

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СРОКОВ УСТОЙЧИВОГО ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА БЕЛОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА 1980–2020 гг.

© 2025 г. В. Н. Баклагин

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия
e-mail: slava.bakalgin@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2025 г.

После доработки 11.05.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

Представлены результаты анализа данных натурных и спутниковых наблюдений за основными элементами ледового режима Белого моря в 1980–2020 гг. Выявлены общие закономерности многолетней изменчивости ледового режима Белого моря на фоне произошедших климатических изменений в рассматриваемый ряд лет, выполнена оценка достоверности используемых спутниковых данных путём сравнения их с данными натурных наблюдений.

Ключевые слова: характерные даты, ледовый режим, Белое море, данные натурных наблюдений, спутниковые данные

DOI: 10.7868/S2412376525030116

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно моря арктической зоны покрываются устойчивым ледяным покровом. Морской лёд — чувствительный индикатор изменения климата. Знания о формировании ледового режима на морях и озёрах, находящихся в пределах северного полярного круга, представляют большой интерес для исследователей, занимающихся оценкой динамики многолетней изменчивости климатических факторов (Comiso et al., 2007; Maslanik et al., 2011; Laliberté et al., 2016). Кроме того, определение закономерностей формирования ледового режима на морях имеет важное значение для решения научно-практических задач, связанных с морской деятельностью, рыбным промыслом, планированием навигационного периода, добычей полезных ископаемых, транспортировкой людей и грузов по установившемуся льду, а также оценкой теплообмена между океаном и атмосферой (Smith, Stephenson, 2013; Шалина, 2021).

Для получения данных о ледовой ситуации на морях применяются разные методы: наблюдения за состоянием ледяного покрова,

производимые на береговых станциях и постах, судовые наблюдения, ледовые авиаразведки, спутниковые наблюдения и т.п. Однако для оценки динамики ледовой ситуации на морях (особенно многолетней) неоспоримыми преимуществами по сравнению с другими методами имеют спутниковые наблюдения; они в значительной степени превосходят остальные методы по территориальному охвату, отличаются высокой регулярностью получения данных, а также возможностью проводить измерения вне зависимости от времени суток и облачности (Заболотских, 2019; Kern et al., 2020; Tschudi et al., 2020; Шалина, 2021).

На сегодняшний день, по мнению ряда исследователей (Спутниковые..., 2011; Йоханнессен и др., 2019; Alekseeva, 2019), для оценки многолетней изменчивости ледяного покрова морей Арктической зоны наиболее пригодны наборы данных пассивного микроволнового зондирования, которые активно используются на борту метеорологических спутников для мониторинга морского льда в Арктической зоне уже более 40 лет (Шалина и др., 2008; Cavalieri, Parkinson, 2012; Шалина, 2013; Stroeve, Notz,

2018). Эти наборы спутниковых данных о сплочённости льда являются лидирующими по накопленному объёму среди прочих, благодаря чему имеется возможность вычислять достоверные статистические показатели при определении закономерностей формирования ледового режима морей Арктической зоны. Несмотря на высказанные преимущества данных пассивного микроволнового зондирования, имеется их существенный недостаток — неточности применяемых алгоритмов дешифрирования в определении характеристик ледяного покрова, а именно сплочённости льда. К настоящему времени разработано множество алгоритмов для определения сплочённости морского льда Арктической зоны (Tikhonov, 2016). Поэтому проведено большое количество исследований, посвящённых критическому анализу использования этих алгоритмов. Они заключаются в сравнении данных микроволновых датчиков с другими типами данных: спутниковых данных более высокого разрешения (Meier, 2005; Pang et al., 2018), с картами морского льда (Tonboe et al., 2016), с судовыми наблюдениями (Knuth, Ackley, 2006; Spreen et al., 2008).

Последние подробные исследования анализа наборов спутниковых данных пассивного микроволнового зондирования представлены работой (Kern et al., 2020), где авторы выполнили сравнение результатов применения 10 алгоритмов, которые были объединены в четыре группы, для различных спутниковых данных с пространственным разрешением от 12.5 до 50 км. На основе сравнительного анализа исследователи заключили, что современные датчики микроволнового зондирования не позволяют отличить воду на поверхности морского льда от воды в протоках между ледовыми образованиями, и это неизбежно приводит к погрешностям в определении сплочённости льда — в период таяния используемые алгоритмы могут иметь ошибки до 45%. Заключено, что наиболее полный анализ характеристик ледяного покрова возможен только при использовании совокупности методов путём интеграции всех получаемых данных, которые взаимно дополняют друг друга, что подтверждается рядом исследований (Alekseeva, Frolov, 2013; Alekseeva et al., 2019). Например, с помощью данных наблюдений с береговых постов или судов на отдельных участках акватории исследуемого водоема можно корректировать и дополнять данные спутниковых наблюдений, которые в некоторых случаях имеют значительные

ошибки в определении сплочённости льда. Таким образом, данные натурных наблюдений в сочетании со спутниковыми данными могут использоваться для оперативного обеспечения различных видов хозяйственной деятельности в прибрежной, шельфовой зоне: судоходства, рыбного промысла, разведки и добычи нефти и газа и др.

Объект исследования — Белое море, это внутреннее море Северного Ледовитого океана, расположенное на севере европейской части России; оно занимает пространство между 63°47' с.ш. (Онежский залив) и 68°40' с.ш. (Канин Нос) (рис. 1).

Белое море — один из важнейших объектов с точки зрения физических, климатических и экологических исследований. Изучение межгодового и межсезонного изменения ледового режима Белого моря — необходимое исследование всего арктического региона, поэтому многие исследователи уделяют особое внимание изучению ледовых явлений, происходящих на акватории этого моря. В предшествующих работах, посвящённых изучению ледового режима Белого моря, использованы данные дистанционного зондирования земли и ледовых авиаразведок (Гидрометеорология..., 1991), в том числе и данные пассивного микроволнового зондирования (Filatov et al., 2005; Баклагин, 2022), а также данные прибрежных ледовых наблюдений станций сети Росгидромета (Думанская, 2004, 2014). При этом в последнее время нарастает интерес к исследованиям ледового режима Белого моря в аспекте его многолетней изменчивости в условиях меняющегося климата (Filatov et al., 2005; Баклагин, 2022). Этому способствует внушительный объём накопленных данных спутниковых наблюдений. Однако, как было указано выше, ввиду несовершенства применяемых дешифрирующих алгоритмов в определении сплочённости льда подобные исследования требуют уточнений и проверки данными натурных наблюдений, которые обладают высокой достоверностью. В связи с этим цель настоящего исследования — анализ многолетней изменчивости основных элементов ледового режима Белого моря по данным пассивного микроволнового зондирования и натурных наблюдений с пунктов морских гидрометеорологических станций за период 1980—2020 гг.; кроме того, задача исследования заключается в оценке достоверности используемых спутниковых данных путём сравнения их с данными натурных наблюдений.

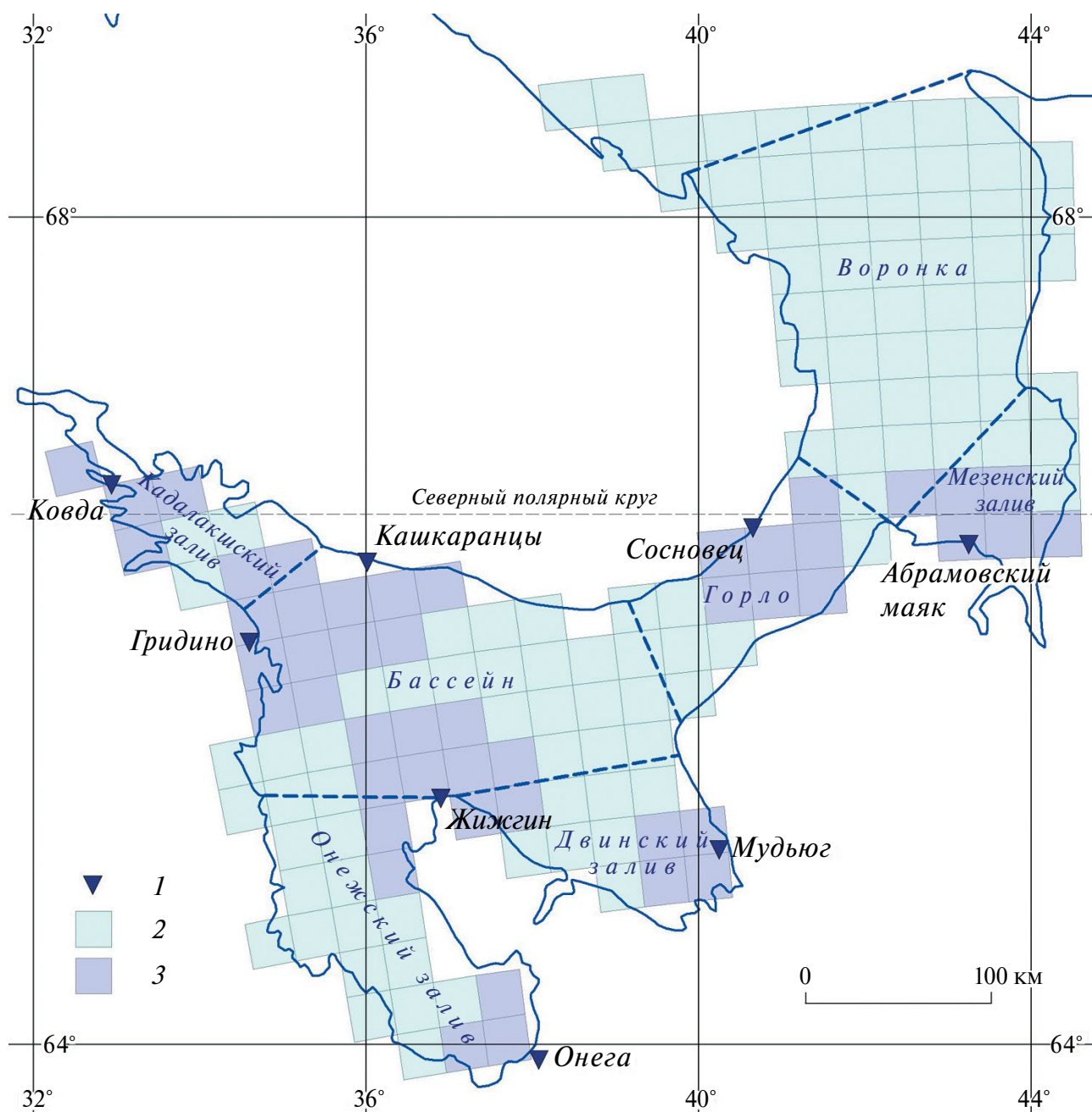


Рис. 1. Схема расположения выбранных пунктов морских наблюдений Росгидромета на побережье Белого моря и ячейки спутниковых данных близлежащих районов акватории: 1 – пункты морских наблюдений; 2 – ячейки спутниковых данных; 3 – ячейки спутниковых данных вблизи пунктов морских наблюдений

Fig. 1. Layout of selected Russian meteorological service marine observation points on the White Sea coast and satellite data cells of nearby areas of the water area: 1 – marine observation points; 2 – satellite data cells; 3 – satellite data cells near marine observation points

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Данные натурных наблюдений. В качестве данных натурных наблюдений для формирования рядов основных элементов ледового режима моря (сроков наступления характерных фаз ледовых явлений и их продолжительности)

в работе использованы данные регулярного гидрометеорологического государственного мониторинга с пунктов морских наблюдений, осуществлявшегося организациями Росгидромета на акватории Белого моря в 1980–2020 гг. На основании этих данных сформированы временные

ряды дат устойчивого ледообразования, окончательного замерзания и полного очищения ото льда. За дату начала устойчивого ледообразования принимался день, начиная с которого ледообразование происходило непрерывно в течение не менее 30 суток, за исключением перерывов, связанных с оттепелью (2 суток) и ветровыми явлениями (3 суток). За дату окончательного замерзания принимали день, когда вся акватория покрывалась припаем, который в дальнейшем фиксировался не менее 30 дней. За дату окончательного очищения ото льда принимался день, когда объект впервые становился абсолютно безлёдным на срок не менее 30 суток (Наставление..., 2017).

В работе использованы данные пунктов морских наблюдений, которые в совокупности позволяют равномерно охватить всю прибрежную часть акватории Белого моря; они территориально расположены на Кольском полуострове, в Республике Карелия и Архангельской области и включают морские гидрометеорологические станции 2-го разряда (МГ-2) и морские гидрометеорологические посты 1-го разряда (МГП-1). Эти сведения были получены на договорной основе ФГБУ “Мурманское УГМС” и ФГБУ “Северное УГМС” (табл. 1).

Спутниковые данные микроволнового пассивного зондирования. В работе использованы данные спутникового микроволнового пассивного

зондирования, предоставляемые Национальным центром данных по снегу и льду (NSIDC) (NSIDC..., 2025), которые активно применяются исследователями для оценки многолетней изменчивости ледового режима морей Северного Ледовитого океана (Filatov et al., 2005; Tikhonov et al., 2016; Tschudi et al., 2020; Баклагин, 2022). Этот набор данных получен на основе интерпретации значений спектральной яркости спутниковых данных алгоритмом дешифрирования NASA Team (Cavalieri et al., 1999). Как уже отмечалось, это единственный набор спутниковых данных, который включает в себя ряд наблюдений более 40 лет и является оптимальным для анализа многолетней изменчивости основных элементов ледового режима Белого моря. Кроме того, внушительный объём данных этого набора позволяет провести сравнительный анализ с данными многолетних натурных наблюдений и установить статистически подтверждённые связи между данными с целью оценки достоверности данных спутниковых наблюдений.

Используемые наборы данных (G02135) спутниковых измерений доступны в виде осреднённых за день полей сплочённости льда в полярной стереографической проекции с размером ячейки 25×25 км. При этом используется проекционная плоскость, касательная к поверхности Земли на широте 70°; это означает, что ячейки сетки на данной широте точно равны номинальному раз-

Таблица 1. Пункты морских наблюдений Росгидромета на акватории Белого моря

№ п/п	Название пунктов наблюдений	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.	Район Белого моря	Принадлежность поста
<i>Кольский полуостров</i>					
1	МГ-2 Сосновец	66.48	40.68	Воронка	ФГБУ “Северное УГМС”
2	МГП-1 Кашкаранцы	66.33	36.02	Бассейн	ФГБУ “Мурманское УГМС”
<i>Республика Карелия</i>					
3	МГ-2 Ковда	66.70	32.88	Кандалакшский залив	ФГБУ “Мурманское УГМС”
4	МГ-2 Гридино	65.90	34.77	Бассейн	ФГБУ “Северное УГМС”
<i>Архангельская область</i>					
5	МГ-2 Онега	63.90	38.12	Онежский залив	ФГБУ “Северное УГМС”
6	МГ-2 Жижгин	65.20	36.82	Бассейн	ФГБУ “Северное УГМС”
7	МГ-2 Мудьюг	64.85	40.28	Двинский залив	ФГБУ “Северное УГМС”
8	МГ-2 Абрамовский Маяк	66.38	43.25	Мезенский залив	ФГБУ “Северное УГМС”

решению сетки. Благодаря использованию такой проекции для широт ($63\text{--}68^\circ$ с.ш.), в которых располагается объект данного исследования — Белое море, происходит незначительное искажение сетки (1–3%). Это обеспечит высокую точность расчётов сравнительного анализа между данными спутниковых измерений в ячейках, соответствующих местам расположения пунктов морских наблюдений Росгидромета.

Данные о сплочённости морского льда доступны с октября 1978 по август 1987 г. с временным разрешением 2 суток. Они были получены радиометром Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) Nimbus-7. Начиная с августа 1987 г. данные предоставляются с временным разрешением 1 сутки. Для их получения задействованы серии радиометров Special Sensor Microwave Imager (SSM/I) и радиометров Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) на спутниках оборонной метеорологической спутниковой программы (DMSP). Входные данные о морском льде создаются с использованием алгоритма NASA Team Algorithm (Cavalieri et al., 1999).

Методика формирования временных рядов характерных дат ледового режима Белого моря на основании спутниковых данных определена опытным путём на основе анализа временного ряда сплочённости льда. В работе принималось, что дата, соответствующая началу устойчивого ледообразования, наступает в день, начиная с которого значение сплочённости в заданной ячейке или группе ячеек превышает $I_{\text{крит п.л.}}$ в течение не менее 10 суток; дата, соответствующая окончательному замерзанию, — в день, с которого значение сплочённости в заданной ячейке или группе ячеек превышает $I_{\text{крит л.}}$ в течение не менее 10 суток; дата, соответствующая началу полного очищения ото льда, — в день, с которого значение сплочённости в заданной ячейке или группе ячеек становится менее чем $I_{\text{крит о.л.}}$ в течение не менее 10 суток. Во избежание дополнительных ошибок, связанных с неточностью в определении сплочённости, значения $I_{\text{крит п.л.}}$, $I_{\text{крит л.}}$, $I_{\text{крит о.л.}}$ принимались равными 15, 80 и 15% соответственно; данные значения были выбраны на основе сравнения набора данных NSIDC G02135 с набором данных университета Бремена, которые обладают более высоким пространственным разрешением (3.125 км) СВЧ-радиометров AMSR-E/AMSR2. Сравнительный анализ показал, что среднее значение абсолютного отклонения сплочённости льда этих двух наборов за

период 2002–2020 гг. составляет 5.29% (Баклагин, 2022).

Методика сравнения данных спутниковых и натурных наблюдений. В работе выполнен сравнительный анализ временных рядов сроков наступления характерных дат ледового режима (даты устойчивого ледообразования и полного очищения ото льда) за период 1980–2020 гг., полученных в каждом из приведённых пунктов морских наблюдений Росгидромета (см. табл. 1) и для всей акватории моря путём осреднения по всем перечисленным выше пунктам и рассчитанных по данным спутниковых наблюдений для частей акватории Белого моря в ячейках спутниковых данных, которые находятся вблизи мест расположения каждого из перечисленных пунктов наблюдения. Найдено несколько (3–10) ячеек спутниковых данных, являющихся близлежащими для каждого из рассматриваемых наблюдательных пунктов (см. рис. 1). Несмотря на то, что выбранные ячейки покрывают большую часть акватории, чем попадает в радиус обзора наблюдателя, это позволит исключить сильное влияние ошибок, возникающих в некоторых конкретных ячейках спутниковых данных (например, находящихся на границе береговой линии), при определении сплочённости льда вблизи рассматриваемого поста наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе временных рядов характерных дат ледового режима Белого моря для восьми пунктов морских наблюдений (см. табл. 1), а также в результате обработки временных рядов сплочённости льда в ячейках спутниковых данных, соответствующих на местности участкам акватории моря вблизи постов наблюдений, рассчитаны среднестатистические характерные даты ледового режима (табл. 2). По данным натурных наблюдений установлено, что образование льда на акватории моря начинается в среднем во второй декаде ноября — декабре, дружность составляет 72 суток. Обычно ледовые образования сначала начинают формироваться в Двинском и Онежском заливах, позднее — в Кандалакшском и Мезеньском заливах и далее — в Басейне и Горле Белого моря (рис. 2). При раннем и устойчивом похолодании в отдельные годы ледяной покров начинает формироваться во второй половине октября (на отдельных участках акватории Белого моря), в начале ноября в среднем по акватории моря (1980, 1990,

Таблица 2. Среднестатистические даты основных фаз ледового режима Белого моря за период 1980–2020 гг. по данным натурных и спутниковых наблюдений

Пункт морских наблюдений / территория близлежащих ячеек спутниковых данных	Натурные наблюдения			Спутниковые наблюдения		
	Устойчивое ледообразование	Окончательное замерзание	Полное очищение от льда	Устойчивое ледообразование	Окончательное замерзание	Полное очищение от льда
МГ-2 Сосновец	28.12	нб 100%	10.05	25.12	нб 73%	20.05
МГП-1 Кашкаранцы	25.11	нб 100%	10.05	15.01	нб 53%	05.05
МГ-2 Ковда	10.12	10.01 (нб 12%)	09.05	01.10	22.01 (нб 8%)	30.06
МГ-2 Гридино	12.12	нб 86%	12.05	15.01	нб 63%	04.05
МГ-2 Онега	15.11	13.12	02.05	01.10	12.01 (нб 20%)	29.06
МГ-2 Жижгин	18.12	нб 100%	09.05	08.01	нб 75%	04.05
МГ-2 Мудьюг	07.11	нб 75%	11.05	28.12	нб 45%	06.05
МГ-2 Абрамовский Маяк	01.12	нб 100%	10.05	09.12	нб 70%	12.05
Белое море (осредненное по вы- бранным пунктам)	02.12	—	09.05	22.12	—	11.05

Примечание. нб % – процентное соотношение лет без окончательного замерзания от общего периода (40 лет).

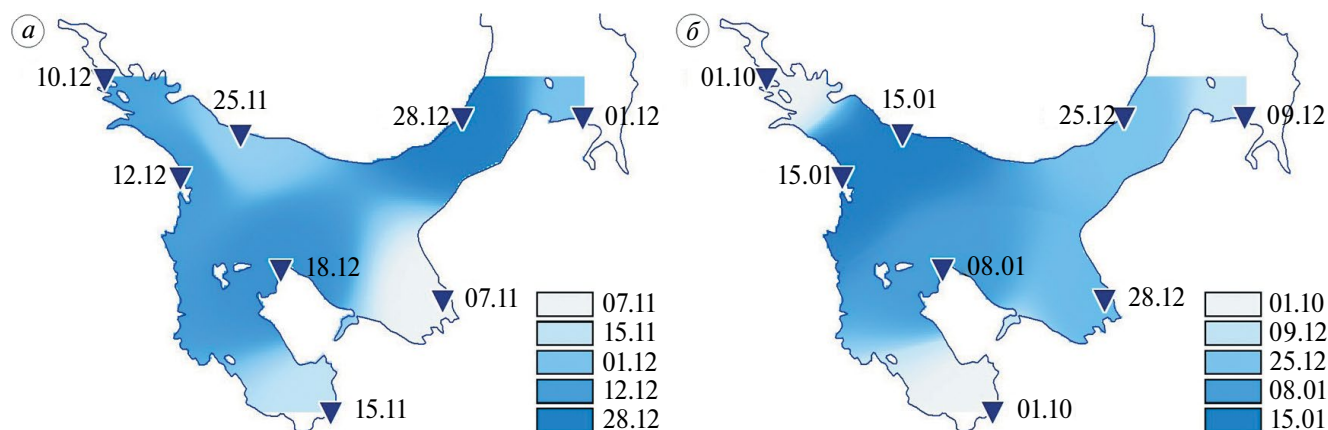
**Рис. 2.** Среднестатистические даты устойчивого ледообразования на Белом море за период 1980–2020 гг. по данным наблюдений морских гидрометеорологических станций и постов (а) и спутниковых СВЧ-радиометров (б)

Fig. 2. Average statistical dates of start freezing the White Sea for the period 1980–2020 based on in-situ (a) and satellite (b) observations

1992–1994, 2002 гг.). В тёплые зимы (2005/06 г.) начало формирования ледяного покрова наблюдалось в среднем по акватории моря 02.01.2006 – с 01.12.2005 по 18.01.2006 г. по данным восьми пунктов. А в районе Воронки Белого моря – в зимний период 2007/08 г. ледообразование началось лишь 16.02.2008 г.

По данным спутниковых наблюдений начало образования льда в целом фиксируется значительно позже, чем по данным натурных наблюдений, – в среднем для всей акватории Белого моря на 19 суток. Следует отметить, что на участках акватории Белого моря вблизи пунктов наблюдений МГ-2 Ковда (Кандалакшский залив)

и МГ-2 Онега (Онежский залив) за весь 40-летний период появление льда фиксируется в одну и ту же дату — 01.10, причём ежегодно изменение сплочённости льда в период ледообразования имеет скачкообразный характер (в указанную дату) от 0 до 25–35%, тогда как на остальных участках акватории моря увеличение сплочённости в период формирования льда происходит плавно. Данный факт несомненно представляет ошибку в определении сплочённости морского льда и может быть объяснён некорректной работой дешифрирующих алгоритмов NASA Team, используемых при формировании наборов данных NSIDC. В первую очередь это обусловлено ошибками, возникающими при классификации пикселей (вода/лёд), ввиду довольно грубого воспроизведения форм береговой линии узких и мелководных заливов из-за используемого низкого пространственного разрешения (25 км), что также отмечается в работах (Kern, 2019, 2020; Баклагин, 2022). Кроме того, скачкообразный вид изменений значений сплочённости льда в акваториях Кандалакшского и Онежского заливов может быть объяснён тем, что каждый датчик и орбита космического аппарата, используемого при получении данных, немного отличаются друг от друга, поэтому параметры алгоритма иногда требуют корректировки в так называемых связующих точках, чтобы временной ряд был согласованным. Несоответствия могут быть отмечены внезапными ложными скачками или падениями значений сплочённости льда в точке, когда алгоритм начал использовать данные с нового прибора (Cavalieri et al., 1999; Cavalieri et al., 2011; Meier et al., 2011).

Анализ данных натурных и спутниковых наблюдений показал, что в течение зимнего периода большая часть площади акватории Белого моря не покрывается сплошным ледяным покровом, что, вероятнее всего, связано с особенностями рельефа дна и передачей тепла через воды Баренцева моря, а также сильными ветровыми явлениями, возникающими над акваторией Белого моря, которые не дают ледовым образованиям схватиться. По данным натурных наблюдений (см. табл. 2), полное замерзание акватории ежегодно происходит только в самом мелководном Онежском заливе (по данным спутниковых наблюдений — в 82% случаев) к середине декабря, в отдельные годы (1987, 1998, 2016 г.) — в середине ноября и в 88% случаев в вершине Кандалакшского залива (по данным спутниковых наблюдений — 95% случаев) в первой половине января. Полное замерзание

акватории в вершине Кандалакшского залива не наблюдалось в 1991/92, 1992/93, 2003/04, 2016/17, 2019/20 гг. Таким образом, полное смерзание водной поверхности, как правило, происходит в менее глубоководных районах моря. В отдельные годы (в 25% случаев по данным натурных наблюдений, в 55% — по данным спутниковых наблюдений) происходит смерзание мелководных участков Двинского залива, в единичных случаях (по данным натурных наблюдений, 12% — 1981, 1985, 1986, 1998, 2001 гг., по данным спутниковых наблюдений, — 38%), в холодные зимы, отмечается покрытие ледяным покровом участков в северо-западной части Бассейна Белого моря.

Очищение ото льда акватории Белого моря, согласно данным натурных наблюдений, происходит, как правило, в первой декаде мая (причём оно происходит более дружно — 10 суток, нежели формирование ледяного покрова в мелководных районах моря), среднестатистическая дата очищения Белого моря — 9 мая. В первую очередь ото льда освобождается акватория Онежского залива, позднее — акватории Мезеньского, Кандалакшского и Двинского заливов (см. рис. 3, табл. 2).

При раннем и устойчивом потеплении полное освобождение ото льда водной поверхности происходит уже во второй половине апреля (2015, 2016, 2019, 2020 гг.), при затяжных и холодных вёснах — в конце мая — начале июня (1981, 1985 гг.). Данные спутниковых наблюдений по срокам очищения моря ото льда (среднестатистическая дата — 11 мая) хорошо согласуются с данными натурных наблюдений за исключением частей акватории Белого моря в районах Кандалакшского и Онежского заливов. Как и в случае определения сроков появления льда, сроки полного очищения ото льда участков акватории Белого моря близи пунктов наблюдений МГ-2 Ковда (Кандалакшский залив) и МГ-2 Онега (Онежский залив) практически за весь ряд лет ежегодно фиксируются в один день — 30 июня, что является ошибочным по упомянутым выше причинам.

Средняя продолжительность ледовых явлений, согласно данным натурных наблюдений, на Белом море колеблется от 124 до 193 суток (среднестатистическое значение — 158 суток), наибольшая продолжительность (208–223 суток) наблюдалась на акватории моря в зимний период 1980/81 г. (Мезеньский и Двинский заливы), наименьшая (98–154 суток) в зиму 2005/06 г., в Горле в 2007/08 г. (65 суток). По данным

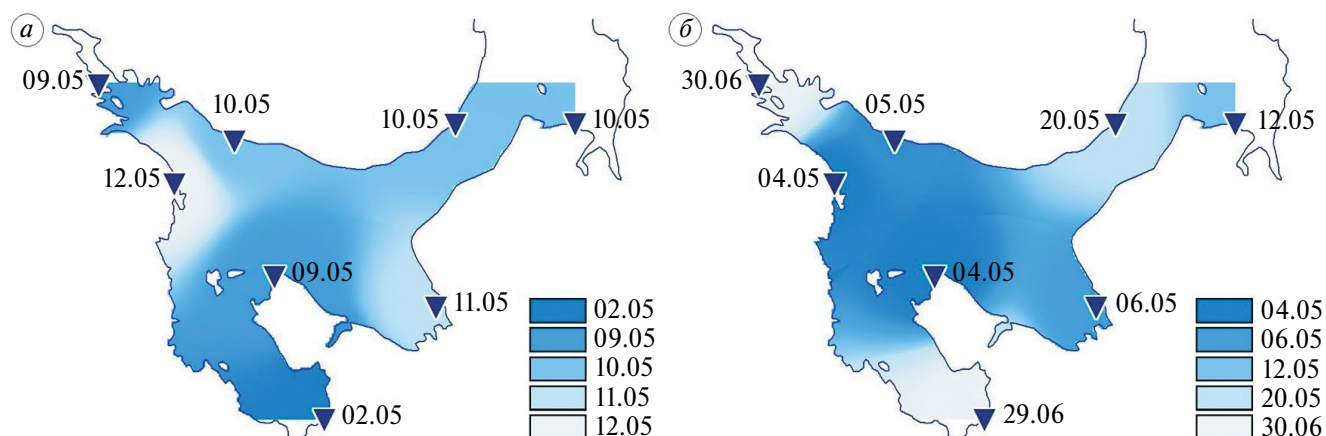


Рис. 3. Среднестатистические даты полного очищения ото льда Белого моря за период 1980–2020 гг. по данным наблюдений морских гидрометеорологических станций и постов (а) и спутниковых СВЧ-радиометров (б)

Fig. 3. Average statistical dates of ice breakup the White Sea for the period 1980–2020 based on in-situ (a) and satellite (b) observations

спутниковых наблюдений, средняя продолжительность ледовых явлений на Белом море составляет 142 суток (за рассматриваемый ряд лет — колебания от 84 до 196 суток).

Регрессионный анализ временных рядов осреднённых для всей акватории Белого моря характерных дат ледового режима (устойчивое ледообразование и полное очищение ото льда), рассчитанных по данным как натурных, так и спутниковых наблюдений, показал, что в исследуемый ряд лет (1980–2020 гг.) имеет значение *p-value*, который во всех случаях ниже заданного уровня значимости (5%), что свидетельствует о статистически значимых линейных трендах (табл. 3).

Регрессионный анализ данных натурных наблюдений показал, что сроки устойчивого ледообразования за последний ряд лет на 29 суток (практически на месяц) сдвинулись в сторону зимних месяцев. Сдвиг происходил со средней скоростью 7.4 сут/10 лет (см. рис. 4 и табл. 3), что в наибольшей степени связано с происходящими климатическими изменениями. Сроки

очищения акватории ото льда за последний ряд лет на 18 суток сдвинулись также в сторону зимних месяцев. Сдвиг происходил со средней скоростью 4.7 сут/10 лет (см. рис. 5 и табл. 3). В целом, за последние 40 лет средняя продолжительность ледовых явлений на Белом море уменьшилась на 47 суток, практически на полтора месяца, уменьшение количества дней происходило со скоростью 12 сут/10 лет (см. рис. 6 и табл. 3).

Регрессионный анализ данных спутниковых наблюдений показал, что сдвиг сроков начала ледообразования в сторону зимних месяцев происходит со скоростью 11.9 сут/10 лет (см. рис. 4; табл. 3), а сдвиг сроков очищения — со скоростью 4.1 сут/10 лет (см. рис. 5; табл. 3). При этом продолжительность ледовых явлений на Белом море сократилась на 62 суток (два месяца) за 40 лет (см. рис. 6).

Очевидно, что в период 1980–2020 гг. на Белом море имеет место тенденция сдвига сроков устойчивого ледообразования и очищения его акватории ото льда в сторону зимних месяцев,

Таблица 3. Параметры регрессионного анализа среднестатистических характерных дат ледового режима Белого моря за период 1980–2020 гг.

Фаза	Натурные наблюдения		Спутниковые наблюдения	
	Тренд, сут×год ⁻¹	<i>p-value</i>	Тренд, сут×год ⁻¹	<i>p-value</i>
Устойчивое ледообразование	0.74±0.35	0.0001	1.19±0.38	0.0000
Полное очищение	−0.47±0.23	0.0002	−0.41±0.30	0.0002
Продолжительность периода с ледовыми явлениями	−1.21±0.40	0.0000	−1.60±0.52	0.0000

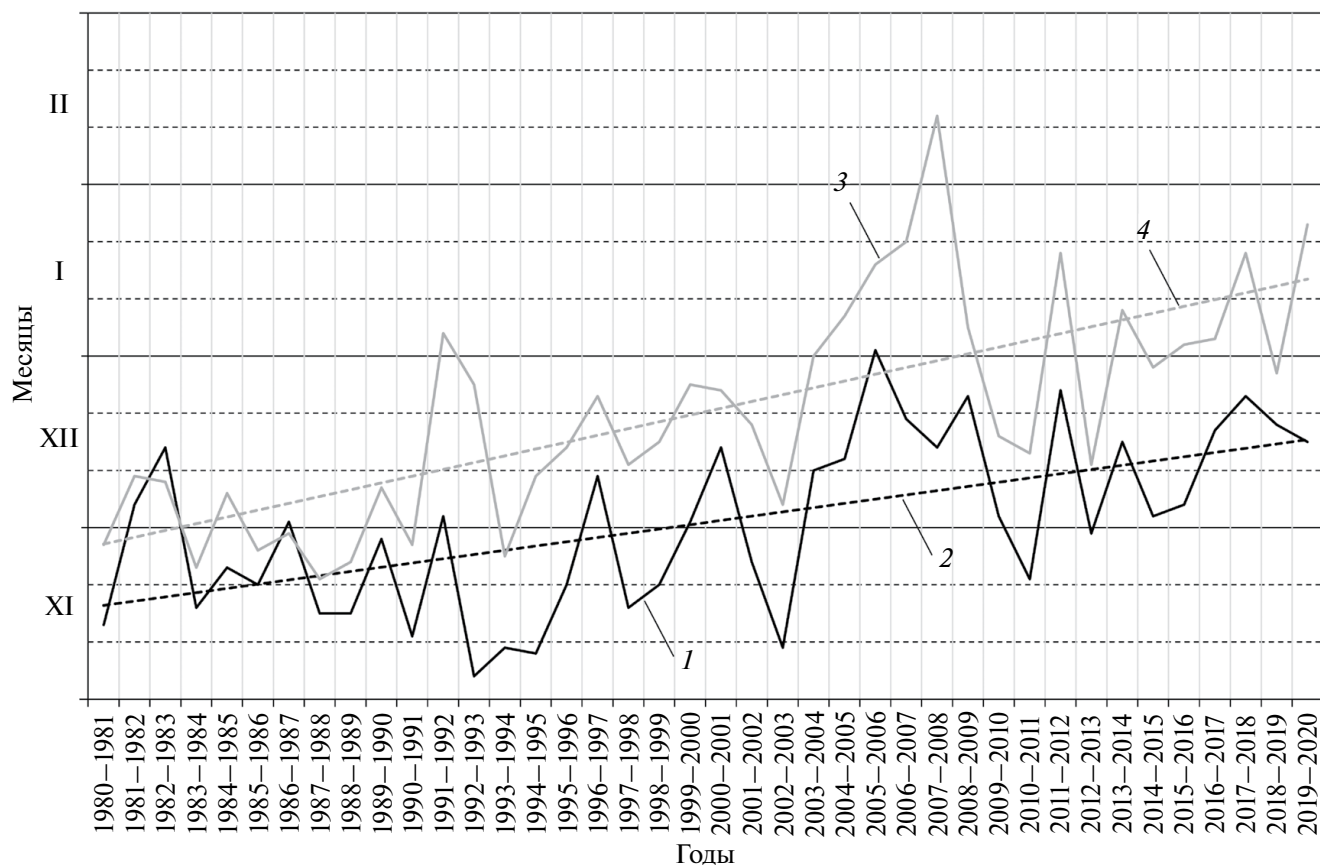


Рис. 4. Многолетняя изменчивость средних сроков устойчивого ледообразования на Белом море (1980–2020 гг.): 1 – даты по данным натурных наблюдений, 2 – линейная регрессия по данным натурных наблюдений, 3 – даты по данным спутниковых наблюдений, 4 – линейная регрессия по данным спутниковых наблюдений

Fig. 4. Long-term variability of the average dates of start freezing the White Sea (1980–2020): 1 – dates based on in situ observations, 2 – linear regression based on in situ observations, 3 – dates based on satellite observations, 4 – linear regression based on satellite observations

вследствие чего прослеживается динамика по уменьшению продолжительности ледовых явлений, что в целом согласуется с гипотезой о влиянии потепления климата на формирование ледового режима водных объектов Арктической зоны России. Об этом свидетельствуют результаты проведённых расчётов с использованием данных как натурных, так и спутниковых наблюдений. При этом, несмотря на существенные различия (средние значение абсолютных отклонений колеблются от 10 до 70 суток), в определении характерных дат ледового режима Белого моря, по данным натурных и спутниковых наблюдений, временные ряды характерных дат ледового режима хорошо согласуются друг с другом (коэффициенты парной корреляции составляют 0.76 и 0.82 для акватории Белого моря соответственно для фаз устойчивого ледообразования и окончательного очищения ото льда) (табл. 4),

что допускает возможность использования данных спутниковых наблюдений для определения тенденций многолетней изменчивости ледового режима Белого моря.

Отмечены низкие значения коэффициентов корреляции временных рядов характерных дат ледового режима акваторий Онежского и Кandalакшского заливов Белого моря, очевидно, связанные с указанными выше причинами. Рассматриваемые районы акватории Белого моря наиболее проблемны с точки зрения использования данных спутникового микроволнового пассивного зондирования NSIDC для оценки ледовой ситуации. Кроме того, самые высокие значения коэффициентов корреляции (0.48–0.77) отмечены для групп ячеек спутниковых данных, имеющих в своём составе большее количество ячеек (вблизи пунктов наблюдения МГ-2 Абрамовский маяк, МГ-2 Мудьюг, МГ-2 Жижгин).

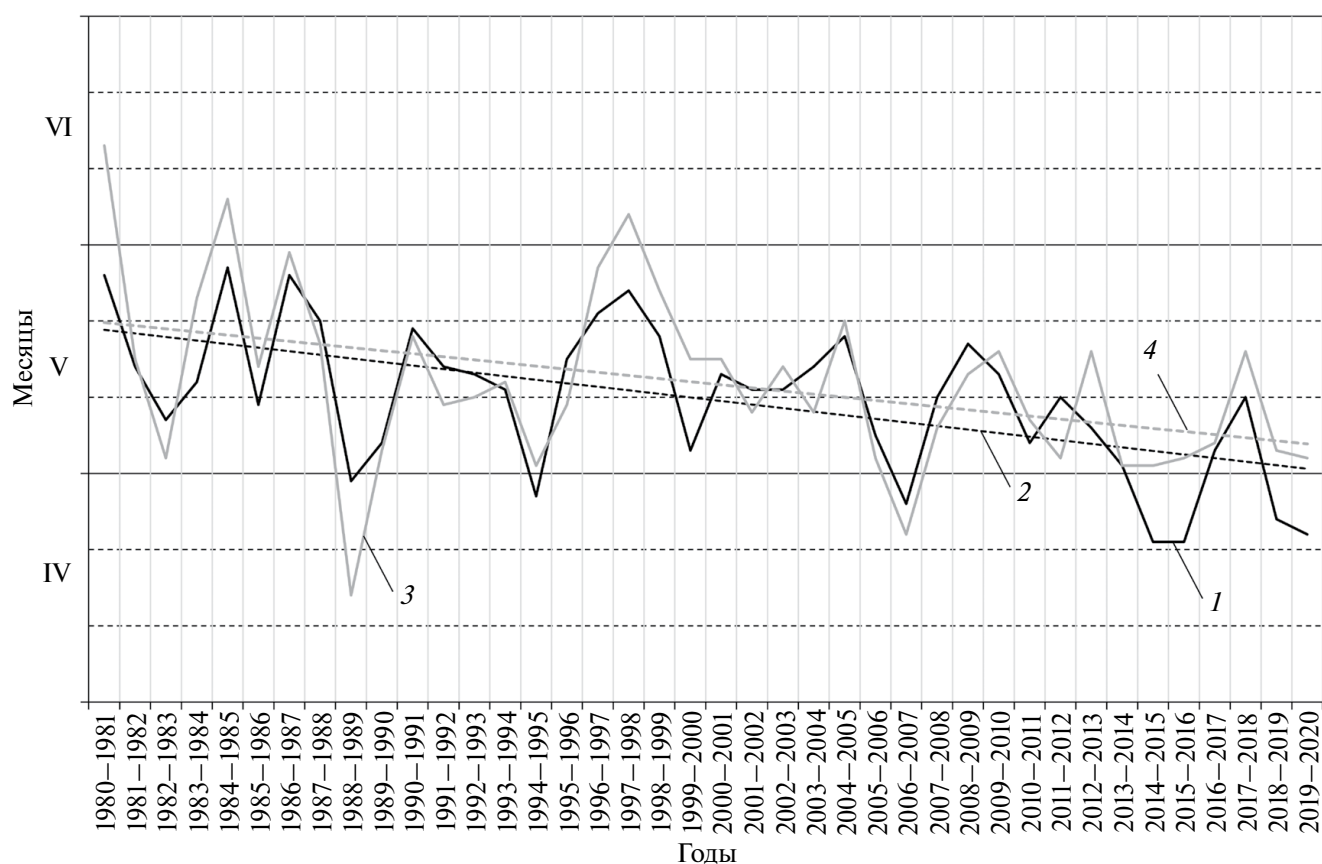


Рис. 5. Многолетняя изменчивость средних сроков полного очищения ото льда акватории Белого моря (1980–2020 гг.): 1 – даты по данным натурных наблюдений, 2 – линейная регрессия по данным натурных наблюдений, 3 – даты по данным спутниковых наблюдений, 4 – линейная регрессия по данным спутниковых наблюдений

Fig. 5. Long-term variability of the average dates of ice breakup the White Sea (1980–2020): 1 – dates based on in situ observations, 2 – linear regression based on in situ observations, 3 – dates based on satellite observations, 4 – linear regression based on satellite observations

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований многолетней изменчивости ледового режима Белого моря показали, что за период 1980–2020 гг. наблюдается сокращение продолжительности ледовых явлений со скоростью 12/16 суток за 10 лет по данным натурных и спутниковых наблюдений соответственно, что согласуется с гипотезой о влиянии потепления климата на формирование ледового режима водных объектов Арктической зоны. (Шалина, 2013, 2021). При этом сокращение продолжительности периода ледовых явлений происходит в равной степени за счёт сдвигов как сроков устойчивого ледообразования (7.4/11.9 суток за 10 лет), так и сроков полного очищения акватории моря ото льда в сторону зимних месяцев (4.7/4.1 суток за 10 лет).

Кроме того, сравнительный анализ данных натурных и спутниковых наблюдений (микро-

волнового пассивного зондирования – набор G02135 NSIDC) показал, что несмотря на существенные различия средних значений абсолютных отклонений (до 70 суток) в определении характерных дат ледового режима Белого моря временные ряды характерных дат хорошо согласуются друг с другом (коэффициенты парной корреляции 0.76/0.82 для временных рядов сроков начала ледообразования и окончательного замерзания). Этот факт позволяет сделать заключение о том, что данные спутникового микроволнового пассивного зондирования можно использовать лишь в отдельных случаях, если необходима оценка ледовой обстановки в определённом районе моря, но по какой-то причине отсутствуют данные натурных наблюдений. Однако эти данные наряду с данными натурных наблюдений имеют большое практическое применение в качестве информационной осно-

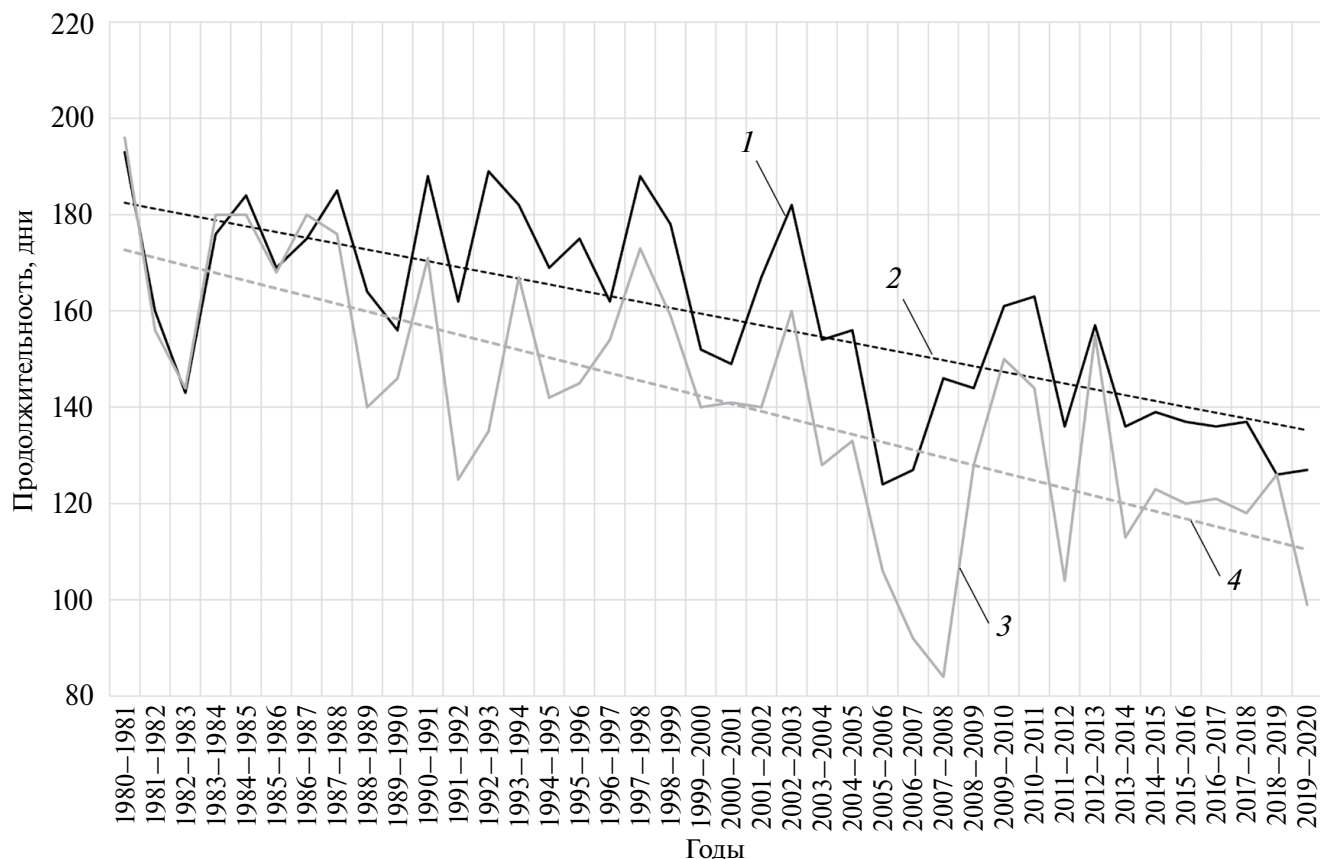


Рис. 6. Многолетняя изменчивость средней продолжительности ледовых явлений на Белом море (1980–2020 гг.): 1 – значения по данным натурных наблюдений, 2 – линейная регрессия по данным натурных наблюдений, 3 – значения по данным спутниковых наблюдений, 4 – линейная регрессия по данным спутниковых наблюдений

Fig. 6. Long-term variability of the average duration of ice phenomena in the White Sea (1980–2020): 1 – values based on in situ observations, 2 – linear regression based on in situ observations, 3 – values based on satellite observations, 4 – linear regression based on satellite observations

Таблица 4. Коэффициенты парной корреляции между временными рядами характерных дат ледового режима Белого моря по данным натурных и спутниковых наблюдений

Пункт морских наблюдений	Фазы ледового режима	
	Устойчивое ледообразование	Полное очищение ото льда
МГ-2 Сосновец	0.58	0.62
МГП-1 Кашкаранцы	0.50	0.53
МГ-2 Ковда	0.24	0.11
МГ-2 Гридино	0.68	0.56
МГ-2 Онега	–0.10	–0.07
МГ-2 Жижгин	0.72	0.73
МГ-2 Мудьюг	0.48	0.62
МГ-2 Абрамовский Маяк	0.64	0.77
Белое море (осреднённое значение по выбранным пунктам наблюдений)	0.76	0.82

вы для расчётов режимных показателей протекания ледовых явлений за многолетний период с целью выявления закономерностей развития ледовых процессов, оценки их климатических тенденций и разработки методов прогноза ледовых условий.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания № FMEN-2021-0004. Автор выражает благодарность сотрудникам ИВПС КарНЦ РАН: ведущему гидрологу Наталье Ивановне Махальской за консультативную помощь в подготовке материалов, а также главному специалисту по НТИ Ольге Владимировне Дерусовой за подготовку картографических материалов.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the theme of the state assignment № FMEN-2021-0004. The author expresses gratitude to the staff of the Northern Water Problems Institute Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences: leading hydrologist Natalia Makhalskaya for advisory assistance in preparing materials and chief specialist for NТИ Olga Derusova for preparing cartographic materials.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баклагин В.Н. Многолетняя изменчивость сплочённости льда Белого моря по спутниковым данным // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 579–590. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040153>
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Вып. 1 / Ред. Б.Х. Глуховский. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 241 с.
- Думанская И.О. Анализ изменчивости положения кромок дрейфующего льда и максимальной ледовитости Белого моря // Тр. Гидрометцентра России. 2004. Вып. 339. С. 45–54.
- Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. Обнинск: Изд-во ИГ–СОЦИН, 2014. 608 с.
- Заболотских Е.В. Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515551128-151>
- Йоханнессен О.М., Александров В.Ю., Фролов И.Е., Сандвен С., Петтерссон Л.Х., Бобылев Л.П., Клостер К., Смирнов В.Г., Миронов Е.У., Бабич Н.Г. Научные исследования в Арктике. Т. 3. Дистанционное зондирование морских льдов на северном морском пути: изучение и применение. СПб.: Наука, 2007. 512 с.
- Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Ред. В.Г. Смирнов. СПб.: АНИИ, 2011. 240 с.
- Наставление гидрометеорологическим станциям и постам РД 52.10.842-2017. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Ч. I. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. М.: ООО “Изд-во ИТРК”, 2017. 385 с.
- Шалина Е.В. Региональные особенности изменения ледовой обстановки в морях российской Арктики и на трассе Северного морского пути по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 201–213. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-201-213>
- Шалина Е.В. Сокращение ледяного покрова Арктики по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 328–336.
- Шалина Е.В., Йоханнессен О.М., Бобылев Л.П. Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования с 1978 по 2007 год // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. Вып. 5. С. 228–223.
- Alekseeva T.A., Frolov S.V. Comparative analysis of satellite and shipborne data on ice cover in the Russian Arctic seas // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013. V. 49. P. 879–885. <https://doi.org/10.1134/S000143381309017X>
- Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data // Remote Sensing. 2019. V. 11. 2481. <https://doi.org/10.3390/rs11212481>
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // The Cryosphere. 2012. № 6. P. 881–889. <https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012>
- Cavalieri D., Parkinson C., DiGirolamo N., Ivanov A. Inter-sensor calibration between F13 SSM/I and F17 SSMIS for global sea ice data records // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2011. № 9 (2). P. 233–236. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2166754>
- Cavalieri D., Parkinson C., Gloersen P., Comiso J., Zwally H.J. Deriving Long-term Time Series of Sea Ice Cover from Satellite Passive-microwave Multisensor Data Sets // J. Geophys. Res. 1999. № 104 (C7). P. 15803–15814.

- Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L.* Accelerated decline in the Arctic sea ice cover // *Geophys. Research Letters*. 2007. V. 34. L01703. <https://doi.org/10.1029/2007/GL031972>
- Filatov N.N., Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M., Pettersson L.H.* White Sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005. 463 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-27695-5>
- Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set inter-comparison for Arctic summer conditions // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. P. 2469–2493. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2469-2020>
- Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Saldo R., Sørensen A.M.* Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 3261–3307. <https://doi.org/10.5194/tc-13-3261-2019>
- Knuth M.A., Ackley S.F.* Summer and early-fall Sea-ice concentration in the Ross Sea: Comparison of in Situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates // *Annals of Glaciology*. 2006. V. 44. P. 303–309. <https://doi.org/10.3189/172756406781811466>
- Laliberté F., Howell S.E.L., Kushner P.J.* Regional variability of a projected sea ice-free Arctic during the summer months // *Geophys. Research Letters*. 2016. V. 43. P. 256–263. <https://doi.org/10.1002/2015GL066855>
- Maslanik J., Stroeve J., Fowler C., Emery W.* Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011 // *Geophysical Research Letters*. 2011. V. 38 (13). L13502. <https://doi.org/10.1029/2011GL047735>
- Smith L.C., Stephenson S.R.* New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2013. V. 110 (13). P. E1191–E1195. <https://doi.org/10.1073/pnas.121421211>
- Meier W.N.* Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery, in Arctic peripheral seas // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V. 43. P. 1324–1337. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.846151>
- Meier W.N., Khalsa S.J.S., Savoie M.H.* Intersensor calibration between F-13 SSM/I and F-17 SSMIS near-real-time Sea Ice estimates // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011. V. 49 (9). P. 3343–3349. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2117433>
- NSIDC // Электронный ресурс. URL: <https://nsidc.org/data/g02135/versions/3/> (Дата обращения: 08.05.2025).
- Pang X., Pu J., Zhao X., Ji Q., Qu M., Cheng Z.* Comparison between AMSR2 Sea Ice Concentration Products and Pseudo-Ship Observations of the Arctic and Antarctic Sea Ice Edge on Cloud-Free Days // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. 317. <https://doi.org/10.3390/rs10020317>
- Spren G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *Journal of Geophys. Research: Oceans*. 2008. V. 113. C02S03. <https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. № 10. 103001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Repina I.A., Komarova N.Yu.* Satellite microwave radiometry of sea ice of polar regions: A review // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. P. 1012–1030. <https://doi.org/10.1134/S0001433816090267>
- Tonboe R.T., Eastwood S., Lavergne T., Sørensen A.M., Rathmann N., Dybkjær G., Pedersen L.T., Hoyer J.L., Kern S.* The EUMETSAT sea ice concentration climate data record // *The Cryosphere*. 2016. V. 10. P. 2275–2290. https://doi.org/10.15770/EUM_SAF_OSI_0013
- Tschudi M.A., Meier W.N., Stewart J.S.* An enhancement to sea ice motion and age products at the National Snow and Ice Data Center (NSIDC) // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. P. 1519–1536. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1519-2020>

Citation: *Baklagin V.N. Long-term variability of the timing of freezing and the duration of ice phenomena in the White Sea based on satellite and in situ observations for 1980–2020. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2025, 65 (3): 502–517. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030116*

Long-Term Variability of the Timing of Freezing and the Duration of Ice Phenomena in the White Sea Based on Satellite and in Situ Observations for 1980–2020

© 2025 V.N. Baklagin

*Northern Water Problems Institute of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia
e-mail: slava.baklagin@mail.ru*

Received March 24, 2025; Revised May 11, 2025; Accepted June 26, 2025

The long-term variability of the ice regime of the White Sea for the period 1980–2020 was studied. The reliability of the satellite data used was also assessed by comparing them with in situ observation data. We use the regular hydrometeorological monitoring data from eight marine observation points, as well as satellite microwave passive sounding data (NSIDC) with a spatial resolution of 25 km and a time step of 1–2 days to form series of the main elements of the sea ice regime (the characteristic dates of ice regime and duration of ice phenomena). The average statistical dates of the start freezing and the ice breakup for the entire water area of the White Sea and its regions were obtained. Regression analysis of the data showed that the start freezing and the ice breakup dates have shifted towards the winter months over the past 40 years. The shifts occurred at average rates of 7.4 days/10 years and 4.7 days/10 years, respectively, according to in situ observations, and 11.9 days/10 years and 4.1 days/10 years, respectively, according to satellite observations. Overall, over the past 40 years, the average duration of ice phenomena in the White Sea has decreased by 47 days according to in situ observations and by 62 days according to satellite observations. Comparative analysis of satellite and in situ data showed significant differences in the average values of absolute deviations (up to 70 days) in determining the characteristic dates of the White Sea ice regime; however, the time series of characteristic dates are in good agreement with each other (pair correlation coefficients of 0.76/0.82 between the time series of dates of start freezing and dates of ice break up). This proves the possibility of using satellite data to calculate the regime indicators of ice phenomena over a long period in order to identify patterns in the development of ice processes, assess their climatic trends and develop methods for forecasting ice conditions.

Keywords: characteristic dates, ice regime, White Sea, situ data, satellite data

REFERENCES

- Baklagin V.N.* Multiyear variability of ice concentration in the White Sea according to satellite data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (4): 579–590. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040153> [In Russian].
- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR*. Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. V. 2. No. 1. Leningrad: GidrometeoIzdat, 1991: 241 p. [In Russian].
- Dumanskaya I.O.* Analysis of the variability of the position of drifting ice edges and the maximum ice coverage of the White Sea. *Trudy Gidrometcentra Rossii*. Proc. of the Hydrometeorological Center of Russia. 2004, 339: 45–54 [In Russian].
- Dumanskaya I.O.* *Ledovye usloviya morej evropejskoj chasti Rossii*. Ice conditions of the seas of the European part of Russia. Obninsk: IG–SOCIN, 2014: 608 p. [In Russian].
- Zabolotskih E.V.* Review of methods to retrieve sea ice parameters from satellite microwave radiometer data. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the RAS. Physics of the atmosphere and ocean. 2019, 55 (1): 128–151. <https://doi.org/10.31857/S0002-3515551128-151> [In Russian].
- Johannessen O.M., Aleksandrov V.Yu., Frolov I.E., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Kloster K., Smirnov V.G., Mironov E.U., Babich N.G.* *Nauchnye issledovaniya v Arktike. T. 3. Distancionnoe zondirovanie*

- morskih l'dov na severnom morskoy puti: izuchenie i primeneniye*. Scientific research in the Arctic. V. 3. Remote sensing of sea ice on the Northern Sea route: study and application. St. Petersburg: Nauka, 2007: 512 p. [In Russian].
- Smirnov V.G. (Ed). *Sputnikovye metody opredeleniya harakteristik ledyanogo pokrova morej*. Satellite methods for determining the characteristics of the sea ice cover. St. Petersburg: Arctic and Antarctic Research Institute, 2011: 240 p. [In Russian].
- Nastavlenie gidrometeorologicheskimi stanciyam i postam RD 52.10.842-2017. Vypusk 9. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na morskikh stantsiyah i postah. Chast' I. Gidrologicheskie nablyudeniya na beregovykh stantsiyah i postah*. Instructions for hydrometeorological stations and posts RD 52.10.842-2017. Issue 9. Hydrometeorological observations at sea stations and posts. Part 1. Hydrological observations at coastal stations and posts. Moscow: OOO "Izdatel'stvo ITRK", 2017: 385 p. [In Russian].
- Shalina E.V. Reduction of the Arctic ice cover according to satellite passive microwave sensing. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2013, 10 (1): 328–336 [In Russian].
- Shalina E.V., Johannessen O.M., Bobylev L.P. Changes in the Arctic ice cover according to satellite passive microwave sensing data from 1978 to 2007. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2008, 2 (5): 228–223 [In Russian].
- Alekseeva T.A., Frolov S.V. Comparative analysis of satellite and shipborne data on ice cover in the Russian Arctic seas. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013, 49: 879–885.
<https://doi.org/10.1134/S000143381309017X>
- Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova J., Sharkov E., Afanasieva E., Serovetnikov S. Comparison of Arctic Sea Ice Concentrations from the NASA Team, ASI, and VASIA2 Algorithms with Summer and Winter Ship Data. *Remote Sensing*. 2019, 11: 2481.
<https://doi.org/10.3390/rs11212481>
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere* 2012, 6: 881–889.
<https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012>
- Cavalieri D., Parkinson C., DiGirolamo N., Ivanov A. Intersensor calibration between F13 SSM/I and F17 SSMIS for global sea ice data records. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2011, 9 (2): 233–236.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2166754>
- Cavalieri D., Parkinson C., Gloersen P., Comiso J., Zwally H.J. Deriving Long-term Time Series of Sea Ice Cover from Satellite Passive-microwave Multisensor Data Sets. *J. Geophys. Res.* 1999, 104 (C7): 15803–15814.
- Comiso J.C., Parkinson C.L., Gersten R., Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophys. Res. Letters*. 2007, 34: L01703.
<https://doi.org/10.1029/2007/GL031972>
- Filatov N.N., Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M., Pettersson L.H. White Sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Berlin; Heidelberg: Springer, 2005: 463 p.
<https://doi.org/10.1007/3-540-27695-5>
- Kern S., Laverne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set inter-comparison for Arctic summer conditions. *The Cryosphere*. 2020, 14: 2469–2493.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-2469-2020>
- Kern S., Laverne T., Notz D., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Saldo R., Sørensen A.M. Satellite passive microwave sea-ice concentration data set intercomparison: closed ice and ship-based observations. *The Cryosphere*. 2019, 13: 3261–3307.
<https://doi.org/10.5194/tc-13-3261-2019>
- Knuth M.A., Ackley S.F. Summer and early-fall Sea-ice concentration in the Ross Sea: Comparison of in Situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates. *Annals of Glaciology*. 2006, 44: 303–309.
<https://doi.org/10.3189/172756406781811466>
- Laberté F., Howell S.E.L., Kushner P.J. Regional variability of a projected sea ice-free Arctic during the summer months // *Geophys. Res. Letters*. 2016, 43: 256–263.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066855>
- Maslanik J., Stroeve J., Fowler C., Emery W. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011. *Geophys. Research Letters*. 2011, 38 (13): L13502.
<https://doi.org/10.1029/2011GL047735>
- Smith L.C., Stephenson S.R. New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2013, 110 (13): E1191–E1195.
<https://doi.org/10.1073/pnas.121421211>
- Meier W.N. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery, in Arctic peripheral seas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005, 43: 1324–1337.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.846151>
- Meier W.N., Khalsa S.J.S., Savoie M.H. Intersensor calibration between F-13 SSM/I and F-17 SSMIS near-real-time Sea Ice estimates // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011, 49 (9): 3343–3349.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2117433>
- NSIDC: official site: Electronic data. Retrieved from: <https://nsidc.org/data/g02135/versions/3> (Last access: May 8, 2025).

- Pang X., Pu J., Zhao X., Ji Q., Qu M., Cheng Z.* Comparison between AMSR2 Sea Ice Concentration Products and Pseudo-Ship Observations of the Arctic and Antarctic Sea Ice Edge on Cloud-Free Days. *Remote Sensing*. 2018, 10: 317.
<https://doi.org/10.3390/rs10020317>
- Spren G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2008, 113: C02S03.
<https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environmental Research Letters*. 2018, 13 (10): 103001.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tikhonov V.V., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Repina I.A., Komarova N.Y.* Satellite microwave radiometry of sea ice of Polar Regions: A review. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016, 52: 1012–1030.
<https://doi.org/10.1134/S0001433816090267>
- Tonboe R.T., Eastwood S., Laverne T., Sørensen A.M., Rathmann N., Dybkjær G., Pedersen L.T., Hoyer J.L., Kern S.* The EUMETSAT sea ice concentration climate data record. *The Cryosphere*. 2016, 10: 2275–2290.
https://doi.org/10.15770/EUM_SAF_OSI_0013
- Tschudi M.A., Meier W.N., Stewart J.S.* An enhancement to sea ice motion and age products at the National Snow and Ice Data Center (NSIDC). *The Cryosphere*. 2020, 14: 1519–1536.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-1519-2020>