывая отсутствие снимков в видимом диапазоне во время полярной ночи, широкое применение в зимний период получают снимки ИК-диапазона.

Возможность использования тепловых ИК-снимков для получения данных о разрывах была впервые показана на примере спутниковой информации радиометра AVHRR ИСЗ NOAA (Key et al., 1993). Авторы (Lindsay, Rothrock, 1995) использовали данные AVHRR за зимние месяцы 1989 года, чтобы определить долю общей площади разрывов относительно площади всего ледяного покрова, а также среднюю ширину идентифицируемых разрывов и их среднюю ориентацию для некоторых районов по квадратам 200×200 км. Разрешение прибора позволяло учитывать только разрывы шире 1 км.

Снимки теплового ИК-диапазона ИСЗ серии NOAA низкого разрешения послужили исходными данными для созданного в ААНИИ электронного архива данных о разрывах в СЛО. Пополнение этого архива, начатое ещё в 1993 г., продолжалось вплоть до 2017 г. В электронный архив заносились данные о разрывах шириной от 500 м, оцифрованные со снимков ИСЗ при помощи дигитайзера. По данным электронного архива были рассчитаны средние многолетние характеристики ориентации и протяжённости разрывов в ледяном покрове Карского и северо-восточной части Баренцева морей (Горбунов и др., 2014), Арктического бассейна в целом (Лосев и др., 2002) и его приатлантической части (Лосев и др., 2017; Дымент и др., 2020). Данные о разрывах в приатлантической части Арктического бассейна за зимние месяцы 2005–2017 гг., полученные по материалам ИК-снимков ИСЗ NOAA, позволили выявить локальные зоны повышенной плотности разрывов в районах материкового склона (Дымент, Лосев, 2020). Авторы связывают их образование с деформациями ледяного покрова под действием приливной волны, усиливающейся в зоне с наибольшим градиентом глубины моря.

Спутниковые данные теплового ИК-диапазона MODIS послужили источниками данных о разрывах для ряда работ. Были построены ежедневные карты разрывов с пространственным разрешением 1 км за зимние месяцы (январь — апрель) 2003–2015 гг., а также обобщённые месячные и сезонные карты присутствия разрывов в Арктике за этот период (Willmes, Heinemann, 2016). Позднее этот архив ежедневных карт разрывов был продлён до 2019 г. (Reiser et al., 2020). Аналогичная информация со сканирующего радиометра видимого и теплового диапазонов VIIRS ИСЗ SuomiNPP с разрешением 375 м за ледовые сезоны 2002–2022 гг.

использовалась для изучения межгодовой изменчивости пространственных характеристик разрывов (Hoffman et al., 2022).

Преимущество снимков оптического диапазона — сочетание широкой полосы обзора, размер которой сравним с размерами арктических морей (2000–3000 км в зависимости от спутника), и пространственного разрешения, достаточного для дешифрирования крупных и большей части средних разрывов. Необходимо отметить, что пространственное разрешение прибора является не единственным фактором, определяющим минимальную ширину разрывов, которые возможно идентифицировать на спутниковом снимке. При большом контрасте между отображаемыми свойствами свободной ото льда воды и ледяного покрова могут учитываться НСЛ с шириной менее разрешающей способности снимка. Так, в работе (Stone, Key, 1993) показано, что при разрешающей способности прибора 1 км в зависимости от оптических свойств атмосферы и устанавливаемого порога контрастности минимальная ширина разрывов, распознаваемых на снимках ИСЗ видимого диапазона, может составлять от 400 до 750 м.

Пассивное микроволновое дистанционное зондирование, в отличие от оптической спутниковой информации, лишено ограничений, связанных с присутствием облачности, однако такие данные имеют низкое пространственное разрешение: пространственное разрешение радиометра AMSR2 ИСЗ GCOM-M1 составляет 5 км, его предшественника AMSR-E ИСЗ NOAA — 6.25 км. Микроволновое дистанционное зондирование может быть использовано для распознавания разрывов только в зимний период, так как в летние месяцы таяние льда и образование снежниц изменяют отражающие свойства поверхности ледяного покрова и затрудняют дешифрирование. Несмотря на низкое разрешение, которое позволяет распознавать лишь НСЛ шириной более 3 км, получение сведений о разрывах этим способом обосновано их регулярным поступлением с 2002 г.

Данные о разрывах, полученные при помощи пассивного микроволнового спутникового зондирования AMSR-E, были использованы в работе (Röhrs, Kaleschke, 2012) для составления ежедневных карт распространения разрывов на акватории всего Арктического бассейна за холодные месяцы с ноября по апрель 2002–2011 гг. По этим же данным авторы (Bröhan, Kaleschke, 2014) определили такие климатические характеристики разрывов, как плотность в пространстве и ориентация по всему Арктическому бассейну в зимние периоды 2002–2012 гг. Микроволновые данные AMSR2 позволили продлить этот ряд наблюдений до 2020 г. (Li et al., 2022). Однако сравнение результатов дешифрирования спутниковых снимков микроволнового и оптического диапазонов показывает, что

количество разрывов, идентифицированных по микроволновому спутниковому снимку AMSR-E или AMSR2, составляет лишь 50% от количества распознанных разрывов на ИК-снимке MODIS с пространственным разрешением 1000 м за ту же дату при благоприятных атмосферных условиях (Röhrs, Kaleschke, 2012; Li et al., 2022).

Длительное отсутствие солнечного освещения и частое наличие облачности в Арктике создают предпосылки к использованию для мониторинга арктических морских льдов технологий радиолокационного зондирования, к которым в том числе относятся радиолокационные альтиметры и радиолокаторы с синтезированной апертурой (далее — PCA).

Определение разрывов по данным альтиметрии возможно благодаря превышению уровня поверхности морского льда над уровнем моря в разрыве. Среди преимуществ использования радиолокационной альтиметрии — более высокое пространственное разрешение вдоль траектории полёта спутника по сравнению с оптическими данными, которое позволяет обнаруживать разрывы шириной от 200 м (Zakharova et al., 2015).

Применение спутниковых PCA сделало возможным получение детальной ледовой информации. Снимки с пространственным разрешением от нескольких метров предоставляют подробную картину разрывов на небольшой площади, однако ширина полосы обзора радиолокаторов недостаточна для покрытия всей акватории моря. Кроме того, получаемые данные носят нерегулярный характер и, соответственно, не дают возможности получить статистические характеристики разрывов на значительной по площади акватории в интересующий период времени.

В работе (Hutter et al., 2019) в качестве входных данных для алгоритма построения линейных объектов морского ледяного покрова, таких как разрывы и гряды торосов, используются данные дрейфа и деформации льда RGPS (RADARSAT Geophysical Processing System), получаемых посредством обработки данных PCA канадского спутника RADARSAT. Создана база данных таких линейных объектов, которые именуются авторами линейными кинематическими элементами (Linear Kinematic Features), с временной дискретностью 3 суток в регулярной сетке 12.5 км за зимние месяцы с ноября по апрель 1996–2008 гг. Кроме того, авторы определяли перемещение отдельных линейных объектов путём сравнения последовательных снимков с периодичностью 3 суток. На основании количества определённых повторно линейных объектов был сделан вывод о том, что около 70–80% НСЛ существуют менее 3 суток. Полученные данные о разрывах применялись для совершенствования моделей деформации ледяного покрова (Hutter, Losch, 2020).

В работе коллектива авторов (von Albedyll et al., 2023) разрывы также определялись по данным дивергенции дрейфа льда вдоль маршрута следования научно-исследовательского судна Polarstern. Дрейф рассчитывался по последовательным снимкам PCA ИСЗ Sentinel-1 с пространственным разрешением 50 м с интервалом 1–3 дня. Особое внимание в работе уделено пространственной и временной деформации разрывов. Авторы сравнивают разрывы, определённые по рассчитанной дивергенции, и разрывы, дешифрованные непосредственно по снимкам PCA, для одних и тех же районов. Выявлены ошибки дешифрирования снимков, обусловленные изменением отражательных свойств поверхности: пропуск разрыва и идентификация его как тороса. Такие ситуации иногда возникают в процессе ледообразования или при наличии в разрыве большого количества обломков разрушенного льда. В этих случаях предпочтительнее определять разрывы по данным дивергенции.

Таким образом, с началом поступления данных о разрывах с ИСЗ появилась возможность определения пространственной и временной изменчивости характеристик НСЛ как по всему СЛО, так и по его отдельным районам. Были выявлены виды систем разрывов, оценена доля площади разрывов от общей площади арктического ледяного покрова. Спутниковые наблюдения подтвердили выводы о связи образования разрывов с изменением направления и скорости дрейфа льда, сделанные ранее на основании визуальных ледовых наблюдений и специализированных экспериментов. Сложности при дешифрировании НСЛ на снимках ИСЗ возникают при интерпретации разрывов в период ледообразования и таяния.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РАЗРЫВОВ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

Визуальный анализ спутниковых снимков — наиболее широко используемый метод распознавания на них разрывов. Однако объём поступающей информации постоянно увеличивается, что затрудняет экспертное дешифрирование, требующее значительных трудовых и временных затрат. В связи с этим возникает запрос на автоматизированное и автоматическое распознавание разрывов по спутниковым снимкам разных диапазонов.

Алгоритмы, позволяющие автоматизировать интерпретацию спутниковых изображений, способствовали развитию спутниковых методов наблюдения (Спутниковые методы..., 2011). Автоматическое определение разрывов по снимкам теплового ИК-диапазона проводится методом бинарной сегментации на основе разницы яркостных или поверхностных температур только на областях снимка, свободных от облачности, для чего применяются облачные маски. В работе (Willmes, Heinemann,

2016) представлен разработанный авторами фильтр на основе нечёткой логики для определения артефактов и облаков, не учтённых облачной маской MODIS (MOD/MYD35), которые ошибочно могли быть приняты за разрывы. Построенные итоговые карты разрывов за холодные периоды 2003–2015 гг. представляют собой результат сегментации пикселей по трём категориям (лёд — разрыв — облачность). Эта же методика с улучшенным алгоритмом фильтра определения артефактов была применена в работе (Reiser et al., 2020).

В настоящее время большинство исследователей останавливаются на этапе выделения разрывов на снимках ИСЗ по принципу сегментации пикселей. По полученным таким образом данным можно определить такие характеристики, как плотность разрывов в пространстве и их относительную площадь. Однако гораздо больше информации о разрывах, например об их ориентации, длине и разветвлённости, могло бы быть получено при условии векторизации исходных данных. Среди исследований, направленных на создание алгоритмов представления разрывов в виде векторных объектов, можно выделить ряд работ, определяющих НСЛ по данным деформации ледяного покрова (Hutter et al., 2019), в которых на первом этапе разрывы распознаются как отдельные мелкие сегменты из нескольких пикселей, а затем объединяются по ряду пространственных признаков в единые элементы.

Алгоритм автоматической идентификации разрывов по тепловым ИК-снимкам MODIS с выделением разрывов как линейных объектов представлен в работе (Hoffman et al., 2019). На спутниковых снимках по тепловому контрасту определялись пиксели потенциальных разрывов аналогично (Willmes, Heinemann, 2016), однако далее применялся ряд методов анализа изображения для удаления пространств чистой воды, не являющихся разрывами (полыней), и объединения групп пикселей, имеющих пространственные характеристики разрывов, в протяжённые непрерывные объекты. Каждый из таких определённых ветвящихся объектов разбивался на отдельные линейные ветки, по которым вычислялись характеристики разрывов, такие как площадь, длина, ширина и ориентация.

В последние годы появились проекты, изучающие применение искусственного интеллекта для дешифрирования разрывов на снимках ИСЗ. Авторы (Hoffman et al., 2021) описывают новый алгоритм интерпретации разрывов на ИК-снимках радиометров MODIS и VIIRS на основе нейронных сетей. Для обучения алгоритма использовались спутниковые снимки за 4 дня, оцифрованные вручную. Основным критерием идентификации разрыва было его присутствие на нескольких последовательных снимках в течение одного дня. Повышение точности определения разрывов достигалось

за счёт уменьшения ошибки ложноположительного типа. Алгоритм был применён для обработки данных с пространственным разрешением 1 км с целью сравнения результатов работы алгоритма и результатов обработки аналогичных данных другими методами (Hoffman et al., 2022), однако авторы утверждают, что возможно его применение на исходных данных любого разрешения. Подобные методы с использованием нейросетей вводятся в практику дешифрирования и отечественными исследователями (Смирнов и др., 2022).

Валидация алгоритмов автоматического распознавания разрывов затруднительна из-за отсутствия достоверной базы данных о разрывах. Сравнение массивов данных НСЛ, полученных в результате дешифрирования разными способами, показало, что разница в количестве пикселей, распознанных как разрывы, между двумя такими массивами может составлять 50–60% (Li et al., 2022), соответственно отличаются и оценки геометрических характеристик разрывов. Чаще всего для верификации данных о разрывах используют снимки оптического диапазона высокого разрешения. Сравнение результатов работы алгоритма с разрывами, оцифрованными экспертом вручную, проводится очень редко из-за высокой трудоёмкости процесса дешифрирования.

Таким образом, наиболее перспективными для задач автоматического распознавания разрывов по данным дистанционного зондирования представляются алгоритмы дешифрирования, применяющие технологии искусственного интеллекта. Однако они требуют дальнейшего развития и обучения на большем количестве достоверных данных. В настоящее время идеального алгоритма автоматической интерпретации данных ИСЗ не существует, поэтому наряду с автоматическим продолжает существовать и экспертное дешифрирование разрывов в ледяном покрове.

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ О РАЗРЫВАХ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ НАУКИ

Разрывы, несмотря на небольшую общую площадь, вносят значительный вклад в теплообмен в осенне-зимний период. Особенности теплообмена над полыньями и разрывами учитываются при моделировании взаимодействия между океаном и атмосферой в Арктике. Из-за разницы температур между относительно тёплым океаном и холодной атмосферой турбулентные потоки тепла над поверхностью разрывов могут возрастать в десятки раз в зависимости от температурного градиента вода — воздух, скорости ветра, влажности и других параметров и составлять от нескольких десятков до нескольких сотен Вт/м². Некоторые авторы отмечают нелинейную зависимость величины потока тепла над разрывом от его геометрических

характеристик и связывают это с изменением скорости ветра над разрывами разной ширины (например, Marcq & Weiss, 2012). Для оценки тепловых потоков наряду с инструментальными измерениями (Gultepe et al., 2003) широкое распространение получили численные расчёты по моделям (например, Lüpkes et al., 2008; Chechin et al., 2019).

Потери тепла с поверхности разрывов способствуют интенсивному образованию в них нового льда. Нарастание молодого льда в образовавшихся разрывах и его вытаращивание при их закрытии способствует приросту общей массы льдов. При ледообразовании в результате выделения в воду солей происходит повышение плотности поверхностного слоя воды, что ведёт к возникновению конвективной циркуляции и увеличению интенсивности теплового потока из глубинных слоёв к поверхности океана (Доронин, 1981). Учёт изменения общей площади разрывов в ледяном покрове имеет большее значение в контексте глобальных изменений климата.

В связи с наблюдаемым уменьшением средней толщины арктического ледяного покрова высказывались предположения о возможном увеличении скорости дрейфа льда и, как следствие, увеличении НСЛ (Rampal et al., 2009). Например, в работе (Hoffman et al., 2022) авторы обнаружили небольшую, но статистически значимую тенденцию к увеличению доли общей площади разрывов в ледяном покрове по данным MODIS и VIIRS на 5% за 2002–2022 гг. Однако эти результаты получены по данным ИК-диапазона и потому зависят от площади снимка, свободной от облачности, что затрудняет их сопоставление. Сравнение данных исследования ледяного покрова посредством пассивного микроволнового излучения (AMSR-E и AMSR2) за период 2002–2022 гг., приведённое в работе (Li et al., 2022), не выявило какого-либо значимого тренда изменения общей площади разрывов. Анализ опубликованных данных климатических характеристик НСЛ за разные периоды позволяет говорить о преобладании сезонной изменчивости общей площади разрывов в ледяном покрове над межгодовой изменчивостью, однако влияние климатических изменений в Арктике на образование разрывов пока не подтверждено.

Данные о разрывах могут быть использованы для решения задач мониторинга экосистем СЛО. Присутствие разрывов и трещин в морском ледяном покрове вносит существенный вклад в биологическую продуктивность арктических биосистем (Мельников, 1989). Как стационарные, так и кратковременные пространства открытой воды, возникающие среди льда, способствуют проникновению света и кислорода в поверхностный водный слой, увеличивая концентрацию фито- и зоопланктона, что привлекает рыб, морских млекопитающих и птиц (Stirling, 1997). Специальные

авианаблюдения за белыми медведями (Горбунов и др., 1987) также установили зависимость между степенью разлома ледяного покрова и присутствием животных: более чем в половине случаев белые медведи и их следы наблюдались на разводьях, покрытых молодым льдом.

Крупномасштабные разрывы в ледяном покрове Арктического бассейна могут служить внешним проявлением долгопериодных приливных волн, что предоставляет возможность использовать данные о разрывах для изучения динамики океана (Назирова, 1982). Такое информационное значение разрывов в Арктическом бассейне используется, например, в долгосрочном прогнозировании ледовой обстановки на трассах СМП (Макаров и др., 2021).

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ И ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О РАЗРЫВАХ В НАВИГАЦИИ

Отличительная особенность работ отечественных авторов заключается во внимании к практическому использованию информации о разрывах при гидрометеорологическом обеспечении мореплавания в высоких широтах, что обусловлено географическим положением Российской Федерации и необходимостью решения стратегической задачи круглогодичного транзита судов по трассе СМП.

Практическая значимость разрывов в ледяном покрове арктических морей и Арктического бассейна определяется прежде всего тем, что движение судов по каналам и разрывам способствует более эффективному и безопасному плаванию в сложных ледовых условиях. Для получения информации о НСЛ в таких случаях в основном используются спутниковые снимки. В мае 2006 г. атомный ледокол (далее — а/л) “Ямал” при снятии дрейфующей станции СП-34 большую часть пути двигался по разрывам, местонахождение которых подтверждалось авиаразведкой с базирующегося на палубе судна вертолёт. Переход ледокола от западной окраины Земли Франца-Иосифа до приполюсного района, где находилась дрейфующая станция, занял пять суток, в то время как аналогичный переход а/л “Сибирь” в 1987 г. без применения данных о разрывах занял 10 суток (Горбунов и др., 2008). В истории высокоширотного плавания также известны случаи, когда экспедиционные суда выполняли самостоятельные рейсы без ледокольной проводки, используя протяжённые разрывы. В августе 2005 г. научно-экспедиционное судно (далее — НЭС) “Академик Федоров” стало первым в истории мореплавания транспортным судном, самостоятельно достигшим Северного полюса благодаря благоприятным ледовым условиям и движению по системам попутных разрывов. Маршрут плавания составлялся на основании фактической

и прогностической информации ААНИИ, в том числе оперативных данных о разрывах на пути движения судна (Фролов, Юлин, 2007).

Опыт высокоширотных плаваний и транзитных рейсов в арктических морях показал, что при плавании судов в сплочённом дрейфующем льду одной из важнейших ледовых характеристик является ориентация разрывов относительно генерального курса судна. Наиболее эффективным оказывается использование систем ориентированных НСЛ, преобладающее направление которых совпадает с генеральным курсом движения судна или отличается от него не более чем на 30° (Фролов, 1997). Согласно данным специальных судовых наблюдений, выполненных в высокоширотных экспедициях в летние месяцы (июль — сентябрь), движение по зоне с ориентированными таким образом разрывами повышало скорость автономного плавания ледокола типа “Арктика” в среднем в 1.7 раза, скорость проводки ледоколом транспортного судна — в 1.5 раза, скорость автономного плавания судна типа НЭС “Академик Федоров” — в 2.2 раза (Фролов, 2013).

Приведённые количественные оценки говорят о необходимости принимать во внимание информацию об ориентации разрывов в районе движения судна при планировании морских операций и разработке оптимального маршрута плавания в ледовых условиях. При этом важную роль играет прогнозирование преобладающей ориентации разрывов с разной заблаговременностью.

Методы среднесрочных прогнозов характеристик НСЛ начали разрабатываться в ААНИИ с 1990-х годов (Лосев, Горбунов, 1998; Горбунов и др., 2001). В этих методах учитывается влияние поля атмосферного давления на процесс образования разрывов, так как распределение полей скорости и направления воздушных потоков вызывает изменения дрейфа льда, неравномерность которого приводит к возникновению напряжений в ледяном покрове. Прогноз основывается на методе аналогов, т.е. на предположении о том, что похожие барические ситуации будут вызывать сходные деформации ледяного покрова, которые приведут к возникновению разрывов с близкими значениями их характеристик. На практике среднесрочные прогнозы преобладающей ориентации разрывов в Арктическом бассейне применялись при гидрометеорологическом обеспечении нескольких высокоширотных туристических и экспедиционных рейсов (Горбунов и др., 2008). Доступность ежедневных спутниковых данных и повышение простоты разрешения снимков ИСЗ позволяют усовершенствовать существующие методы прогноза. В настоящее время в ААНИИ на основе метода аналогов разрабатывается метод краткосрочного прогноза преобладающей ориентации

разрывов в море Лаптевых в зимне-весенний период (Дымент и др., 2023).

Увеличение сроков навигации и трафика на трассе СМП ставит запрос на автоматическое определение оптимального маршрута следования судна. На сегодняшний день разработано несколько методов автоматического роутинга судов во льдах (например, May et al., 2020). Однако пока ни один из них не учитывает информацию о существующих разрывах и значения их прогностических характеристик. В настоящее время в ААНИИ ведутся работы по развитию автоматического роутинга судов во льдах путём внедрения в методику учёта прогностической преобладающей ориентации разрывов (Alekseeva et al., 2023).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление тематики современных статей, посвящённых изучению разрывов, и многочисленных работ 1970–90-х годов показывает, что с появлением спутниковых данных внимание международного научного сообщества сосредоточилось в большей степени на изучении статистических характеристик разрывов в ледяном покрове СЛО. Обработка больших массивов спутниковой информации и формирование электронных архивов климатических характеристик разрывов стала возможна благодаря разработке алгоритмов автоматического распознавания разрывов. Однако из-за несовершенства этих алгоритмов и сложности верификации полученных результатов для ряда задач по-прежнему используется экспертное дешифрирование разрывов со снимков ИСЗ. В настоящее время наиболее перспективными считаются работы в направлении использования нейросетевых технологий для автоматической интерпретации НСЛ.

Чаще всего по данным ИСЗ определяются такие характеристики разрывов, как суммарная площадь разрывов и её отношение к площади всего ледяного покрова, средняя и максимальная ширина разрывов, их общая протяжённость. Такая информация востребована для решения задач усовершенствования моделей динамики ледяного покрова, глобальных и региональных моделей климата, моделирования взаимодействия океана и атмосферы в высоких широтах. Однако на получаемые оценки характеристик разрывов оказывает влияние выбор источника исходных данных.

Особенность работ отечественных авторов заключается в повышенном внимании к практическому использованию спутниковых данных о разрывах для гидрометеорологического обеспечения мореплавания в ледовых условиях. Для навигационных целей имеет значение не только наличие широких протяжённых разрывов в районе плавания, но и их ориентация относительно

генерального курса судна. В связи с этим наиболее востребованной характеристикой разрывов становится преобладающая ориентация разрывов. В настоящее время разрабатываются методы краткосрочного прогноза преобладающей ориентации разрывов в арктических морях. Учёт прогностической ориентации разрывов включается в алгоритмы автоматического роутинга судов во льдах, которые в последнее время интенсивно развиваются.

Оперативная и прогностическая информация о разрывах является частью комплексного решения стратегической задачи по обеспечению круглогодичной навигации судов на трассе СМП.

Благодарности. Обзор процесса накопления данных о разрывах в ледяном покрове СЛО (Л. Н. Дымент) и анализ применения данных о разрывах для целей судоходства (Т. А. Алексеева) выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-17-00161.

Acknowledgements. Review of accumulation of data on sea ice leads in the Arctic Ocean (L. N. Dyment) and analysis of the use of data on sea ice leads for navigation (T. A. Alekseeva) were done under financial support of the Russian Science Foundation (grant number 23-17-00161).

ЛИТЕРАТУРА

- Бородачев В. Е. О блоковом строении ледяного покрова // Тр. ААНИИ. 1974. Т. 316. С. 25–27.
- Бресткин С. В., Горбунов Ю. А., Лосев С. М. Анализ нарушений сплошности морского ледяного покрова в зимний период по материалам радиолокационных съемок с самолета // Тр. ААНИИ. 1988. Т. 401. С. 94–103.
- Волков Н. А., Гудкович З. М., Углев В. Д. Результаты изучения неравномерности дрейфа в Арктическом бассейне // Тр. ААНИИ. 1971. Т. 303. С. 76–88.
- Горбунов Ю. А., Беликов С. Е., Шильников В. И. Влияние ледовых условий на распределение и численность белого медведя в морях Советской Арктики // Бюллетень московского общества испытателей природы. Биологический Отдел. 1987. Т. 92. Вып. 5. С. 19–24.
- Горбунов Ю. А., Дымент Л. Н., Лосев С. М. Средние многолетние характеристики крупных нарушений сплошности льда в Карском море и в северо-восточной части Баренцева моря. Справочное пособие. СПб.: Изд. ААНИИ, 2014. 36 с.
- Горбунов Ю. А., Дымент Л. Н., Лосев С. М., Фролов С. В. Среднесрочные прогнозы крупных нарушений сплошности льда при гидрометеорологическом обеспечении // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 78–86.
- Горбунов Ю. А., Карелин И. Д., Лосев С. М. К вопросу о причинах нарушения сплошности морского ледяного покрова в зимнее время // Проблемы Арктики и Антарктики. 1986. Вып. 62. С. 110–116.
- Горбунов Ю. А., Лосев С. М., Дымент Л. Н. Метод диагностики и среднесрочного прогноза разрывов в ледяном покрове Карского моря // Тр. ААНИИ. 2001. Т. 443. С. 91–95.
- Доронин Ю. П. Взаимодействие атмосферы и океана. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 288 с.
- Дымент Л. Н., Ершова А. А., Порубаев В. С. Краткосрочный прогноз модальной ориентации разрывов в море Лаптевых // Тр. RAO/CIS OFFSHORE. 2023. М.: Перо, 2023. С. 181–184.
- Дымент Л. Н., Лосев С. М. Пространственные различия плотности разрывов в ледяном покрове приатлантической части Арктического бассейна // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 567–577. <https://doi.org/10.31857/S2076673420040061>
- Дымент Л. Н., Лосев С. М., Порубаев В. С. Характеристики крупных разрывов в ледяном покрове приатлантической части Арктического бассейна: Справочное пособие. СПб.: ААНИИ, 2020. 28 с.
- Карелин И. Д. Система крупных разрывов в дрейфующих льдах Карского моря в зимний период // Тр. ААНИИ. 1998. Т. 438. С. 51–62.
- Комов Н. И., Купецкий В. Н. О стационарных трещинах и разломах в морском льду // Тр. ААНИИ. 1975. Т. 126. С. 41–47.
- Купецкий В. Н. О криотектонических линеаментах // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 318. С. 160–166.
- Купецкий В. Н. Макроособенности напряжённого состояния ледяного покрова. Тр. ААНИИ. 1974. Т. 316. С. 18–24.
- Лосев С. М., Горбунов Ю. А. Диагностика и среднесрочный прогноз нарушений сплошности морского ледяного покрова // Тр. ААНИИ. 1998. Т. 438. С. 13–25.
- Лосев С. М., Горбунов Ю. А., Дымент Л. Н. Разрывы в ледяном покрове арктического бассейна по спутниковым данным // Проблемы Арктики и Антарктики. 2002. Вып. 73. С. 36–52.
- Лосев С. М., Дымент Л. Н., Миронов Е. У. Протяжённость крупных разрывов в дрейфующем льду приатлантической части Арктического бассейна по данным снимков ИСЗ NOAA // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 543–552. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-543-552>
- Макаров Е. И., Саперштейн Е. Б., Фролов С. В., Федяков В. Е. Разработка сценариев для тактического планирования транзитных рейсов газозовов в ледовых условиях в акватории СМП // Труды RAO/CIS OFFSHORE. 2021. М.: Перо, 2021. С. 181–187.
- Мельников И. А. Экосистема арктического морского льда. М.: Наука, 1989. 191 с.
- Назирова М. Льды и взвеси как гидротермодинамические трассеры по данным космических многозональных съемок. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 161 с.

- Смирнов В. Г., Бычкова И. А., Захваткина Н. Ю. Разработка методов оперативной оценки нарушений сплошности ледяного покрова с использованием спутниковой информации // Российские полярные исследования. 2022. № 1 (47). С. 5–7.
- Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Ред. В. Г. Смирнов. СПб.: ААНИИ, 2011. 239 с.
- Фролов С. В. Основные закономерности распределения характеристик ледяного покрова и их влияние на движение ледокола в Арктическом бассейне в летний период (по данным высокоширотных плаваний) // Тр. ААНИИ. 1997. Т. 437. С. 83–98.
- Фролов С. В. Влияние ориентации нарушений сплошности льда на эффективность движения судов в арктическом бассейне в летний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. Вып. 3 (97). С. 35–45.
- Фролов С. В., Юлин А. В. Специализированное гидрометеорологическое обеспечение высокоширотных рейсов НЭС “Академик Федоров” в 2000, 2004–2005 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 1 (75). С. 128–139.
- Хиллер У. Д., Уикс У. Ф., Экли С., Ковакс А., Кемпбелл У. Дж. Измерение среднемасштабной деформации морских льдов в море Бофорта (АИДЖЕКС-1971) // Проблемы Арктики и Антарктики. 1974. Вып. 43–44. С. 119–138.
- Шильников В. И. О методике наблюдения за раздробленностью ледяного покрова // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С. 187–193.
- von Albedyll L., Hendricks S., Hutter N., Murashkin D., Kaleschke L., Willmes S., Thielke L., Tian-Kunze X., Spreen G., Haas C. Lead fractions from SAR-derived sea ice divergence during MOSAiC // The Cryosphere. 2023. P. 1–39. <https://doi.org/10.5194/tc-2023-123>
- Alekseeva T. A., May R. I., Fedyakov V. Y., Makarov Y. I., Klyachkin S. V., Dymant L. N., Grishin Ye. A., Ershova A. A., Krupina N. A. Ice Automatic Routing: Analysis of Simulation Testing Based on Voyages of Arc7 Class Vessels in the Arctic // International Journ. of Offshore and Polar Engineering. 2023. V. 33. № 3. P. 234–241. <https://doi.org/10.17736/ijope.2023.ik12>
- Bröhan D., Kaleschke L. A Nine-Year Climatology of Arctic Sea Ice Lead Orientation and Frequency from AMSR-E // Remote Sensing. 2014. V. 6. № 2. P. 1451–1475. <https://doi.org/10.3390/rs6021451>
- Chechin D. G., Makhotina I. A., Lüpkes C., Makshatas A. P. Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night // Journ. of the Atmospheric Sciences. 2019. V. 76. № 8. P. 2481–2503. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0277.1>
- Coon M. D., Evans R. J. On Wind-Induced Cracking Of Sea-Ice Sheets // Journ. of Glaciology. 1977. V. 18. № 78. P. 152–154. <https://doi.org/10.3189/S0022143000021638>
- Coon M. D., Maykut G. A., Pritchard R. S., Rothrock D. A., Thorndike A. S. Modeling the pack ice as an elastic-plastic material // AIDJEX BULLETIN. 1974. № 24. P. 1–106.
- Gultepe I., Isaac G. A., Williams A., Marcotte D., Strawbridge K. B. Turbulent heat fluxes over leads and polynyas, and their effects on arctic clouds during FIRE. ACE: Aircraft observations for April 1998 // Atmosphere–Ocean. 2003. V. 41. № 1. P. 15–34. <https://doi.org/10.3137/ao.410102>
- 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. P. 521. <https://doi.org/10.3390/rs11050521>
- Hoffman J. P., Ackerman S. A., Liu Y., Key J. R. A 20-Year Climatology of Sea Ice Leads Detected in Infrared Satellite Imagery Using a Convolutional Neural Network // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 22. P. 5763. <https://doi.org/10.3390/rs14225763>
- Hoffman J. P., Ackerman S. A., Liu Y., Key J. R., McConnell I. L. Application of a Convolutional Neural Network for the Detection of Sea Ice Leads // Remote Sensing. 2021. V. 13. № 22. P. 4571. <https://doi.org/10.3390/rs13224571>
- Hutter N., Losch M. Feature-based comparison of sea ice deformation in lead-permitting sea ice simulations // The Cryosphere. 2020. V. 14. № 1. P. 93–113. <https://doi.org/10.5194/tc-14-93-2020>
- Hutter N., Zampieri L., Losch M. Leads and ridges in Arctic sea ice from RGPS data and a new tracking algorithm // The Cryosphere. 2019. V. 13. № 2. P. 627–645. <https://doi.org/10.5194/tc-13-627-2019>
- Key J., Stone R., Maslanik J., Ellefsen E. The detectability of sea-ice leads in satellite data as a function of atmospheric conditions and measurement scale // Annals of Glaciology. 1993. V. 17. P. 227–232. <https://doi.org/10.3189/s026030550001288x>
- Li M., Liu J., Qu M., Zhang Z., Liang X. An Analysis of Arctic Sea Ice Leads Retrieved from AMSR-E/AMSR2 // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 4. P. 969. <https://doi.org/10.3390/rs14040969>
- Lindsay R. W., Rothrock D. A. Arctic sea ice leads from advanced very high resolution radiometer images // Journ. of Geophys. Research: Oceans. 1995. V. 100. № C3. P. 4533–4544. <https://doi.org/10.1029/94JC02393>
- Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U. Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night // Geophys. Research Letters. 2008. V. 35. № 3. L03805. <https://doi.org/10.1029/2007GL032461>
- Lyden J. D., Shuchman R. A. A Digital Technique to Estimate Polynya Characteristics from Synthetic Aperture Radar Sea-Ice Data // Journ. of Glaciology. 1987. V. 33. № 114. P. 243–245. <https://doi.org/10.3189/S0022143000008765>
- 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. № 1. P. 143–156. <https://doi.org/10.5194/tc-6-143-2012>
- Marko J. R., Thomson R. E. Spatially periodic lead patterns in the Canada Basin Sea Ice: A possible relationship to planetary waves // *Geophys. Research Letters*. 1975. V. 2. № 10. P. 431–434. <https://doi.org/10.1029/GL002i010p00431>
- Maslanik J. A., Barry R. G. Short-Term Interactions Between Atmospheric Synoptic Conditions and Sea-Ice Behaviour in the Arctic // *Annals of Glaciology*. 1989. V. 12. P. 113–117. <https://doi.org/10.3189/S0260305500007059>
- May R., Tarovik O., Topaj A., Fedyakov V., Frolov S. Method for finding the optimal ship route in ice based on vector geo-algorithms // *Intern. Journ. of Offshore and Polar Engineering*. 2020. V. 30. № 1. P. 78–85. <https://doi.org/10.17736/ijope.2020.jc785>
- Rampal P., Weiss J., Marsan D. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007 // *Journ. of Geophys. Research*. 2009. V. 114. № C5. <https://doi.org/10.1029/2008JC005066>
- Reiser F., Willmes S., Heinemann G. A New Algorithm for Daily Sea Ice Lead Identification in the Arctic and Antarctic Winter from Thermal-Infrared Satellite Imagery // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. № 12. P. 1957. <https://doi.org/10.3390/rs12121957>
- Richter-Menge J., McNutt L., Overland J., Kwok R. Relating Arctic pack ice stress and deformation under winter conditions // *Journ. of Geophys. Research*. 2002. V. 107. № C10. P. 8040. <https://doi.org/10.1029/2000JC000477>
- Röhrs J., Kaleschke L. An algorithm to detect sea ice leads by using AMSR-E passive microwave imagery // *The Cryosphere*. 2012. V. 6. № 2. P. 343–352. <https://doi.org/10.5194/tc-6-343-2012>
- Stirling I. The importance of polynyas, ice edges, and leads to marine mammals and birds // *Journ. of Marine Systems*. 1997. V. 10. № 1. P. 9–21. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00054-1)
- Stone R. S., Key J. R. The Detectability of Arctic Leads Using Thermal Imagery Under Varying Atmospheric Conditions // *Journ. of Geophys. Research*. 1993. V. 9. № C7. P. 12469–12482.
- Tschudi M., Curry J., Maslanik J. Characterization of springtime leads in the Beaufort/Chukchi Seas from airborne and satellite observations during FIRE/SHEBA // *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 2002. V. 107 (C10). P. 8034. <https://doi.org/10.1029/2000JC000541>
- Willmes S., Heinemann G. Sea-Ice Wintertime Lead Frequencies and Regional Characteristics in the Arctic, 2003–2015 // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. № 1. P. 4. <https://doi.org/10.3390/rs8010004>
- Zakharova E. A., Fleury S., Guerreiro K., Willmes S., Rémy F., Kouraev A. V., Heinemann G. Sea Ice Leads Detection Using SARAL/AltiKa Altimeter // *Marine Geodesy*. 2015. V. 38 (supl.1). P. 522–533. <https://doi.org/10.1080/01490419.2015.1019655>

Citation: Ershova A. A., Dymant L. N., Alekseeva T. A. Leads in the arctic sea ice cover: from observations to forecasts *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (1): 106–120. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424010086

Breaks in the Arctic ice cover: from observations to predictions

A. A. Ershova^{a#}, L. N. Dymant^a, T. A. Alekseeva^a

^aArctic and Antarctic research institute, Saint-Petersburg, Russia

e-mail: aaershova@aari.ru

Received October 18, 2023, Revised November 30, 2023, Accepted March 31, 2024

Breaks (ruptures) and cracks is the distinguishing feature of any ice cover in the Arctic seas during the cold season and in the whole Arctic Basin throughout a year. The formation of them is a consequence of macro-deformation of the ice thickness. Investigating of the ice breaking in the Arctic begins with single visual observations during the ice aerial surveys in the 1940s and continues till nowadays using regular information from artificial Earth satellites. Processing of big volumes of satellite data and creating climatological datasets on breaks became possible owing to the development of algorithms for automatic identification of the ice breaks in images. Interpretation of the satellite images is based on the fundamental difference between physical properties of breaks and the surrounding consolidated ice. Algorithms for automatic recognition of ruptures using satellite data obtained in different wavelength ranges, including the use of artificial intelligence, are currently being developed. The main characteristics of breaks which

are usually analyzed are as follows: the summarized area of them and its ratio to the total area of the ice field, the mean and maximum widths as well as the total length. The temporal and spatial variability of these characteristics is also considered. Such information is needed for solving problems of improving models of ice cover dynamics and modeling the interaction between the ocean and the atmosphere at high latitudes. A specific feature of publications of the Russian authors on this topic is the practical use of the results obtained for hydrometeorological support of navigation in ice. For the navigation purposes, the dominant orientation of the ruptures on the way of ships is of greatest importance. Operational and prognostic information about the orientation and extent of ruptures, including distribution of them in an ice field are the key data for choosing the optimal sailing route in the Arctic.

Keywords: sea ice discontinuities, ice cover deformation, satellite images, automatic identification of leads, navigation in ice, Arctic Ocean

REFERENCES

- Borodachev V. E.* On block structure of ice cover. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1974, 316: 25–27 [In Russian].
- Brestkin S. V., Gorbunov Yu. A., Losev S. M.* Analysis of discontinuities of sea ice cover in winter based on the materials of the airborne radar surveys. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1988, 401: 94–103 [In Russian].
- Volkov N. A., Gudkovich Z. M., Uglev V. D.* Results of the study of non-uniform drift in the Arctic basin. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1971, 303: 76–88 [In Russian].
- Gorbunov Yu. A., Belikov S. E., Shil'nikov V. I.* Impact of ice conditions on the distribution and abundance of polar bears in the seas of the Soviet Arctic. *Bulleten' moskovskogo obshchestva lyubitelej prirody. Biologicheskii otdel*. Bulletin of Moscow society of naturalists. Biological series. 1987, 92 (5): 19–24 [In Russian].
- Gorbunov Yu. A., Dymant L. N., Losev S. M.* *Srednie mnogoletnie kharakteristiki krupnih narusheniy sploshnosti l'da v Karskom more i v Severo-Vostochnoy chasti Barentseva morya*. Average long-term characteristics of large ice discontinuities in the Kara Sea and in the Northeastern part of the Barents Sea. Reference book. Saint-Petersburg: AARI, 2014: 36 p. [In Russian].
- Gorbunov Yu. A., Dymant L. N., Losev S. M., Frolov S. V.* Medium-range forecasts of large ice cover discontinuities for hydrometeorological support of navigation in the Arctic basin. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2008, 9: 78–96 [In Russian].
- Gorbunov Yu. A., Karelin I. D., Losev S. M.* On the causes of sea ice cover discontinuities in winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 1986, 62: 110–116 [In Russian].
- Gorbunov Yu. A., Losev S. M., Dymant L. N.* Method of diagnostics and medium-range forecast of leads in the ice cover of the Kara Sea. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 2001, 443: 94–102 [In Russian].
- Doronin Yu. P.* *Vzaimodejstvie atmosfery i okeana*. The ocean-Atmosphere interaction. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 288 p. [In Russian].
- Dymant L. N., Ershova A. A., Porubaev V. S.* Short-time forecast of modal orientation of leads in the Laptev Sea. *Trudy RAO/CIS OFFSHORE*. Proc. of RAO/CIS OFFSHORE, 2023. Moscow: Pero, 2023: 181–184 [In Russian].
- Dymant L. N., Losev S. M.* Spatial differences in the density of leads in the ice cover of the Atlantic part of the Arctic Basin. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2020, 60 (4): 567–577. <https://doi.org/10.31857/S2076673420040061> [In Russian].
- Dymant L. N., Losev S. M., Porubaev V. S.* Characteristics of large leads in the sea ice cover of the Atlantic part of the Arctic basin. Reference book. Saint-Petersburg: AARI, 2020: 28 p. [In Russian].
- Karelin I. D.* Systems of large leads in the drifting ice cover of the Kara Sea in winter period. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1998, 438: 51–62 [In Russian].
- Komov N. I., Kupetskiy V. N.* On stationary fractures and breakes in sea ice. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1975, 126: 41–47 [In Russian].
- Kupetskiy V. N.* On cryotectonic lineaments. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1973, 318: 160–166 [In Russian].
- Kupetskiy V. N.* Macro-features of the stressed state of ice cover. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1974, 316: 18–24 [In Russian].
- Losev S. M., Gorbunov Yu. A.* Diagnostics and medium-range forecast of sea ice cover discontinuities. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1998, 438: 13–25 [In Russian].
- Losev S. M., Gorbunov Yu. A., Dymant L. N.* Leads in ice cover of the Arctic Basin from satellite data. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2002, 73: 36–52 [In Russian].
- Losev S. M., Dymant L. N., Mironov Ye. U.* Extent of large leads in the drifting ice of the Atlantic part of the

- Arctic basin from NOAA satellite images. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (4): 543–552. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-4-543-552> [In Russian].
- Makarov Ye. I., Sapershtein Ye. B., Frolov S. V., Fedjakov V. Ye. Development of scenarios for tactical planning of transit voyages of gas carriers in ice conditions along the NSR. *Trudy RAO/CIS OFFSHORE*. Proc. of RAO/CIS OFFSHORE, 2021. Moscow: Pero, 2021: 181–187 [In Russian].
- Melnikov I. A. *Ekosistema arkticheskogo morskogo l'da*. Ecosystem of the Arctic sea ice. Moscow: Nauka, 1989: 191 p. [In Russian].
- Nazirov M. *L'dy i vzvesi kak gidrotermodynamicheskie trassery po dannym kosmicheskikh mnogoazonal'nykh s'yomok*. Ice and suspensions as hydrothermodynamic tracers according to multi-zonal space-based surveys. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 161 p. [In Russian].
- Smirnov V. G., Bichkova I. A., Zahvatkina N. Yu. Development of methods for operational assessment of ice cover discontinuities by means of satellite information. *Rossiyskie poljarnye issledovaniya*. Russian polar research. 2022, 1 (47): 5–7 [In Russian].
- Sputnikovie metody opredeleniya kharakteristik ledjanogo pokrova morej. Satellite methods for determining the characteristics of sea ice cover. Saint Petersburg: AANII, 2011: 239 p. [In Russian].
- Frolov S. V. Main regularities of the distribution of sea ice cover characteristics and their impact on movement of icebreaker in the Arctic basin in summer period (according to the data of high-latitude voyages). *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1997, 437: 83–98 [In Russian].
- Frolov S. V. Impact of orientation of ice discontinuities on the efficiency of ship traffic in the Arctic basin in summer. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2013, 3 (97): 35–45 [In Russian].
- Frolov S. V., Yulin A. V. Specialized hydrometeorological support of high-latitude voyages of the scientific expedition vessel “Akademik Fedorov” in 2000, 2004–2005. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2007, 1 (75): 128–139 [In Russian].
- Hibler W. D., Weeks W. E., Ackley S., Kovacs A., Campbell W. J. Mesoscale strain measurements on the Beaufort sea pack ice (AIDJEX 1971). *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 1974, 43–44: 119–138 [In Russian].
- Shil'nikov V. I. On the method of observing the fragmentation of ice cover. *Trudy AANII*. Proc. of the AARI. 1973, 307: 187–193 [In Russian].
- von Albedyll L., Hendricks S., Hutter N., Murashkin D., Kaleschke L., Willmes S., Thielke L., Tian-Kunze X., Spreen G., Haas C. Lead fractions from SAR-derived sea ice divergence during MOSAiC. *The Cryosphere*. 2023: 1–39. <https://doi.org/10.5194/tc-2023-123>
- Alekseeva T. A., May R. I., Fedyakov V. Y., Makarov Y. I., Klyachkin S. V., Dyment L. N., Grishin Ye. A., Ershova A. A. and Krupina N. A. Ice Automatic Routing: Analysis of Simulation Testing Based on Voyages of Arc7 Class Vessels in the Arctic. *International Journ. of Offshore and Polar Engineering*. 2023, 33 (03): 234–241. <https://doi.org/10.17736/ijope.2023.ik12>
- Bröhan D., Kaleschke L. A Nine-Year Climatology of Arctic Sea Ice Lead Orientation and Frequency from AMSR-E Remote Sensing. 2014, 6 (2): 1451–1475. <https://doi.org/10.3390/rs6021451>
- Chechin D. G., Makhotina I. A., Lüpkes C., Makshatas A. P. Effect of Wind Speed and Leads on Clear-Sky Cooling over Arctic Sea Ice during Polar Night. *Journ. of the Atmospheric Sciences*. 2019, 76 (8): 2481–2503. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0277.1>
- Coon M. D., Evans R. J. On Wind-Induced Cracking Of Sea-Ice Sheets. *Journ. of Glaciology*. 1977, 18 (78): 152–154. <https://doi.org/10.3189/S0022143000021638>
- Coon M. D., Maykut G. A., Pritchard R. S., Rothrock D. A., Thorndike A. S. Modeling the pack ice as an elastic-plastic material. *AIDJEX BULLETIN*. 1974, 24: 1–106.
- Gultepe I., Isaac G. A., Williams A., Marcotte D., Strawbridge K. B. Turbulent heat fluxes over leads and polynyas, and their effects on arctic clouds during FIRE.ACE: Aircraft observations for April 1998. *Atmosphere—Ocean*. 2003, 41 (1): 15–34. <https://doi.org/10.3137/ao.410102>
- 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, 11 (5): 521. <https://doi.org/10.3390/rs11050521>
- Hoffman J. P., Ackerman S. A., Liu Y., Key J. R. A 20-Year Climatology of Sea Ice Leads Detected in Infrared Satellite Imagery Using a Convolutional Neural Network. *Remote Sensing*. 2022, 14 (22): 5763. <https://doi.org/10.3390/rs14225763>
- Hoffman J. P., Ackerman S. A., Liu Y., Key J. R., McConnell I. L. Application of a Convolutional Neural Network for the Detection of Sea Ice Leads. *Remote Sensing*. 2021, 13 (22): 4571. <https://doi.org/10.3390/rs13224571>
- Hutter N., Losch M. Feature-based comparison of sea ice deformation in lead-permitting sea ice simulations. *The Cryosphere*. 2020, 14 (1): 93–113. <https://doi.org/10.5194/tc-14-93-2020>
- Hutter N., Zampieri L., Losch M. Leads and ridges in Arctic sea ice from RGPS data and a new tracking algorithm. *The Cryosphere*. 2019, 13 (2): 627–645. <https://doi.org/10.5194/tc-13-627-2019>
- Key J., Stone R., Maslanik J., Ellefsen E. The detectability of sea-ice leads in satellite data as a function of atmospheric conditions and measurement scale. *Annals of Glaciology*. 1993, 17: 227–232. <https://doi.org/10.3189/s026030550001288x>
- Li M., Liu J., Qu M., Zhang Z., Liang X. An Analysis of Arctic Sea Ice Leads Retrieved from AMSR-E/AMSR2. *Remote Sensing*. 2022, 14 (4): 969. <https://doi.org/10.3390/rs14040969>

- Lindsay R. W., Rothrock D. A.* Arctic sea ice leads from advanced very high resolution radiometer images. *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 1995, 100 (C3): 4533–4544. <https://doi.org/10.1029/94JC02393>
- Lüpkes C., Vihma T., Birnbaum G., Wacker U.* Influence of leads in sea ice on the temperature of the atmospheric boundary layer during polar night. *Geophys. Research Letters*. 2008, 35 (3): L03805. <https://doi.org/10.1029/2007GL032461>
- Lyden J. D., Shuchman R. A.* A Digital Technique to Estimate Polynya Characteristics from Synthetic Aperture Radar Sea-Ice Data. *Journ. of Glaciology*. 1987, 33 (114): 243–245. <https://doi.org/10.3189/S0022143000008765>
- Marcq S., Weiss J.* Influence of sea ice lead-width distribution on turbulent heat transfer between the ocean and the atmosphere. *The Cryosphere*. 2012, 6 (1): 143–156. <https://doi.org/10.5194/tc-6-143-2012>
- Marko J. R., Thomson R. E.* Spatially periodic lead patterns in the Canada Basin Sea Ice: A possible relationship to planetary waves. *Geophys. Research Letters*. 1975, 2 (10): 431–434. <https://doi.org/10.1029/GL002i010p00431>
- Maslanik J. A., Barry R. G.* Short-Term Interactions Between Atmospheric Synoptic Conditions and Sea-Ice Behaviour in the Arctic. *Annals of Glaciology*. 1989, 12: 113–117. <https://doi.org/10.3189/S0260305500007059>
- May R., Tarovik O., Topaj A., Fedyakov V., Frolov S.* Method for finding the optimal ship route in ice based on vector geo-algorithms. *Intern. Journ. of Offshore and Polar Engineering*. 2020, 30 (1): 78–85. <https://doi.org/10.17736/ijope.2020.jc785>
- Rampal P., Weiss J., Marsan D.* Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007. *Journ. of Geophys. Research*. 2009, 114 (C5). <https://doi.org/10.1029/2008JC005066>
- Reiser F., Willmes S., Heinemann G.* A New Algorithm for Daily Sea Ice Lead Identification in the Arctic and Antarctic Winter from Thermal-Infrared Satellite Imagery. *Remote Sensing*. 2020, 12 (12): 1957. <https://doi.org/10.3390/rs12121957>
- Richter-Menge J., McNutt L., Overland J., Kwok R.* Relating Arctic pack ice stress and deformation under winter conditions. *Journ. of Geophys. Research*. 2002, 107 (C10): 8040. <https://doi.org/10.1029/2000JC000477>
- Röhrs J., Kaleschke L.* An algorithm to detect sea ice leads by using AMSR-E passive microwave imagery. *The Cryosphere*. 2012, 6 (2): 343–352. <https://doi.org/10.5194/tc-6-343-2012>
- Stirling I.* The importance of polynyas, ice edges, and leads to marine mammals and birds. *Journ. of Marine Systems*. 1997, 10 (1): 9–21. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(96\)00054-1](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(96)00054-1)
- Stone R. S., Key J. R.* The Detectability of Arctic Leads Using Thermal Imagery Under Varying Atmospheric Conditions. *Journ. of Geophys. Research*. 1993, 9 (C7): 12469–12482.
- Tschudi M., Curry J., Maslanik J.* Characterization of springtime leads in the Beaufort/Chukchi Seas from airborne and satellite observations during FIRE/SHEBA. *Journ. of Geophys. Research: Oceans*. 2002, 107 (C10): 8034. <https://doi.org/10.1029/2000JC000541>
- Willmes S., Heinemann G.* Sea-Ice Wintertime Lead Frequencies and Regional Characteristics in the Arctic, 2003–2015. *Remote Sensing*. 2016, 8 (1): 4. <https://doi.org/10.3390/rs8010004>
- Zakharova E. A., Fleury S., Guerreiro K., Willmes S., Rémy F., Kouraev A. V., Heinemann G.* Sea Ice Leads Detection Using SARAL/AltiKa Altimeter. *Marine Geodesy*. 2015, 38 (1): 522–533. <https://doi.org/10.1080/01490419.2015.1019655>