

Характеристики заприпайных полыней Карского моря по данным спутниковых микроволновых измерений сплочённости морского льда

Е. В. Львова, М. А. Животовская, Е. В. Заболотских,
Е. А. Балашова, С. В. Барановский

*Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург, 192007, Россия
E-mail: Lvova317@gmail.com*

В работе проанализированы характеристики заприпайных полыней Карского моря за 15 лет (с января 2003 по май 2019 г., исключая сезон 2011/2012 гг.) на основе полей сплочённости морского льда с разрешением 6,25×6,25 км по данным измерений спутниковых микроволновых радиометров Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E) и Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2). Полынь идентифицировались визуально в полях сплочённости морского льда, а их характеристики определялись полуавтоматически с помощью инструментов ГИС-системы — Арктического портала. Рассмотрено 8 групп полыней Карского моря по районам их формирования: Юго-Восточные полыньи Земли Франца Иосифа, Северные Новоземельские, Южные Новоземельские, Амдерминские, Ямальские, Обь-Енисейские. За время наблюдений было обнаружено 2109 полыней. Рассчитаны средние и максимальные значения площадей полыней и определено среднее время их жизни. Полученные результаты свидетельствуют об изменении устойчивости полыней, образующихся вблизи Новой Земли в юго-западной части моря. В динамике их площадей выявлен положительный тренд, свидетельствующий об увеличении площади полыней в Карском море на 3,64 км² в год. Анализ характеристик заприпайных полыней по данным спутниковых наблюдений позволяет рассматривать полыньи Карского моря и как постоянный элемент ледовых условий, способствующий безопасной и низкокзатратной навигации в море, и как свидетельство происходящих климатических изменений.

Ключевые слова: Арктический портал, заприпайные полыньи, Карское море, спутниковое пассивное микроволновое зондирование

Одобрена к печати: 19.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-203-214

Введение

Припай и заприпайные полыньи — важные элементы ледового режима арктических морей. Характеристики полыней существенно влияют как на взаимодействие океана и атмосферы, так и на формирование ледяного покрова. Заприпайные полыньи, особенно большие по площади, служат путями перемещения барических образований и местами их регенерации и циклогенеза; расположение устойчивых и стационарных полыней совпадает с положением климатических фронтов. Их площади, изменяясь от месяца к месяцу, от года к году, в некоторых районах являются долгопериодным климатообразующим фактором. Как показано в работе (Захаров, 1996), до 70 % объёма новых льдов морей Сибирского шельфа образуется в заприпайных полынях. Кроме того, результаты обобщения информации о статистических характеристиках полыней широко используются в навигации при планировании маршрутов движения судов.

В результате происходящих в последние годы изменений климата в Арктике наблюдается сокращение ледяного покрова и изменение ледового режима арктических морей (Иванов и др., 2013; Шалина, Бобылев, 2017; Comiso et al., 2008). Поэтому изучение влияния климатических изменений на характеристики полыней и их динамику с использованием современных методов измерений параметров морского льда представляется крайне актуальной задачей.

Физико-географические особенности полыней в Карском море изучаются давно. Первые результаты подобных исследований опубликованы в работе (Купецкий, 1958), в которой автор обобщил сведения о ледяном покрове Карского моря и акцентировал внимание на важности информации о характеристиках полыней. Систематическое изучение режимных и морфометрических характеристик полыней моря началось с 1979 г. Ледяной покров в Карском море формируется за счёт замерзания/таяния и ледообмена с Центральным Арктическим бассейном. Ледовый режим существенно различен для северо-восточной и юго-западной частей моря. В юго-западной части Карского моря лёд наблюдается с ноября по июнь – июль. Северо-восточная часть моря летом в холодные годы не освобождается полностью ото льда. В последние годы в связи с сокращением ледяного покрова в Арктике лёд вытаскивается летом во всём море. До 80-х гг. прошлого века основные сведения о ледовом режиме северо-восточной части Карского моря получались на основании визуальных наблюдений авиационных ледовых разведок, выполняемых с разной степенью регулярности в разное время года. Несмотря на то, что такие разведки позволяли получить общее представление об основных элементах зимнего ледового режима (припай, полыньи, зоны льдов различного возраста и др.), они не давали возможности проследить за эволюцией ледяного покрова в промежутках между разведками. Значительно больше данных о ледяном покрове в зимний период накоплено по юго-западной части Карского моря с его круглогодичной навигацией и регулярными тактическими ледовыми разведками (Бушуев, 1997; Карелин, 1977; Попов и др., 2007).

Использование спутниковых данных в последние десятилетия существенно изменило возможности изучения полыней благодаря получению площадных детальных съёмок ледяного покрова. Эти данные позволили расширить имеющиеся представления о ледовом режиме Карского моря (Карелин, Карклин, 2012). Информацию о ледовой обстановке можно получать по спутниковым измерениям в разных диапазонах спектра (Смирнов, 2011). Использование оптических и инфракрасных снимков для изучения арктического морского льда ограничено из-за полярной ночи и облачности, поэтому основным источником спутниковых данных о ледяном покрове являются измерения микроволновых инструментов — пассивных (радиометров) и активных (радиолокаторов), в том числе радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) (Тихонов и др., 2015). Однако данные РСА нерегулярны и часто дороги, поэтому оптимальными методами мониторинга по временным параметрам (длительность и частота наблюдения) и пространственному обзору (покрытие и перекрытие зон) являются методы пассивного микроволнового зондирования (Carsey, 1992; Teleti, Luis, 2013).

Для восстановления характеристик морского льда по данным спутниковой микроволновой радиометрии используются различные алгоритмы (Cavalieri et al., 1984; Comiso, 1986; Svendsen et al., 1983). Основными характеристиками, определяемыми с помощью таких алгоритмов, являются: сплочённость льда (отношение площади льдин в зоне, где они распределены сравнительно равномерно, к общей площади этой зоны), ледовитость (процент площади, занятой льдом любой сплочённости, по отношению к общей площади региона) и иногда возраст льда. Измерения хорошо калиброванных японских спутниковых микроволновых радиометров серии Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E и AMSR2) на частоте 89 ГГц могут быть использованы для восстановления сплочённости морского льда с разрешением до 3,125 км.

В настоящей работе обнаружение и определение характеристик полыней проводилось на основе анализа карт сплочённости морского льда, построенных с использованием данных AMSR-E и AMSR2. Исследовались заприпайные полыньи, формирующиеся за припаем в осеннее, зимнее и весеннее время. Были проанализированы характеристики полыней Карского моря с 2003 по 2019 г. с целью выявления основных закономерностей в их формировании и распространении.

Материалы и методы

Параметры заприпайных полыней Карского моря определялись с использованием Арктического портала (<http://siows.solab.rshu.ru>). Арктический портал представляет собой геоинформационную онлайн-систему для хранения, отображения и анализа спутниковых

данных и результатов численного моделирования (Заболотских и др., 2020). Он даёт возможность выделять объекты на картах, а также определять и сохранять параметры этих объектов. Портал использует одну из полярных проекций, позволяющих отображать данные вблизи северного полюса с минимальными искажениями. Данные по среднесуточной сплочённости ледяного покрова Арктики, полученные в университете Бремена (*нем.* Universität Bremen, *англ.* University of Bremen) с помощью алгоритма ARTIST Sea Ice (Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study), ASI (Spreen et al., 2008), применённого к измерениям спутниковых радиометров AMSR-E и AMSR2, доступны на Арктическом портале с пространственным разрешением 6,25×6,25 км. Таким образом, с использованием картированных полей сплочённости льда возможна идентификация полей, размеры которых больше ~6 км. Данные доступны начиная с августа 2002 г. по настоящее время. С октября 2011 по август 2012 г. ни один из радиометров не функционировал, поэтому среднесуточные поля сплочённости морского льда анализировались с января 2003 по май 2019 г., исключая осень, зиму и весну сезона 2011/2012 гг.

Иллюстрация процесса определения характеристик полей представлена на *рис. 1* на примере Амдерминской полей 28 марта 2019 г. Для диагностики случая полей проводился визуальный анализ полей сплочённости льда в Карском море в их временном развитии. После чего морфометрические параметры полей (протяжённость, ширина, периметр и площадь) определялись при помощи картографических инструментов портала.

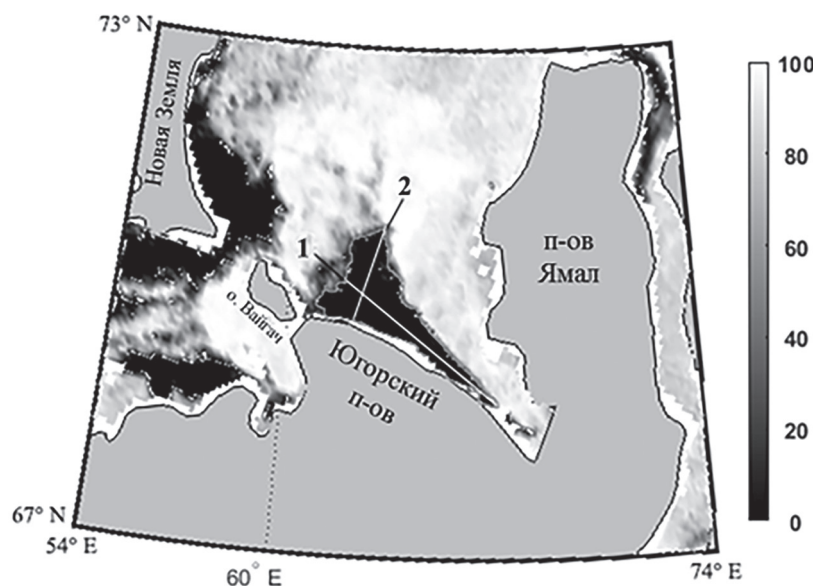


Рис. 1. Карта сплочённости ледяного покрова Карского моря по данным измерений AMSR2, на которой иллюстрируется процесс определения максимальной длины (1) и максимальной ширины (2) полей на примере Амдерминской полей 28 марта 2019 г.

Карское море принято делить на два крупных района: юго-западный и северо-восточный. Эти районы существенно различаются по характеристикам и ледовым условиям. Всего выделяют 8 основных групп полей по районам их генерации (Карелин, Карклин, 2012). К районам юго-западной части относят следующие полей: Юго-Восточные полей Земли Франца Иосифа (ЮВЗФИ), Северные Новоземельские (СНЗ), Южные Новоземельские (ЮНЗ), Амдерминские (АМ), Ямальские (ЯМ) и Обь-Енисейские (ОЕ). Расположение заприпайных полей в Карском море проиллюстрировано на *рис. 2* (см. с. 206). К районам северо-восточной части относят Центральные Карские (ЦК) и Западные Североземельские (ЗСЗ) полей. Несмотря на то, что Земля Франца Иосифа не принадлежит к акватории Карского моря, для удобства классификации полей, расположенные между Новой Землёй и Землёй Франца Иосифа, также относят к Карскому морю.

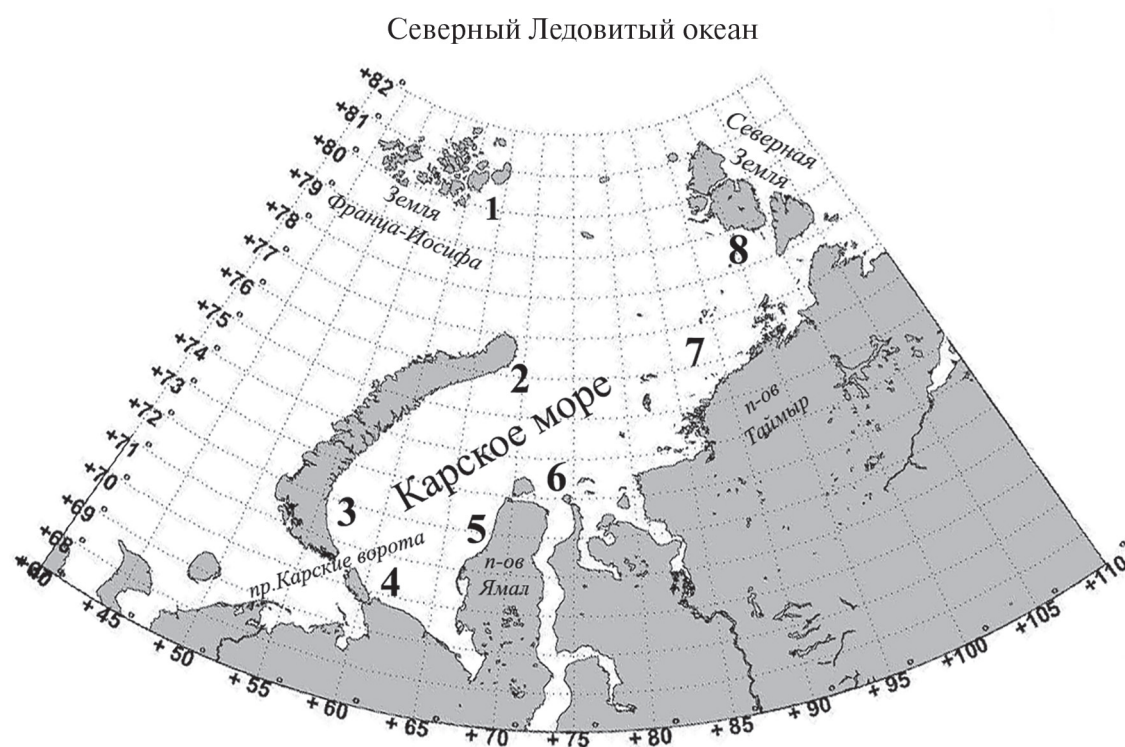


Рис. 2. Расположение заприпайных полыней в Карском море: 1 — Юго-Восточная полынья Земли Франца Иосифа; 2 — Северная Новоземельская; 3 — Южная Новоземельская; 4 — Амдерминская; 5 — Ямальская; 6 — Обь-Енисейская; 7 — Центральная Карская; 8 — Западная Североземельская

В настоящей работе анализируется статистика заприпайных полыней, образовавшихся с 2003 по 2019 г., исключая сезон 2011/2012 гг. Таким образом, период наблюдений составил 15 полных годовых сезонов, каждый из которых включал весенние, осенние и зимние месяцы. Для каждой полыньи определялись время жизни и средние значения морфометрических параметров. После чего для каждой группы полыней рассчитывались среднемесячные и среднегодовые значения параметров за 15 лет наблюдений. Были проанализированы статистические характеристики распределения полыней по площади и времени существования. Обобщение полученных результатов позволило выделить полыньи с аномальными параметрами — наиболее быстро сформировавшиеся и самые долгоживущие. В дальнейшем планируется исследовать причины аномального развития полыней.

Результаты

При анализе временной устойчивости полыней при повторяемости появления полыньи более 75 % наблюдаемого времени они считаются стационарными, 50–74 % — устойчивыми и менее 50 % — эпизодическими. По результатам работы (Захаров, 1996) выделяются всего две стационарных полыньи: АМ и ОЕ. В настоящей работе более 75 % рассматриваемого временного промежутка наблюдались, кроме полыней АМ и ОЕ, также полыньи ЮНЗ. Различия с результатами предыдущих исследований могут быть связаны с преимущественными маршрутами ледовых разведок, большая часть которых проходила в южной части моря. Однако переход ЮНЗ в категорию стационарных может быть связан и с более частыми случаями Новоземельской боры в связи с меняющимся климатом (Суркова и др., 2015). При возникновении Новоземельской боры скорость ветра достигает 40 м/с, что приводит к раскрытию полыньи указанного района. К устойчивым полыньям можно отнести полыньи ЯМ, СНЗ и ЦК, которые наблюдались более 50 % времени. Остальные полыньи (ЮВЗФИ и ЗСЗ) являются эпизодическими.

Всего за 15 лет наблюдений было обнаружено 2109 полыней. Количество полыней в Карском море за период 2003–2019 гг., исключая зимний сезон 2011/2012 гг., для каждого района (в соответствии с принятой классификацией) представлено в *табл. 1*. В правом столбце таблицы приведены основные причины возникновения полыней, заимствованные из работы (Захаров, 1996). За исследуемый период обнаружено наибольшее количество полыней ОЕ (403) и наименьшее количество полыней СНЗ (159).

Таблица 1. Количество полыней в Карском море за период 2003–2019 гг., исключая сезон 2011/2012 гг. Основные причины возникновения заимствованы из работы (Захаров, 1996)

| Полыни по району образования | Количество | Временная устойчивость | Основные причины возникновения |
|-----------------------------------|------------|------------------------|---|
| Юго-Восточные Земли Франца-Иосифа | 342 | Эпизодическая | Воздушные потоки в северо-западной части моря |
| Северные Новоземельские | 159 | Устойчивая | Отжимной северный ветер; при западных ветрах также влияние тепла вод Баренцева моря |
| Южные Новоземельские | 179 | Стационарная | Отжимные южные, юго-западные ветра |
| Амдерминские | 282 | Стационарная | Отжимные ветра южного направления |
| Ямальские | 215 | Устойчивая | Отжимные восточные потоки вдоль Байдарацкой губы до о. Белый |
| Обь-Енисейские | 403 | Стационарная | Тёплые стоковые пресные воды рек Оби и Енисея |
| Центральные Карские | 307 | Устойчивая | Отжимные южные, юго-восточные, восточные ветра |
| Западные Североземельские | 222 | Эпизодическая | Отжимные восточные ветра |

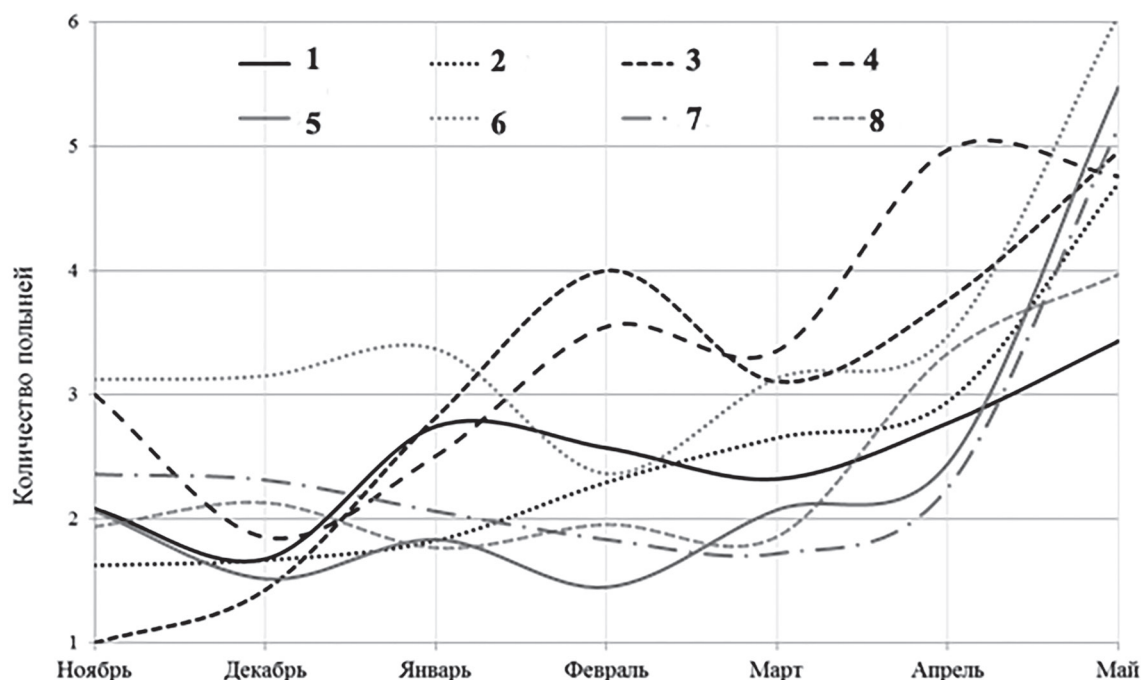


Рис. 3. Среднемесячное количество обнаруженных полыней за исследуемые месяцы в каждом из исследуемых районов Карского моря за период 2003–2019 гг., исключая сезон 2011/2012 гг.: 1 — Юго-Восточная полынья Земли Франца Иосифа; 2 — Северная Новоземельская; 3 — Южная Новоземельская; 4 — Амдерминская; 5 —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

На *рис. 3* (см. с. 207) представлено среднемесячное количество обнаруженных полыней для каждого из районов за весь период исследования. Для каждого из районов среднемесячное максимальное количество полыней приходится на май, что вызвано изменением ветра во многих районах моря на отжимной, как указано в работе (Carsey, 1992), а также повышением температуры воздуха до значений, при которых молодой лёд в полынях не образуется. Наибольшее среднемесячное количество полыней зафиксировано в мае для полыней ОЕ, что вызвано взломом припая на северных выходах в Обский и Енисейский заливы. Минимальное среднемесячное количество зарегистрировано для полыней ЮНЗ в ноябре. За весь исследуемый период в ноябре полынь ЮНЗ наблюдались всего два раза, в 2004 и 2010 гг., в обоих случаях они существовали всего один день. В ноябре в этом районе проходит процесс выхолаживания и образования льда, что при отсутствии интенсивных южных и юго-западных ветров не позволяет полыням существовать в течение сколько-нибудь длительного времени.

Средние и максимальные сроки существования для каждой из рассмотренных полыней приведены в *табл. 2*. В среднем срок существования полыней в Карском море ограничивается тремя днями. Максимально долго живут полынь ОЕ: их среднее максимальное время существования составило четыре дня. Минимальное среднее время жизни — два дня — у полыней ЯМ и ЗСЗ. Наибольшее время жизни за исследуемый период — 23 дня — имели полынь ОЕ (в ноябре 2012 г.) и ЯМ (в начале мая 2003 г.). К сожалению, исследования характеристик полыней до наступления эры доступности спутниковых данных ограничены, поэтому нет возможности оценить динамику времени существования полыней на основании более длинного временного ряда.

Таблица 2. Время существования полыней Карского моря за период 2003–2019 гг.

| Полынья | Максимальное время существования, дни | Среднее время существования, дни |
|---------|---------------------------------------|----------------------------------|
| ЮВЗФИ | 16 | 3 |
| СНЗ | 16 | 3 |
| ЮНЗ | 18 | 3 |
| АМ | 17 | 3 |
| ЯМ | 23 | 2 |
| ОЕ | 23 | 4 |
| ЦК | 16 | 3 |
| ЗСЗ | 19 | 2 |

В конце мая начинается период таяния льдов, при котором полынь могут сильно увеличиваться в размерах. С течением времени район такой полынь полностью очищается ото льда и становится областью открытой воды, не имеющей признаков полынь как объекта ледяного покрова. Поскольку практически момент превращения полынь в область моря, свободную ото льда, определить не представляется возможным, майские полынь, не имеющие даты закрытия, были исключены из статистического анализа.

Наибольший интерес представляют значения площади полынь, так как именно этот параметр оказывает огромное влияние на взаимодействие атмосферы и океана и ледообразование. Максимальные, минимальные и средние значения площади полыней, а также средние значения их протяжённости и ширины представлены в *табл. 3*.

Максимальную площадь за весь период исследования имеет полынья ЮНЗ (32105 км², 14 февраля 2006 г.). Минимальную среднюю площадь — полынья ЮВЗФИ (2665 км²), что согласуется с результатами предыдущих исследований (Захаров, 1996; Иванов и др., 2013). Самой же крупной полыней в этих источниках (по данным за 1980–2009 гг. с октября по июнь) указана ЦК, в то время как по результатам нашей работы наибольшие средние площади имели полынь ЮНЗ (6722 км²) и ЯМ (6073 км²).

Таблица 3. Морфометрические характеристики полей Карского моря за период 2003–2019 гг.

| Полянья | Длина, км | | | Ширина, км | | | Площадь, км ² | | |
|---------|-----------|------------------|-------|------------|------------------|-------|--------------------------|------------------|-------|
| | Мин. | Среднее значение | Макс. | Мин. | Среднее значение | Макс. | Мин. | Среднее значение | Макс. |
| ЮВЗФИ | 7 | 84 | 424 | 3 | 30 | 261 | 79 | 2665 | 15685 |
| СНЗ | 5 | 134 | 387 | 5 | 43 | 281 | 241 | 5454 | 18650 |
| ЮНЗ | 5 | 170 | 593 | 4 | 40 | 149 | 149 | 6722 | 32105 |
| АМ | 5 | 117 | 560 | 2 | 36 | 200 | 108 | 4045 | 22871 |
| ЯМ | 7 | 191 | 654 | 2 | 39 | 150 | 229 | 6073 | 21513 |
| ОЕ | 3 | 95 | 469 | 3 | 29 | 149 | 78 | 3012 | 30279 |
| ЦК | 6 | 112 | 680 | 3 | 30 | 150 | 70 | 3271 | 30964 |
| ЗСЗ | 6 | 101 | 292 | 6 | 31 | 181 | 103 | 2880 | 14450 |

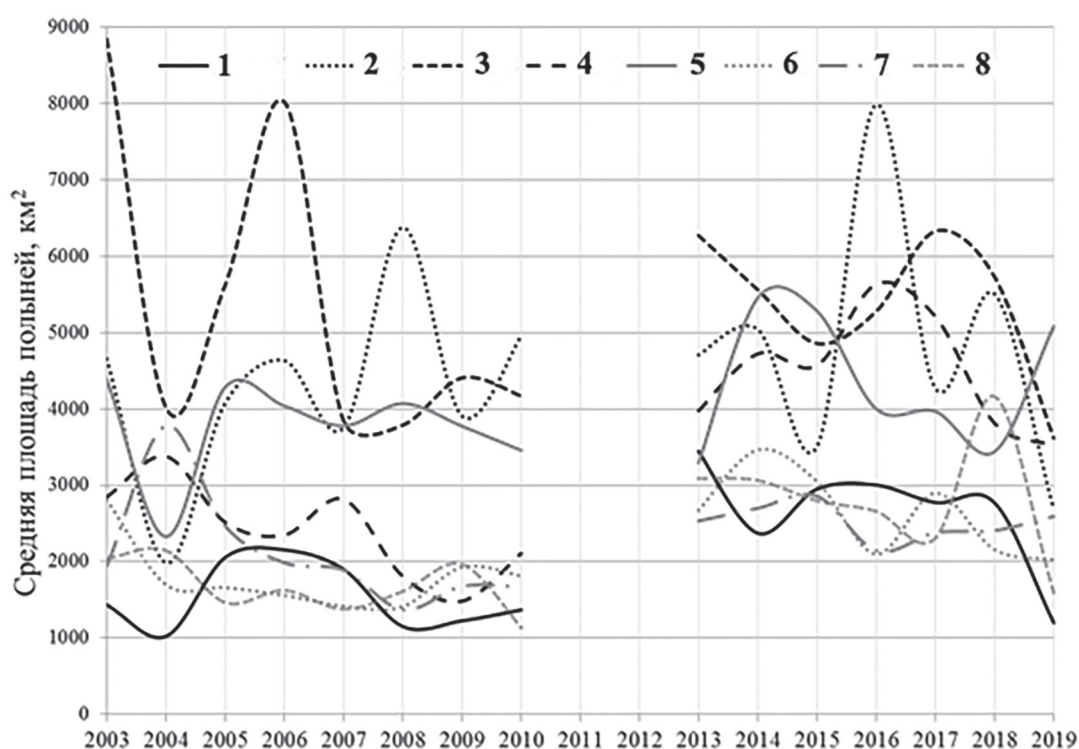


Рис. 4. Среднегодовые площади полей Карского моря: 1 — Юго-Восточная полянья Земли Франца Иосифа, 2 — Северная Новоземельская, 3 — Южная Новоземельская, 4 — Амдерминская, 5 — Ямальская, 6 — Обь-Енисейская, 7 — Центральная Карская, 8 — Западная Североземельская; 9 — среднегодовые площади полей; 10 — линейный тренд среднегодовых площадей Карского моря за период 2003–2019 гг., исключая сезон 2011/2012 гг.

Для анализа динамики развития полей было исследовано изменение их морфометрических характеристик за весь период существования. На рис. 4 показаны графики среднегодовой средней площади полей за период 2003–2019 гг., исключая сезон 2011/2012 гг., для каждого из районов Карского моря. Максимальную среднегодовую площадь имеют полянья района ЮНЗ в 2003 г. (8841 км²) и в 2006 г. (8023 км²) и района СНЗ в 2016 г. (7982 км²). В 2004 г. для средних площадей полей ЮНЗ, СНЗ, ЯМ, ЮВЗФИ наблюдается резкий минимум. Средние площади полей ЮВЗФИ, ЗСЗ, ЦК и ОЕ практически за весь период исследования меньше площадей полей остальных районов.

Значения общей среднегодовой площади полей Карского моря (S) с 2003 по 2019 г., исключая 2011 и 2012 гг., сильно варьируются. Максимальное значение S — 279 тыс. км² —

наблюдается в 2003 г. В 2004 г. S минимальна и равна 105 тыс. км². В 2005 г. S возрастает и с 2005 по 2010 г. составляет 155–195 тыс. км². С 2013 по 2019 г. S изменяется в пределах 180–266 тыс. км². Положительный тренд (3,64 км² в год) свидетельствует о тенденции увеличения S за рассмотренный период.

На рис. 5 представлены среднемесячные площади полыней Карского моря за весь исследуемый период. Площадь полыней по всем районам увеличивается начиная с апреля и в мае достигает максимальных значений для каждого района. В это время припай в море разрушается, толщина ледяного покрова уменьшается, полыньи с лёгкостью образуются как под действием отжимных ветров, так и под влиянием тёплых вод. У полыней ЮНЗ, СНЗ и АМ также наблюдается повышение среднемесячной площади в феврале и марте, что может быть связано с действием западных и юго-западных ветров в эти месяцы.

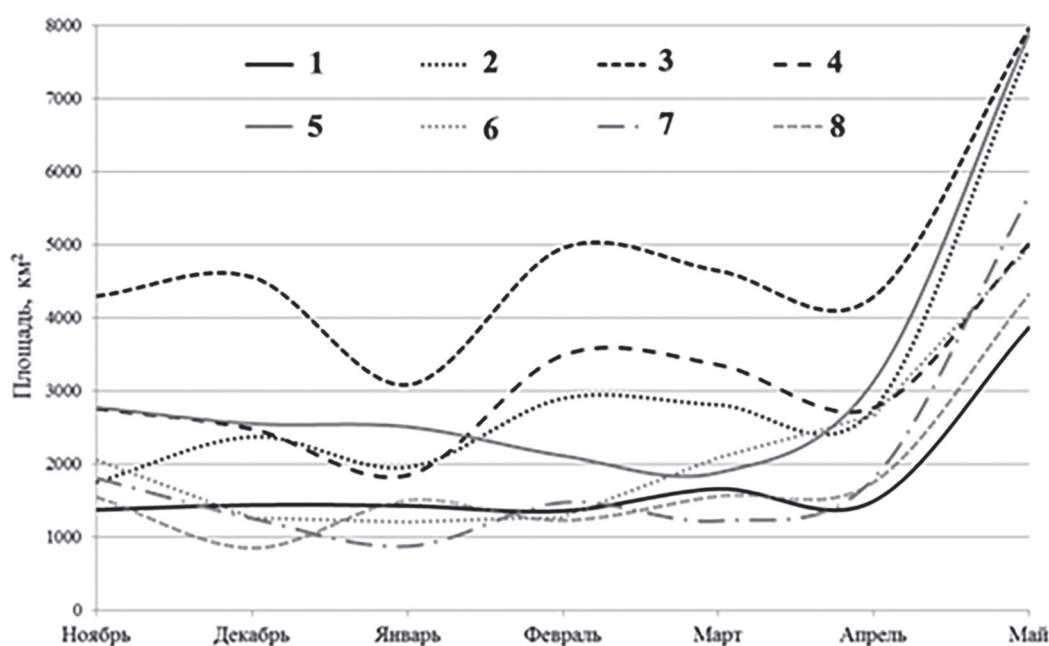


Рис. 5. Среднемесячные значения площади полыней Карского моря за период 2003–2019 гг., исключая сезон 2011/2012 гг.: 1 — Юго-Восточная полынья Земли Франца Иосифа; 2 — Северная Новоземельская; 3 — Южная Новоземельская; 4 — Амдерминская; 5 — Ямальская; 6 — Обь-Енисейская; 7 — Центральная Карская; 8 —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

Распределение количества полыней Карского моря по средней площади свидетельствует о том, что большинство из них имеет площадь до 3000 км². Средняя площадь большинства полыней ЮВЗФИ, ОЕ, ЦК и ЗСЗ не превышает 1000 км². Полыньи СНЗ, АМ и ЯМ чаще всего имеют площадь около 2000 км². Средняя площадь большинства (27) полыней ЮНЗ достигает 6000 км².

Заключение

В настоящей работе на основании спутниковых данных проанализированы основные морфометрические характеристики заприпайных полыней Карского моря за 15-летний период с января 2003 по май 2019 г., исключая сезон 2011/2012 гг. Характеристики полыней оценивались по полям сплочённости ледяного покрова с разрешением 6,25×6,25 км, полученным по данным спутниковых микроволновых радиометров AMSR-E и AMSR2 в университете Бремена с помощью алгоритма ASI. При оценке параметров полыней использовались инструменты Арктического портала, а сами полыньи определялись методом визуального анализа полей сплочённости льда.

В работе рассчитаны статистические характеристики полыней Карского моря в восьми районах их образования в соответствии с классификацией, принятой в работе (Карелин, Карклин, 2012). Рассмотрены Юго-Восточные полыньи Земли Франца Иосифа, Северные Новоземельские, Южные Новоземельские, Амдерминские, Ямальские, Обь-Енисейские, Центральные Карские и Западные Североземельские полыньи.

Сопоставление результатов данной работы с результатами, полученными в ранних исследованиях (Захаров, 1996), свидетельствует об изменении устойчивости полыней, образующихся вблизи Новой Земли в юго-западной части моря (полыньи ЮНЗ). Переход ЮНЗ в категорию стационарных может быть связан с более частыми случаями Новоземельской боры вследствие меняющегося климата (Суркова и др., 2015). При возникновении Новоземельской боры скорость ветра достигает 40 м/с, что приводит к раскрытию полыньи указанного района. В работе (Малинин, Вайновский, 2018) также обсуждается усиление юго-восточных воздушных потоков над Арктикой в целом. Поскольку заприпайные полыньи открываются и поддерживаются отжимными ветрами (Martin, Cavalieri, 1989; Popov, Rubchenia, 2005), можно ожидать дальнейшего увеличения полыней в этой части моря.

К устойчивым полыням по результатам нашего исследования относятся полыньи ЯМ, СНЗ и ЦК. Остальные полыньи (ЮВЗФИ и ЗСЗ) являются эпизодическими.

Всего за период наблюдений обнаружено 2109 полыней. Наибольшее количество полыней — 403 — найдено в Обь-Енисейском районе. Наименьшее — 159 — в Северном Новоземельском районе. В среднем срок существования полыней в Карском море ограничивается тремя днями. Максимальное время жизни наблюдается у Обь-Енисейских полыней. Поскольку ветер в данном районе дует преимущественно к берегу (Popov, Rubchenia, 2005), причиной долгого незакрытия Обь-Енисейских полыней, особенно в зимний период, для которого характерны низкие температуры воздуха, может служить турбулентный приток тепла от нижележащих слоёв воды (Martin, Cavalieri, 1989; Popov Rubchenia, 2005).

Максимальные площади наблюдаются у Южных Новоземельских и Ямальских полыней, что объясняется общей циркуляцией вод в Юго-Западной части Карского моря (Martin, Cavalieri, 1989). Поток тёплой и более солёной воды Баренцева моря распространяется, как правило, на юго-восток, вдоль п-ова Ямал. Эти полыньи формируются, таким образом, под действием адвекции тепла и под влиянием воздушных потоков в северо-западной части Карского моря. Увеличение энергии течений весной и осенью (Малинин, Вайновский, 2018) коррелирует с увеличением количества полыней и ростом их площади. Минимальную площадь имеют Юго-Восточные полыньи Земли Франца Иосифа.

Общая площадь полыней Карского моря за рассмотренный период увеличивается со скоростью 3,64 км² в год, что в условиях отсутствия трендов в скорости и направлении ветра свидетельствует об уменьшении толщины ледяного покрова Карского моря. Изменения климата Арктики привели к более позднему ледоставу осенью и раннему разрушению льда весной. В работе (Захаров, 1996) периодом возрастания количества полыней, связанных со взломом припая в весеннее время, указан конец мая, в то время как результаты нашего исследования показывают, что количество полыней резко увеличивается уже в конце апреля — начале мая. Это связано не только с повышением температуры воздуха, но и с изменением направления ветра во многих районах моря (Малинин, Вайновский, 2018; Смирнов, 2011).

Статистические характеристики полыней могут быть использованы для расчёта ледопродуктивности Карского моря. Среднесуточная скорость нарастания льда в заприпайных полынях составляет до 15 см в сутки (Зацепин, 2010). Сведения о времени жизни и площади полыней позволяют получить ледопродуктивность полыней Карского моря, которая при значительном развитии полыней может в 2–3 раза превышать ледопродуктивность всего моря (Зацепин, 2010).

Статистическая информация о полынях позволяет строить маршруты плавания с учётом знания районов и времени образования полыней, а также продолжительности их существования. Полученные характеристики можно использовать для вероятностного прогноза судоходных условий по участку трассы Северного морского пути, проходящему по Карскому морю. Так, например, в феврале маршруты движения по Карскому морю целесообразно

планировать вблизи Новой Земли, а не вдоль материка, поскольку и протяжённость, и количество полыней ЮНЗ и СНЗ значительно превышают значения тех же характеристик для полыней ЯМ и ОЕ.

Анализ характеристик заприпайных полыней по данным спутниковых наблюдений позволяет рассматривать полыни Карского моря и как постоянный элемент ледовых условий, способствующий безопасной и низкочеловеческой навигации в море, и как свидетельство происходящих климатических изменений.

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

Литература

1. Бушувев А. В. Сбор, обработка и анализ данных по льду // Морской лед. Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий: справоч. пособие. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. С. 317–386.
2. Заболотских Е. В., Хворостовский К. С., Балашова Е. А., Азаров С. М., Кудрявцев В. Н. Изменчивость морского льда в Арктике по данным Арктического портала // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 2. С. 239–250. DOI: 10.31857/S2076673420020037.
3. Захаров В. Ф. Морские льды в климатической системе. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 213 с.
4. Зацепин А. Г., Морозов Е. Г., Пака В. Т., Демидов А. Н., Кондрашов А. А., Корж А. О., Кременецкий В. В., Поярков С. Г., Соловьев Д. М. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г. // Океанология. 2010. № 5. С. 683–697.
5. 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.
6. Карелин И. Д. Заприпайные полыни Карского моря по данным наблюдений со спутников // Тр. Арктич. и антарктич. научно-исслед. ин-та. 1977. Т. 372. С. 106–113.
7. Карелин И. Д., Карклин В. П. Припай и заприпайные полыни арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века. СПб.: ААНИИ, 2012. С. 180.
8. Купецкий В. Н. Стационарные полыни в замерзающих морях // Вестн. Ленинградского ун-та. 1958. № 12. С. 172–184.
9. Малинин В. Н., Вайновский П. А. О причинах первого потепления Арктики в XX веке // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2018. № 53. С. 34–55.
10. Попов А. В., Карелин И. Д., Рубеня А. В. Роль зимних заприпайных полыней в формировании ледовых и гидрологических условий в морях Сибирского шельфа в летний период // Метеорология и гидрология. 2007. № 9. С. 65–74.
11. Смирнов В. Г. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.
12. Суркова Г. В., Соколова Л. А., Чичев А. Р. Многолетний режим экстремальных значений скорости ветра в Баренцевом и Карском морях // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. «География». 2015. № 5. С. 53–58.
13. Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А., Боярский Д. А., Репина И. А., Комарова Н. Ю. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 150–169.
14. Шалина Е. В., Бобылев Л. П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41.
15. Carsey F. D. Microwave remote sensing of sea ice. Washington DC: American Geophysical Union, 1992. 462 p.
16. Cavalieri D. J., Gloersen P., Campbell W. J., Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR // J. Geophysical Research. 1984. V. 89. No. D4. P. 5355–5369.
17. Comiso J. C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // J. Geophysical Research. 1986. V. 91. No. C1. P. 975–994.
18. Comiso J. C., Parkinson C. L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. No. L01703. DOI: 10.1029/2007GL031972.
19. Martin S., Cavalieri D. J. Contribution of the Siberian Shelf Polynyas to the Arctic Ocean Intermediate and Deep Water // J. Geophysical Research. 1989. V. 94. No. C9. P. 12725–12738.

20. Popov A., Rubchenia A. Influence of Polynyas of Arctic Shelf on Arctic Oscillation Formation // Papers EGU General Assembly. Arctic Hazard (NH-6.03). EGUGU05-A-2304. 24–29 Apr. 2005, Vienna, Austria, 2005.
21. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. C02S03. DOI: 10.1029/2005JC003384.
22. Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Johannessen J. A., Campbell W. J., Gloersen P., Cavalieri D., Matzler C. Norwegian remote sensing experiment: Evaluation of the nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer for sea ice research // J. Geophysical Research. 1983. V. 88. No. C5. P. 2781–2791.
23. Teleti P. R., Luis A. J. Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing // Intern. J. Geosciences. 2013. V. 4. No. 7. P. 1031–1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.

The Kara Sea flaw polynya characteristics derived from satellite microwave measurements of sea ice concentration

E. V. Lvova, M. A. Zhivotovskaya, E. V. Zabolotskikh,
E. A. Balashova, S. V. Baranovskiy

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg 192007, Russia
E-mail: lvova317@gmail.com

The paper analyzes the characteristics of the polynyas of the Kara Sea for 15 years (from January 2003 to May 2019, excluding the 2011/2012 season) based on the sea ice concentration fields with a resolution of 6.25×6.25 km according to measurements of satellite microwave radiometers Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E) and Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2). Polynyas were identified visually in the fields of sea ice concentration, and their characteristics were determined semi-automatically using the tools of the GIS system — the Arctic Portal. Eight groups of polynyas of the Kara Sea are considered according to the regions of formation: Southeast Frantz Josef Land, Northern Novozemel'skaya, South Novozemel'skaya, Amderminkaya, Yamal'skaya, Ob'-Eniseiskaya, Central Karskaya, West Severozemel'skaya. During the observation period, 2109 polynyas were found. The average, maximum values of the areas were calculated and the average lifetime of the polynyas was determined. The results obtained indicate a change in the stability of polynyas formed near Novaya Zemlya in the southwestern part of the sea. In the dynamics of the areas, a positive trend was revealed, indicating an increase in the area of polynyas in the Kara Sea by 3.64 km^2 per year. The analysis of the characteristics of the sandy polynyas according to satellite observations allows us to consider the polynyas of the Kara Sea both as a permanent element of ice conditions, contributing to safe and low-cost navigation at sea, and as evidence of the ongoing climatic changes.

Keywords: Arctic Portal, flaw polynyas, Kara Sea, satellite passive microwave remote sensing

Accepted: 19.10.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-203-214

References

1. Bushuev A. V., *Sbor, obrabotka i analiz dannykh po l'du* (Gathering, processing and analysis of ice data), Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 1997, 386 p.
2. Zabolotskikh E. V., Khvorostovsky K. S., Balashova E. A., Azarov S. M., Kudryavtsev V. N., *Izmenchivost' morskogo l'da v Arktike po dannym Arkticheskogo portala* (Variability of sea ice in the Arctic according to the Arctic Portal), *Led i sneg*, 2020, Vol. 60, No. 2, pp. 239–250, DOI: 10.31857/S2076673420020037.
3. Zakharov V. F., *Morskie l'dy v klimaticheskoi sisteme* (Sea ice in the climate system), Saint Petersburg: Hydrometeoizdat, 1996, 213 p.
4. Zatsepin A. G., Morozov E. G., Paka V. T., Demidov A. N., Kondrashov A. A., Korzh A. O., Kremenetskii V. V., Poyarkov S. G., Solov'ev D. M., *Tsirkulyatsiya vod v yugo-zapadnoi chasti Karskogo morya v*

- sentyabre 2007 g. (Circulation in the southwestern part of the Kara Sea in September 2007), *Okeanologiya*, 2010, Vol. 5, pp. 683–697.
5. Ivanov V. V., Alekseev V. A., Alekseeva T. A., Koldunov N. V., Repina I. A., Smirnov A. V., Arkticheskii pokrov stanovitsya sezonnym? (Does Arctic Ocean ice cover become seasonal?), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 4, pp. 50–65, DOI: 10.7868/S0205961413040076.
 6. Karelin I. D., Zapripainye polyn'i Karskogo morya po dannym nablyudenii so sputnikov (Near-ice polynyas of the Kara Sea according to satellite observations), *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta*, 1977, Vol. 372, pp. 106–113.
 7. Karelin I. D., Karklin V. P., *Pripai i zapripainye polyn'i arkticheskikh morei sibirskogo shel'fa v kontse XX – nachale XI veka* (Fast ice and near-ice polynyas of the Arctic seas of the Siberian shelf at the end of the 20th – beginning of the 21st centuries), Saint Petersburg: Arctic and Antarctic Research Inst., 2012, 180 p.
 8. Kupetskii V. N., Statsionarnye polyn'i v zamerzayushchikh moryakh (Stationary polynyas in freezing seas), *Vestnik Leningradskogo universiteta*, 1958, Issue 12, pp. 172–184.
 9. Malinin V. N., Vainovsky P. A., O prichinakh pervogo potepleniya Arktiki v XX veke (On the causes of the first warming of the Arctic in the 20th century), *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2018, Vol. 53, pp. 34–55.
 10. Popov A. V., Karelin I. D., Rubenya A. V., Rol' zimnikh zapripainykh polynei v formirovanii ledovykh i gidrologicheskikh uslovii v moryakh Sibirskogo shel'fa v letnii period (The role of winter flaw polynya in the formation of ice and hydrological conditions in the seas of the Siberian shelf in the summer), *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2007, Vol. 32, No. 9, pp. 65–74.
 11. Smirnov V. G., *Sputnikovye metody opredeleniya kharakteristik ledyanogo pokrova morei* (Satellite methods for determining the characteristics of the ice cover of the seas), Saint Petersburg: Arctic and Antarctic Research Inst., 2011, 240 p.
 12. Surkova G. V., Sokolova L. A., Chichev A. R., Mnogoletnii rezhim ekstremal'nykh znachenii skorosti vetra v Barentsevom i Karskom moryakh (Long-term regime of extreme winds in the Barents and Kara seas), *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2015, Vol. 5, pp. 53–58.
 13. Tikhonov V. V., Raev M. D., Sharkov E. A., Boyarskii D. A., Repina I. A., Komarova N. Yu., Monitoring morskogo l'da polyarnykh regionov s ispol'zovaniem sputnikovoi mikrovolnovoi radiometrii (Polar sea ice monitoring using satellite microwave radiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 150–169.
 14. Shalina E. V., Bobylev L. P., Izmenenie ledovykh uslovii v Arktike soglasno sputnikovym nablyudeniya (Sea ice transformations in the Arctic from satellite observation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 28–41.
 15. Carsey F. D., *Microwave Remote Sensing of Sea Ice*, Washington DC: American Geophysical Union, 1992, 462 p.
 16. Cavalieri D. J., Gloersen P., Campbell W. J., Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR, *J. Geophysical Research*, 1984, Vol. 89, No. D4, pp. 5355–5369.
 17. Comiso J. C., Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations, *J. Geophysical Research*, 1986, Vol. 91, No. C1, pp. 975–994.
 18. Comiso J. C., Parkinson C. L., Gersten R., Stock L., Accelerated decline in the Arctic sea ice cover, *Geophysical Research Letters*, 2008, Vol. 35, No. L01703, DOI: 10.1029/2007GL031972.
 19. Martin S., Cavalieri D. J., Contribution of the Siberian Shelf Polynyas to the Arctic Ocean Intermediate and Deep Water, *J. Geophysical Research*, 1989, Vol. 94, No. C9, pp. 12725–12738.
 20. Popov A., Rubchenia A., Influence of Polynyas of Arctic Shelf on Arctic Oscillation Formation, *Papers of EGU General Assembly*, Arctic Hazard (NH-6.03), EGUGU05-A-2304, Vienna, Austria, 2005.
 21. Spreen G., Kaleschke L., Heygster G., Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels, *J. Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, No. C2, pp. 1–14, DOI: 10.1029/2005JC003384.
 22. Svendsen E., Kloster K., Farrelly B., Johannessen O. M., Johannessen J. A., Johannessen J. A., Campbell W. J., Gloersen P., Cavalieri D., Matzler C., Norwegian remote sensing experiment: Evaluation of the Nimbus 7 scanning multichannel microwave radiometer for sea ice research, *J. Geophysical Research*, 1983, Vol. 88, No. 5, pp. 2781–2791.
 23. Teleti P. R., Luis A. J., Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing, *Intern. J. Geosciences*, 2013, Vol. 4, No. 7, pp. 1031–1050, DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.