

ИЗМЕНЕНИЕ СПЛОЧЁННОСТИ ЛЬДА В ПРОЛИВЕ ВИЛЬКИЦКОГО ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ РАДИОМЕТРИИ С 1979 ПО 2024 Г.

© 2026 г. Е. В. Шалина*, А. В. Фролова

Научный фонд “Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена”, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: elena.shalina@gmail.com

Поступила в редакцию 05.08.2025 г.

После доработки 21.09.2025 г.

Принята к публикации 29.12.2025 г.

В работе анализируется изменение сплочённости льда в проливе Вилькицкого, с применением данных спутниковых измерений в микроволновом диапазоне за последние 46 лет. Проведено сравнение эффективности четырёх методов оценки сплочённости льда в течение ограниченного временного промежутка, включающего в себя процессы таяния льда и образования ледяного покрова. При оценке достоверности спутниковых данных в качестве базовых характеристик сплочённости льда использовались карты ААНИИ. Показано, что алгоритм Bootstrap — оптимальный выбор для расчётов. Наиболее близкие параметры эффективности восстановления сплочённости льда показал алгоритм NASA Team2, и результаты его использования также приведены в статье. Средние значения сплочённостей, их разброс и тенденции изменения рассчитаны и проанализированы на интервале времени 1979–2024 г. Показано, что сплочённость льда в проливе Вилькицкого мало изменилась в холодные месяцы года (с декабря по апрель), и претерпела небольшое сокращение в ноябре и мае (тренд составляет около 1.1%/10 лет). А вот в тёплые месяцы года (июнь–октябрь) произошло существенное уменьшение сплочённости льда. Максимальная величина отрицательного тренда, составившая 22% за десятилетие, зафиксирована в сентябре, 18% в августе. Эти тренды наблюдаются на фоне значительной пространственно-временной изменчивости этого параметра.

Ключевые слова: потепление Арктики, пролив Вилькицкого, сплочённость льда, спутниковые измерения, алгоритм Bootstrap, алгоритм NASA Team2

DOI: 10.7868/S2412376526010092

ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент в Арктике происходят значительные изменения, в том числе быстрое потепление атмосферы (Morice et al. 2021; Доклад об особенностях климата РФ..., 2025), сокращение протяжённости и уменьшение толщины морского льда (Kwok, 2018; Serreze, Meier, 2019), уменьшение площади многолетних льдов (Tschudi et al., 2020; Егоров, 2020), интенсификация гидрологического цикла и атмосферных процессов (Simmonds, Li, 2021). В Арктике наблюдается более значительное повышение температуры воздуха по сравнению с глобальным потеплением (Serreze, Barry, 2011; Латонин и др., 2021). Это явление получило название “Арктиче-

ского усиления”. Недавние исследования на основе данных наблюдений и климатических моделей показали, что потепление в Арктике с 1980 г. происходит примерно в три раза быстрее, чем в среднем по миру (Zhou et al., 2024).

Эти изменения уже оказывают влияние на климатическую и ледовую обстановку вдоль Северного морского пути (далее — СМП) (Третьяков и др., 2019; Шалина, 2021; Шукуров, 2022; Доклад об особенностях климата РФ..., 2025). Государство считает СМП важным транспортным коридором, соединяющим западные и восточные части страны, который обеспечивает транспортировку углеводородов из арктических месторождений, а также снабжение северных

территорий (План развития СМП..., 2022). Растёт значение СМП как транзитного коридора и наиболее короткого маршрута между Европой и Азией. Важно, чтобы планирование экономической деятельности в Арктике и, в частности, планирование использования СМП опиралось на научно обоснованные рекомендации развития региона. В этих рекомендациях необходимо учитывать климатические факторы.

Одним из важных и традиционно сложных районов, определяющих навигационные условия на трассе СМП, — пролив Вилькицкого (Шукуров, 2022). В исследовании (Shukurov, Semenov, 2021) проанализировано изменение сплочённости ледяного покрова в проливе с использованием спутниковых данных микроволнового диапазона за период с июня по ноябрь в интервале с 1996 по 2020 г. Результаты получены на базе расчётов сплочённости льда с помощью алгоритмов VASIA2 и NASA Team2. Показано снижение уровня сплочённости льда в диапазоне от 0.6 до 2.6 балла за десятилетие на фоне значительной изменчивости. В работе (Chen et al., 2024) проведена оценка ледовых условий в проливе Вилькицкого в 2012–2021 гг. с использованием спутниковых данных, полученных с помощью алгоритма ASI. Средние значения сплочённости льда оценены от 8 баллов в холодный сезон до 0.9 балла в сентябре. Отмечена значительная изменчивость ледового режима от года к году, а также тренд сокращения сплочённости льда в проливе. В другом исследовании (Yu et al., 2021) оценены изменения среднегодовой сплочённости льда на участке от северо-восточной оконечности Ямала до выхода из пролива Вилькицкого. В работе использованы данные, полученные с помощью алгоритма NASA Team. Результаты показали, что в 1979–2003 гг. среднегодовая сплочённость льда уменьшалась со скоростью 0.3% в год. Однако в период с 2003 по 2019 г. скорость уменьшения значительно возросла и составила 0.9% в год.

Зимой состояние ледяного покрова в проливе в значительной степени определяется наличием припая, который в феврале–мае составляет в среднем 45–60% от площади льда в проливе (Liu et al., 2024). Серьёзной угрозой для навигации в этом районе могут быть айсберги (Кучейко и др., 2015).

В последние десятилетия спутниковые наблюдения стали основным источником данных для мониторинга и анализа сплочённости льда,

предоставляя информацию в различных спектральных диапазонах, с разным временным и пространственным разрешением. Упомянутые выше исследования опираются на различные алгоритмы восстановления сплочённости льда с на базе спутниковых данных. В зависимости от доступности измерений, в них рассматривались разные временные периоды. Цель исследования — анализ изменений сплочённости льда в проливе Вилькицкого на базе самого длинного ряда спутниковых данных микроволнового диапазона, с 1979 по 2024 г. Для получения максимально точного описания этих изменений проанализированы возможности четырёх алгоритмов при определении сплочённости льда в рассматриваемой области. Проведены расчёты с применением алгоритма, показавшего наибольшую эффективность вычислений. Исследование динамики сплочённости льда в прошлом не позволяет с уверенностью прогнозировать её дальнейшее изменение, но даёт возможность выявить тенденции и колебания этого параметра на рассмотренном промежутке времени. Эти данные важны для понимания процессов, происходящих в исследуемой области на фоне общих климатических изменений в Арктике.

ДАННЫЕ

Данные спутниковой микроволновой радиометрии. Спутниковые микроволновые радиометры Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR), Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) и Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) обеспечивают самый продолжительный ряд непрерывных наблюдений за ледяным покровом. Значительная часть наших знаний об изменениях в арктических льдах базируется именно на этих данных. Наблюдения начались в октябре 1978 г. и, благодаря разработанным алгоритмам извлечения из них информации о свойствах морского льда, позволили вести непрерывный мониторинг сплочённости, общей протяжённости, а также возраста льда в Арктике. Основным недостаток этих данных — их грубое разрешение (25 км), которое ограничивает точность описания ледовых характеристик. Начиная с 2002 г. в космосе функционируют сканирующие микроволновые радиометры AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer), которые позволяют получать информацию о сплочённости морского льда с разрешением от 12.5 до 3.125 км. Изменчивость факторов, которые необходимо учитывать при восстановлении сплочённости морского льда, — источник ошибок. Точность оценки этого параметра снижается при измене-

нии свойств снега, появлении снежиц и образовании шероховатости ледяного покрова. Максимальные погрешности отмечаются для сезона таяния и для областей разреженных льдов.

В ряде работ проводилось сравнение алгоритмов обработки упомянутых спутниковых данных (например, Kern et al., 2019; Alekseeva et al., 2019; Kern et al., 2022). В сравнениях обычно участвуют наиболее широко используемые алгоритмы: NASA Team (Cavalieri et al., 1999), NASA Team-2 (Markus, Cavalieri, 2009), Bootstrap (Comiso, 1986), ARTIST Sea Ice (Spreen et al., 2008) и OSI SAF (Lavergne et al., 2019). В большинстве исследований сравнение проводилось на данных, охватывающих всю Арктику. В некоторых работах учитывались различия между зонами сплочённого и разреженного льда, а также ледяной кромки и области таяния, так как алгоритмы по-разному восстанавливают сплочённость льда в различных условиях. Сравнивались спутниковые данные с данными судовых наблюдений (Alexeeva et al., 2019; Wang et al., 2019; Kern et al., 2019), а также с ледовыми параметрами, получаемыми по измерениям спутников MODIS или Landsat в видимом диапазоне (Alexeeva et al., 2019; Kern et al., 2020; Kern et al., 2022).

Сопоставление судовых и спутниковых данных о сплочённости льда показало, что алгоритмы Bootstrap и NASA Team-2 демонстрируют наименьшие расхождения (Kern et al., 2019). При сравнении с данными спутника Landsat эти алгоритмы, как правило, немного завышают оценку сплочённости льда, тогда как остальные методы, напротив, её занижают (Kern et al., 2022). Практически все исследователи сходятся на том, что алгоритм NASA Team занижает сплочённость льда в случае её высоких значений. Однако в случае редкого льда в работе (Alekseeva et al., 2019) авторы находят превышение сплочённостей льда, полученных по алгоритму NASA Team, а исследование (Kern et al., 2022) показывает их занижение. Отмечено, что рассчитанные по спутниковым данным положительные или отрицательные отклонения сплочённости льда от базисных измерений (спутниковых или судовых) — результат осреднения по значительным площадям. При этом в разных географических и погодных условиях отклонения могут быть противоположного знака (Kern et al., 2019, 2020).

Алгоритмы расчёта сплочённости морского льда основаны на различиях в микроволновом излучении между льдом и открытой водой,

при этом они по-разному учитывают влияние атмосферных условий и излучательной способности поверхности. Результаты восстановления параметров ледяного покрова содержат остаточные ошибки, и алгоритмы применяют разнообразные подходы для их минимизации. Атмосферная влажность и ветровая взволнованность поверхности океана могут вызывать ложные определения морского льда в районах, где его нет. Для снижения таких ошибок в алгоритмах применяются различные виды погодных фильтров. Обычно это пороговые фильтры, использующие яркостные температуры (меру микроволнового излучения) на разных частотах и поляризациях. Однако на участках вблизи кромки льда, где значения сплочённости низкие, может происходить избыточная фильтрация. Это означает, что морской лёд с низкой концентрацией будет ошибочно определяться как вода, что приведёт к неточностям в вычислениях (Wang et al., 2024).

При расчёте сплочённости льда алгоритмы используют точки привязки, которые являются опорными для определения типов наблюдаемых поверхностей. Они представляют собой яркостные температуры, характерные для чистой открытой воды и 100% морского льда. Точки привязки могут быть фиксированными и динамическими. Поскольку естественная изменчивость свойств поверхности лёд/вода велика, использование фиксированных точек привязки увеличивает неопределённость расчётов. Метод динамических точек привязки предполагает определение соответствующих значений для каждого дня и региона на основе наблюдаемых яркостных температур и других необходимых данных. Это гарантирует, что алгоритм восстановления сплочённости льда будет использовать наиболее репрезентативные характеристики для заданных условий.

Выбор спутниковых данных для решения поставленной задачи. В работе стоит задача исследования трендов сплочённости льда в небольшой области (пролив Вилькицкого и прилегающая к нему зона), находящейся в непосредственной близости от суши. Длина пролива Вилькицкого, согласно лоции Карского моря (Лоция..., 1938), составляет 60 миль, а ширина в самом узком месте — около 30 миль. Выбор алгоритма расчёта сплочённости льда должен учитывать, что указанный район часто находится в прикромочной ледовой зоне, где восстановление ледовых характеристик по спутниковым данным особенно затруднено.

Наряду с этим важно, чтобы алгоритм корректно отрабатывал соседство суши и льда/воды. Кроме того, условие использования ряда спутниковых данных в работе — наличие свободного доступа к данным.

Самым очевидным выбором кажется ряд спутниковых данных, полученных с помощью алгоритма, который обеспечивает наилучшее пространственное разрешение. Это алгоритм ARTIST Sea Ice (ASI), разработанный Бременским университетом, который обрабатывает данные микроволновых радиометров AMSR-E и AMSR2, обеспечивая восстановление сплочённости льда с разрешением 6.250 или 3.125 км. Данные доступны на сайте (seaice.uni-bremen..., 2025). Однако анализ показал, что зоны ледяного покрова, где присутствует разреженный лёд, не определяются этим алгоритмом, что согласуется с работами (Алексеева и др., 2021; Wang et al., 2024).

На рис. 1 приведена таблица сравнения ледовых карт Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) и спутниковых карт сплочённости льда, построенных с помощью алгоритмов Bootstrap, NASA Team (NT), ASI и NASA Team-2 (NT2). В качестве примера выбран период с августа по сентябрь 2021 г. — период разрушения и таяния ледяного покрова, а также самое начало периода замерзания, когда с точки зрения возможностей судоходства особенно важно надёжно фиксировать наличие или отсутствие льда в проливе. Кроме того, это наиболее сложное время с точки зрения возможностей спутниковых алгоритмов адекватно восстанавливать сплочённость льда из-за наличия снежиц и разрушенности ледяного покрова. Спутниковые данные приведены для тех дат, которыми помечены карты ААНИИ. Видно (см. рис. 1), что упомянутый выше алгоритм ASI хорошо очерчивает границу льдов со сплочённостью от 6 баллов и выше, но “не видит”, как правило, ледяной покров меньшей сплочённости. Кроме того, на картах сплочённости ASI можно заметить ложные выявления льда на границе суша—вода. Визуальный анализ этих данных за более продолжительный период времени показывает, что ложные пиксели льда на границе суша—вода появляются на летних ледовых картах ASI регулярно. Это ещё более осложняет их использование, поскольку в летний период алгоритм показывает лёд там, где его нет, и не показывает там, где он, согласно другим данным, присутствует. Схожим образом

работает алгоритм NT2, однако он несколько лучше отслеживает редкий и разреженный лёд и не даёт ложных пикселей льда на границе суша—вода. NT2, так же как и алгоритм ASI, обрабатывает данные сканирующих микроволновых радиометров AMSR-E и AMSR2. Сплочённости льда, рассчитанные по алгоритму NT2, предоставляет американский Национальный центр данных по снегу и льду (nsidc.org^{1...}, 2025) с пространственным разрешением 12.5 км. Алгоритмы NT и Bootstrap работают с данными SMMR-SSMIS и рассчитывают карты сплочённости льда с худшим разрешением — 25 км (nsidc.org^{2...}, 2025; nsidc.org^{3...}, 2025). Первый из них (nsidc.org^{2...}, 2025), очевидно (см. рис. 1), занижает сплочённости, особенно во время нарастания ледяного покрова в сентябре. Алгоритм Bootstrap, хоть и с грубым разрешением, наилучшим образом отслеживает наличие ледяного покрова малой сплочённости, завышая, однако, область его распространения с началом замерзания.

В табл. 1 представлены результаты численного сравнения площадей ледяного покрова со сплочённостью более 1 балла, полученных на основе карт ААНИИ и спутниковых данных за период с августа по сентябрь 2021 г. Данные относятся к области вокруг архипелага Северная Земля. Первый столбец показывает площади, занятые льдом, согласно картам ААНИИ. С этими площадями сравнивались результаты, полученные на основе спутниковых данных с использованием различных алгоритмов. Для каждого алгоритма приведена площадь льда сплочённостью более 1 балла и разница с данными ААНИИ в процентах. На рассматриваемом временном отрезке алгоритм Bootstrap обеспечивает наиболее точное восстановление протяжённости ледяного покрова. Осреднённая разница между площадью льда, рассчитанной по картам ААНИИ и по алгоритму Bootstrap, составляет 6%. Наихудшие результаты показывают алгоритмы NT и ASI, площади которых отличаются от данных ААНИИ в среднем на 39–40%. NT2 занижает площади в среднем на 30%.

Алгоритм Bootstrap выбран для проведения основных расчётов сплочённости льда в проливе Вилькицкого. Этот метод наиболее точно описывает изменения сплочённости льда в периоды таяния и замерзания. Отмечено, что он несколько занижает значения сплочённости льда в процессе таяния и, наоборот, завышает их при замерзании.

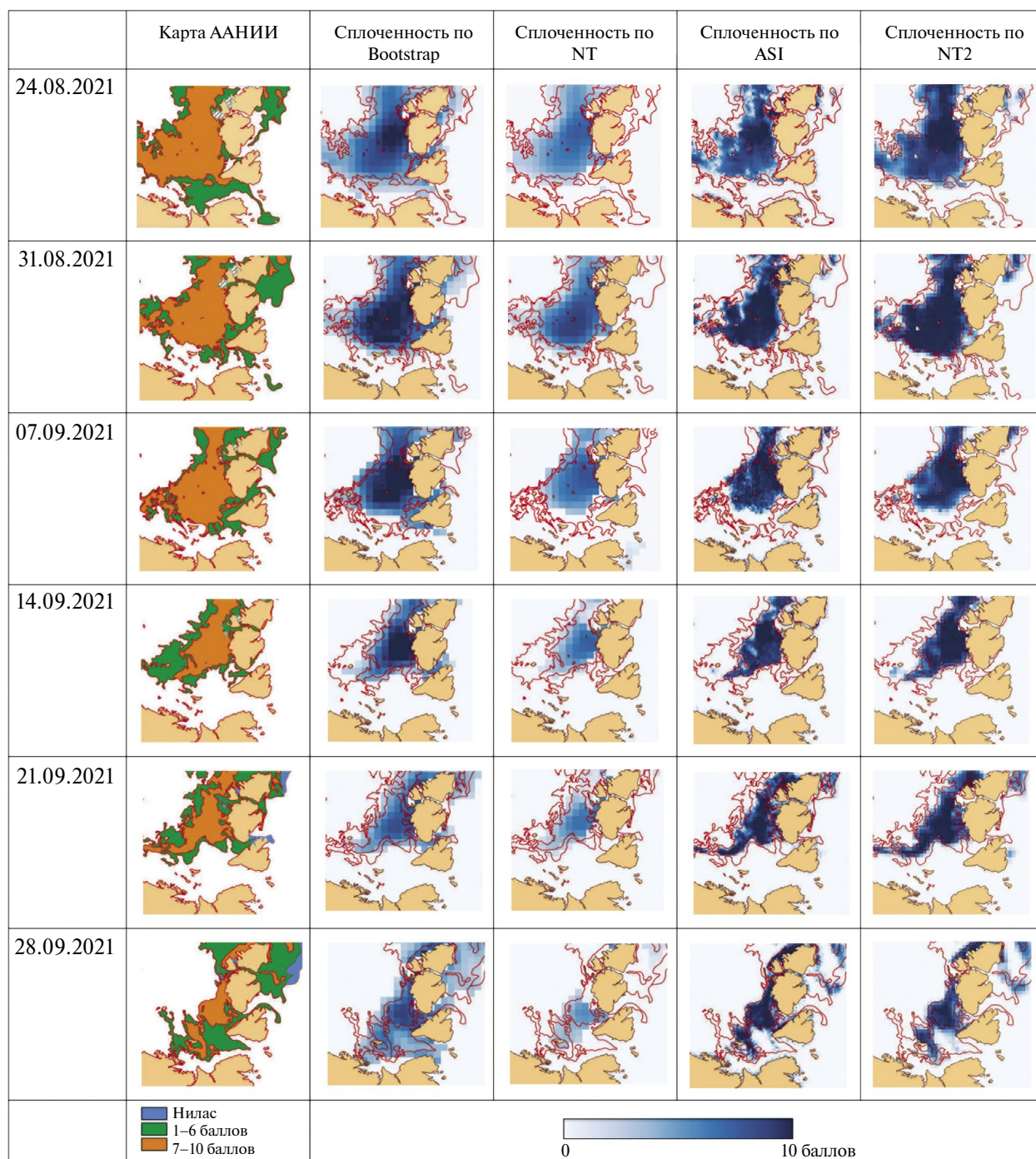


Рис. 1. Фрагменты обзорных ледовых карт ААНИИ и соответствующие им карты сплочённости морского льда, полученные по алгоритмам Bootstrap, NASA Team (NT), ASI и NASA Team2 (NT2)

Fig. 1. Parts of the AARI sea ice charts and corresponding sea ice concentration maps obtained using Bootstrap, NASA Team (NT), ASI, and NASA Team2 (NT2) algorithms

Алгоритм применяет динамические точки привязки. Согласно (Kern et al., 2020), в периоды таяния алгоритм использует в качестве опорных точек для льда характеристики ледяного покрова, частично покрытого снежниками. Это позволяет

улучшить (по сравнению с другими алгоритмами) точность восстановления сплочённости льда при наличии снежниц. В алгоритм встроено хорошо отлаженный погодный фильтр, позволяющий различать реальный морской лёд и области,

Таблица 1. Площадь S , занятая льдами сплочённостью более 1 балла, в августе–сентябре 2021 г., рассчитанная по ледовым картам ААНИИ и по спутниковым алгоритмам, а также разница Δ между $S_{\text{ААНИИ}}$ и $S_{\text{спутн.}}$ в %

Table 1. The area S covered by the sea ice with a concentration of more than 10%, in August–September 2021, calculated from the AARI sea ice charts and satellite algorithms, as well as the difference Δ between S_{AARI} and S_{sat} in %

Дата составления карты	ААНИИ	Bootstrap		NT		ASI		NT2	
	$S_{\text{ААНИИ}}$ (км ²)	$S_{\text{Bootstrap}}$ (км ²)	Δ (%)	S_{NT} (км ²)	Δ (%)	S_{ASI} (км ²)	Δ (%)	S_{NT2} (км ²)	Δ (%)
24.08.2021	216770	204702	6	156718	28	139676	36	163125	25
31.08.2021	189451	184428	3	142529	25	127941	32	151507	20
07.09.2021	170491	155604	9	117083	31	105089	38	114874	33
14.09.2021	141680	130561	8	67717	52	69058	51	89443	37
21.09.2021	154417	124102	20	84400	45	88646	43	102054	34
28.09.2021	135571	143123	-6	60850	55	84950	37	87707	35

где погодные условия имитируют его в микроволновых данных (Comiso et al., 2017). Итоговые расчёты проходят ручную коррекцию.

Имея в виду, что в более разнообразных арктических ледовых условиях (Kern et al., 2020, 2022) алгоритм NT2 показывает схожую с Bootstrap эффективность восстановления сплочённости льда. Далее, сравниваются результаты расчётов, выполненных с использованием алгоритмов Bootstrap и NT2 для промежутка времени с 2002 по 2024 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение сплочённости льда в проливе Вилькицкого и примыкающей к нему области с 1979 по 2024 г. Расчёты сплочённости льда в проливе Вилькицкого с 1979 по 2024 г. проводились с использованием среднемесячных значений. Все параметры рассчитывались для четырёх областей, показанных на рис. 2: пролив Вилькицкого (1), пролив и прилегающие к нему области (2), половина области 1, расположенная со стороны Карского моря (3) и половина области 1, примыкающая к морю Лаптевых (4). Последние две области рассмотрены отдельно, чтобы оценить с какой стороны пролива ледовые условия в среднем тяжелее и насколько. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Статистический анализ данных показывает, что в 1979–2024 гг. сплочённость льда либо не изменилась, либо (в большинстве случаев) сократилась. С декабря по апрель собственно в проливе Вилькицкого, а также в примыкаю-

щих к нему областях не наблюдалось значительных изменений в уровне сплочённости льда. Средняя сплочённость льда в области 1 за эти месяцы составила 9.8 балла, при этом колебания вокруг среднего были незначительными и находились в диапазоне от 0.07 до 0.09 балла (см. табл. 2). В мае и ноябре сокращение было небольшим, но уже заметным и составило 1.1% за десятилетие. Наименьшие сплочённости льда, как и следовало ожидать, наблюдались в сентябре. Средняя сплочённость льда в проливе в этом месяце составила 4.2 балла. При этом среднеквадратическое отклонение равнялось 3.2 балла, что указывает на разброс значений, составляющий 76% от среднего уровня. Рис. 3 иллюстрирует

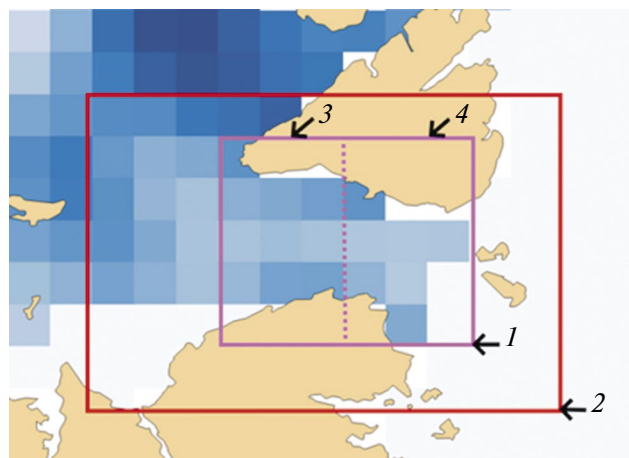


Рис. 2. Области (1–4), для которых проводились расчёты сплочённости льда

Fig. 2. Areas (1–4), for which sea ice concentration has been calculated

Таблица 2. Среднемесячные значения сплочённости льда и их среднеквадратические отклонения (в баллах), а также тренды изменения сплоченности за декаду (в %) в четырёх зонах, показанных на рис. 2, в 1979–2024 гг.

Table 2. Monthly averages of sea ice concentration and its standard deviations, as well as trends in sea ice concentration over a decade (in %) in the four zones shown in Fig. 2 in 1979–2024

Месяцы	Зона											
	1			2			3			4		
	Сплочённость (баллы)		Тренд (%)	Сплочённость (баллы)		Тренд (%)	Сплочённость (баллы)		Тренд (%)	Сплочённость (баллы)		Тренд (%)
	среднее	СКО		среднее	СКО		среднее	СКО		среднее	СКО	
1	9.8	0.08	-0.1	9.9	0.09	-0.2	9.9	0.06	0.0	9.8	0.11	-0.2
2	9.8	0.08	-0.2	9.8	0.08	-0.2	9.8	0.07	0.0	9.8	0.12	-0.3
3	9.8	0.09	-0.1	9.8	0.07	-0.1	9.8	0.07	0.1	9.8	0.15	-0.2
4	9.7	0.14	-0.3	9.8	0.18	-0.4	9.8	0.07	0.0	9.7	0.27	-0.6
5	9.6	0.30	-1.1	9.5	0.44	-1.5	9.7	0.41	-0.9	9.5	0.47	-1.3
6	8.7	1.04	-4.2	8.3	1.17	-5.0	9.0	1.16	-3.3	8.3	1.34	-5.1
7	7.1	1.94	-7.6	7.0	1.67	-7.8	7.7	2.17	-8.0	6.7	1.79	-7.1
8	4.5	2.60	-17.8	4.5	2.63	-18.0	4.8	3.10	-18.6	4.3	2.32	-16.7
9	4.2	3.23	-22.2	4.1	3.13	-21.9	4.3	3.50	-22.8	4.2	3.09	-21.5
10	7.4	2.73	-13.0	7.5	2.70	-13.1	7.2	3.01	-14.2	7.7	2.49	-11.8
11	9.7	0.41	-1.1	9.7	0.42	-1.2	9.7	0.47	-1.1	9.7	0.37	-1.2
12	9.8	0.07	-0.1	9.9	0.07	-0.2	9.9	0.05	-0.1	9.8	0.11	-0.2

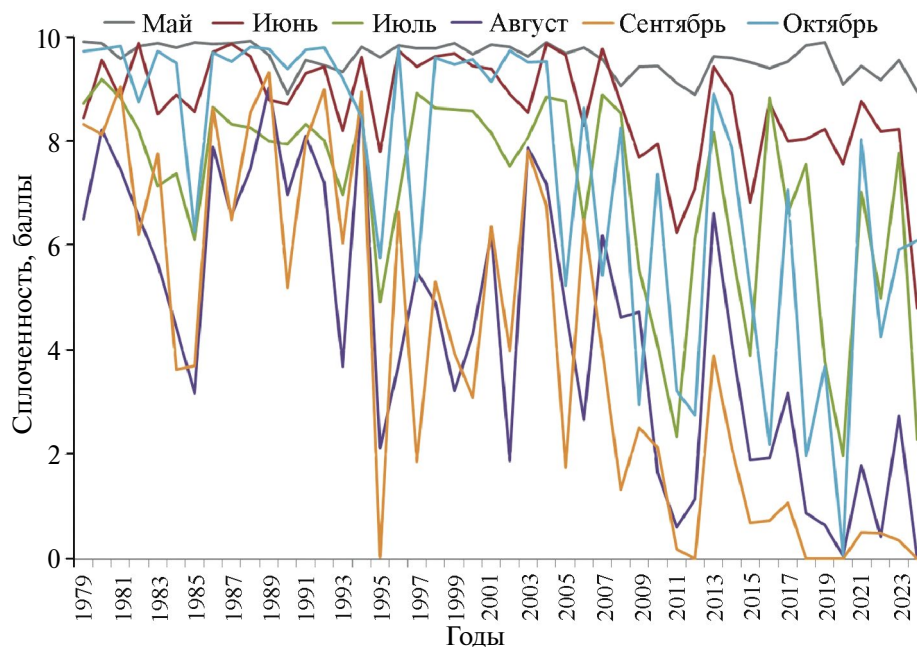


Рис. 3. Изменение сплочённости льда в проливе Вилькицкого с 1979 по 2024 г. (с мая по октябрь) согласно расчётам по алгоритму Bootstrap

Fig. 3. Time evolution of sea ice concentration in the Vilkitsky Strait from 1979 to 2024 (in the months from May to October) according to calculations based on the Bootstrap algorithm

этот разброс значений. Сокращение сплочённости льда в сентябре, которое в среднем составило 22% за десятилетие (см. табл. 2), не было равномерным. Сплочённость льда в проливе в этом месяце резко сократилась до нуля в 1995 г., после чего наблюдался неравномерный рост до 2003 г. Затем снова произошло сокращение ледяного покрова, которое сопровождалось значительными ежегодными колебаниями. Средняя тенденция сокращения сплочённости льда с 2003 по 2024 г. в сентябре составила 5.5% в год, или 55% за десятилетие. В августе наблюдался схожий характер изменения ледяного покрова с той разницей, что сплочённость льда была выше в среднем на 0.4 балла. Средняя скорость сокращения сплочённости льда в этом месяце составила 18% за декаду в промежутке 1979–2024 г. и 45% после 2003 г. В ряде работ (например, Егоров, 2020; Yu et al., 2021) показано, что в 2002–2005 гг. происходит изменение возрастного состава арктических льдов, уменьшение их средней толщины и резкое сокращение ледовитости на трассе СМП.

Сплочённость льда в зоне 2 (см. рис. 2) мало отличалась от значений в зоне 1 (см. табл. 2). Что касается зон 3 и 4, здесь различия наблюдались и проявились они в следующем. В самые холодные месяцы (с декабря по апрель), сплочённость льда в обеих зонах была близкой к 10 баллам и в среднем менялась мало. Однако в зоне, прилегающей к морю Лаптевых, наблюдались более значительные колебания в сплочённости льда, примерно в два раза превышающие показатели соседней зоны. Начиная с мая наблюдался тренд уменьшения сплочённости льда, причём в зоне 4 скорость сокращения была больше.

Распределение льда в проливе менялось от месяца к месяцу. Рис. 4 показывает разницу в сплочённостях льда в западной и восточной зонах (C_3 и C_4 соответственно): $\Delta C = C_3 - C_4$. Положительное значение разницы (на рисунке показано синим цветом) означает большую сплочённость льда в зоне, примыкающей к Карскому морю, отрицательное значение (красный цвет) — большее количество льда в зоне, примыкающей к морю Лаптевых. С мая по август лёд в проливе чаще задерживался со стороны Карского моря. В сентябре и октябре картина была противоположной: лёд со стороны моря Лаптевых наблюдался чаще, т.е. процессы ледообразования в этом районе происходили интенсивнее. Особенно примечательно преобладание льда в восточной зоне в октябре в последние два

десятилетия (см. рис. 4). За этот период только четыре раза наблюдалась большая сплочённость льда в западной зоне по сравнению с восточной. К примеру, в 2022 г. в начале октября в море Лаптевых кромка льда подошла к островам Комсомольской Правды, в то время как Карское море было почти свободно ото льда.

Сравнение тенденций изменения сплочённости льда, рассчитанных по алгоритмам Bootstrap и NT2. Как отмечалось выше, согласно исследованиям (Kern et al., 2020, 2022), алгоритмы Bootstrap и NT2 показывают наиболее близкие результаты восстановления сплочённости льда в разнообразных арктических условиях. С одной стороны, преимущество данных, полученных по алгоритму NT2, состоит в том, что они имеют более высокое пространственное разрешение. С другой стороны, в летнее время часть разреженного льда на границе ледяного покрова оказывается невидимой для алгоритма NT2 (см. рис. 1; табл. 1). Сравнение данных, полученных на базе этих алгоритмов, показывает, как проявляются описанные различия, в какое время ледового сезона расхождение наиболее значительны и отражается ли это на трендах изменения сплочённости льда.

Данные NT2 доступны для периода с 2002 по 2024 г. Дополнительный интерес в рассмотрении данных на этом промежутке времени состоит в том, что в начале этого периода, как отмечено выше, происходит изменение возрастного состава арктических льдов и уменьшение их средней толщины, что делает ледяной покров более уязвимым к разрушению. На рис. 5 представлено изменение среднемесячной сплочённости льда в проливе, рассчитанной по алгоритмам Bootstrap и NT2 за временной интервал с июня по ноябрь. На графиках показаны линейные тренды $y = ax + b$, приведён коэффициент a (показывающий среднюю скорость уменьшения сплочённости льда в баллах за год) и коэффициент детерминированности R^2 , показывающий, насколько реальное изменение сплочённости льда близко к линейной функции.

Различия между алгоритмами проявляются неодинаково в тёплый и холодный сезоны. В холодный сезон алгоритмы демонстрируют близкие результаты, при этом сплочённость льда, рассчитанные по NT2, выше в среднем на 0.08 балла. В сезон таяния и формирования ледяного покрова расхождение становится заметным. Когда появляется разреженный и редкий

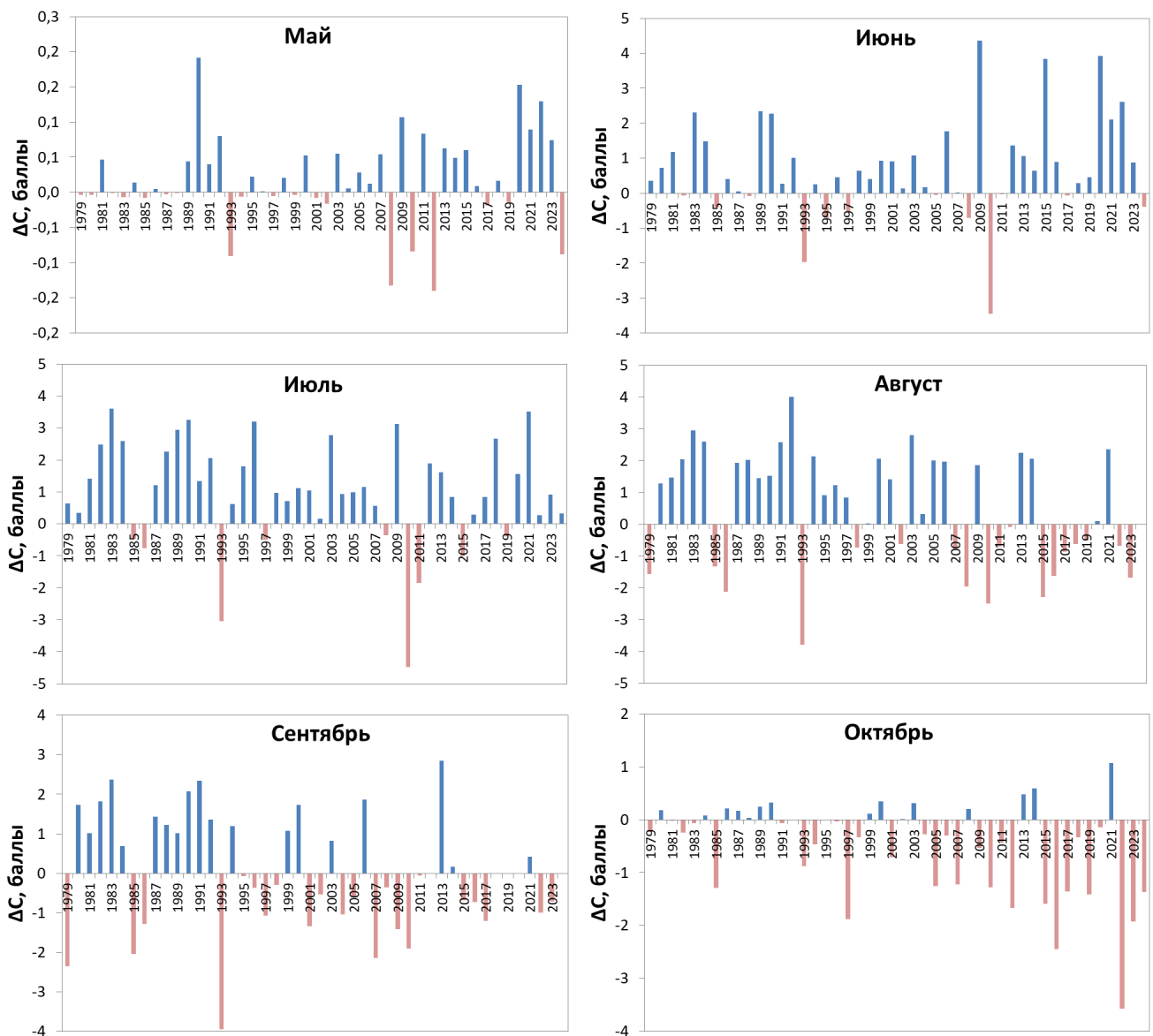


Рис. 4. Разница ΔC между сплочённостью льда в зоне, примыкающей к Карскому морю, и зоне, соседней с морем Лаптевых, в 1979–2024 гг. Случаи большей сплочённости в западной зоне (положительные разницы) показаны синим цветом, противоположные случаи — красным

Fig. 4. The difference ΔC between the sea ice concentration in the zone adjacent to the Kara Sea and the zone adjacent to the Laptev Sea in 1979–2024. Cases of greater concentration in the western zone (positive differences) are shown in blue, while the opposite cases are shown in red

лёд в период таяния, алгоритм NT2 занижает его сплочённость. Например, сравнение карт за сентябрь 2008 г. показывает, что алгоритмы NT2 и Bootstrap дают разные результаты относительно наличия льда в проливе. NT2 показывает отсутствие льда, тогда как Bootstrap фиксирует его присутствие. Согласно картам АНИИ, лёд мигрировал из Карского моря в пролив к концу этого месяца, что подтверждает более высокую

точность расчётов по алгоритму Bootstrap. В сентябре 2009 г. при наличии в проливе разреженного и редкого льда в первой половине месяца средняя сплочённость льда по данным NT2, составившая 0.3 балла, явно занижена. Средние величины и процентные показатели сокращения сплочённости льда представлены в табл. 3. Средняя разница между сплочённостями льда, рассчитанными по алгоритмам Bootstrap и NT2,

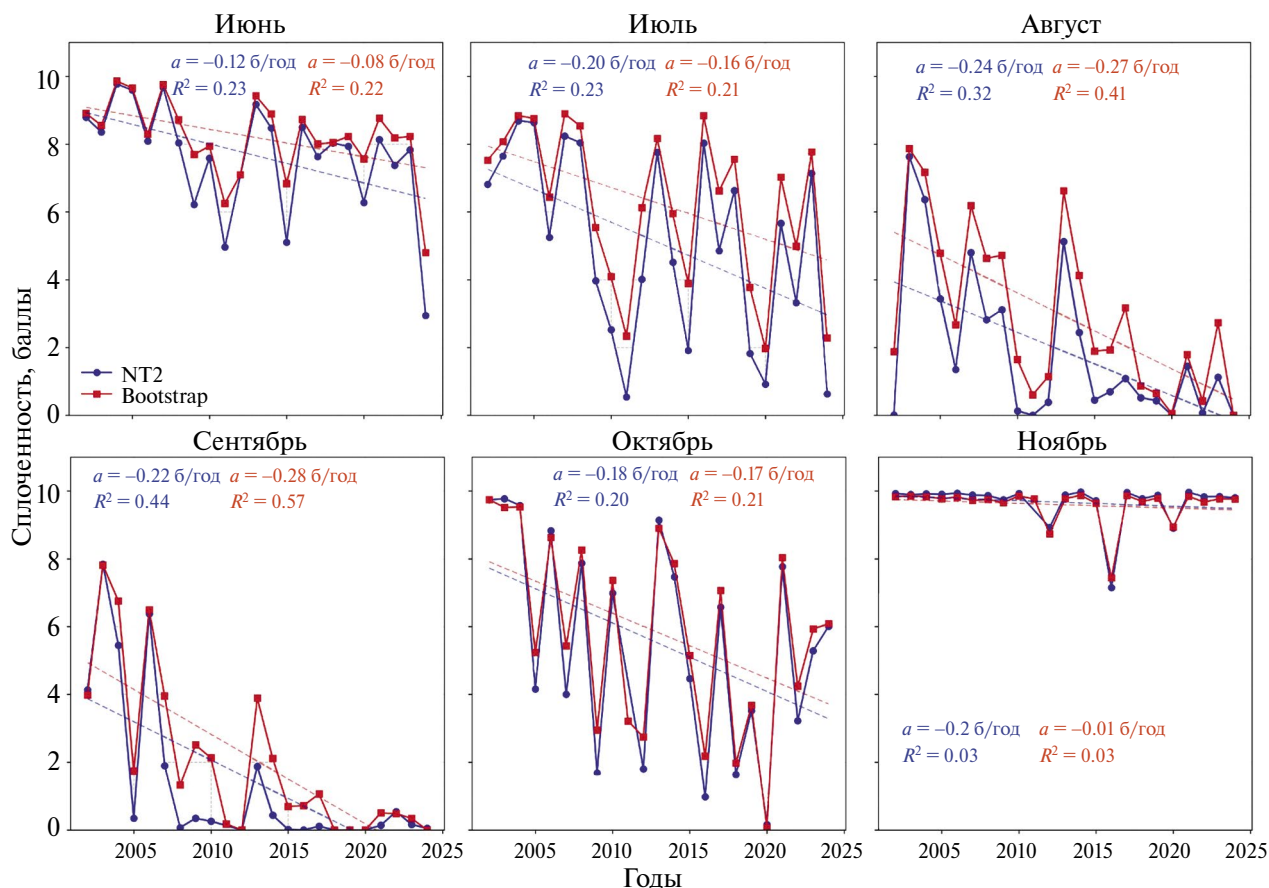


Рис. 5. Изменение сплочённости льда в проливе Вилькицкого с 2002 по 2024 г. (с июня по ноябрь) по алгоритмам Bootstrap и NT2.

Показаны линейные тренды, коэффициент наклона прямой тренда a (в баллах в год) и коэффициент детерминированности R^2

Fig. 5. Changes in sea ice concentration in the Vilkitsky Strait from 2002 to 2024 (in the months from June to November) based on Bootstrap and NT2 algorithms.

Linear trends, the slope coefficient a of the trend line and the coefficient R^2 are provided

в июне составляет 0,6, в июле 1,2, в августе 1,0, в сентябре 0,7 и в октябре 0,3 балла. Максимальные значения трендов соответствуют сентябрю и составляют 51% за десятилетие по данным алгоритма Bootstrap и 56% по NT2. При этом оценки тенденций изменения сплочённости льда в баллах отличаются незначительно (см. рис. 5): максимальная разница коэффициентов a составляет 0,06 балла в год (в сентябре), минимальная — 0,01 балла в год (в октябре).

Обобщая полученные данные, отметим, что в период с 2002 по 2024 г. наиболее значительные изменения в сплочённости льда в проливе наблюдались в августе и сентябре. В эти месяцы уровень сплочённости льда снижался в среднем на 0,25 балла в год, что соответствует среднему уменьшению на 5,8 балла за весь рассматриваемый

период. В июле и октябре снижение было менее выраженным и составляло в среднем 0,18 балла в год, а в июне — 0,1 балла в год. Ноябрь характеризовался практически стабильным уровнем сплочённости льда, хотя трижды за этот период наблюдалось её значительное уменьшение.

В статье (Shukurov, Semenov, 2021) рассматривалась задача, подобная той, что представлена в данном разделе. Сравнивались результаты восстановления сплочённости льда, полученные с использованием алгоритмов VASIA2 (Тихонов и др., 2015) и NT2. Важное отличие состоит в том, что данные, полученные по алгоритму NT2, в указанной работе рассчитаны на базе измерений спутниковых радиометров SSMI и SSMIS. Анализ данных, а также оценка трендов сплочённости

Таблица 3. Среднемесячные значения сплочённости льда и их среднеквадратические отклонения (в баллах), а также тренды изменения сплочённости за декаду (в %), рассчитанные по алгоритмам Bootstrap и NT2 в 2002–2024 гг.

Table 3. Monthly averages of sea ice concentration and its standard deviations, as well as trends in sea ice concentration over a decade (in %)-retrieved using Bootstrap and NT2 algorithm in 2002–2024

Месяц	Bootstrap			NT2		
	Сплочённость (баллы)		Тренд (%)	Сплочённость (баллы)		Тренд (%)
	среднее	СКО		среднее	СКО	
1	9.8	0.09	0.0	9.9	0.06	–0.1
2	9.8	0.09	–0.1	9.9	0.10	–0.4
3	9.8	0.11	0.0	9.9	0.09	–0.1
4	9.7	0.17	0.0	9.7	0.26	–0.2
5	9.5	0.30	–1.6	9.4	0.40	–2.6
6	8.2	1.17	–8.8	7.7	1.67	–11.1
7	6.3	2.27	–18.9	5.1	2.76	–26.2
8	2.9	2.38	–39.8	1.9	2.23	–45.2
9	2.0	2.37	–50.8	1.3	2.31	–56.0
10	5.8	2.80	–23.5	5.5	3.10	–25.3
11	9.6	0.55	–1.4	9.7	0.63	–1.6
12	9.8	0.07	0.0	9.9	0.07	–0.2

чёрности льда проведены в (Shukurov, Semenov, 2021) для периода с 1996 по 2020 г. для месяцев с июня по ноябрь. Исследование показало, что сплочённость льда, рассчитанная по алгоритму VASIA2, превышает расчёты по NT2 в среднем на 1–3 балла. Наибольшие расхождения отмечены в сентябре, наименьшие в июне и ноябре. При этом отмечено, что алгоритм VASIA2 завышает сплочённости льда в диапазоне 0–3 балла примерно на 10–20%, а алгоритм NT2 на столько же их занижает. Анализ результатов, представленных в упомянутом исследовании и полученных в работе, показывает, что алгоритмы Bootstrap и VASIA2 работают схожим образом.

Опираясь на данные, представленные в публикации (Шукуров, 2022), можно оценить различие между среднемесячными значениями сплочённости льда, полученными с использованием алгоритмов VASIA2 и Bootstrap. В июне разница $C_{VASIA2} - C_{Bootstrap}$ составляет в среднем –0.3 балла, в июле –0.8 балла, в августе и ок-

тябре 0.4 балла, в сентябре 1.3 балла и в ноябре –0.6 балла. Это показывает, что в июне, июле и ноябре (в более холодные месяцы) сплочённости льда, восстановленные по алгоритму Bootstrap, выше, а с августа по октябрь ниже. Например, в сентябре в 2018–2020 гг., когда пролив был свободен ото льда, согласно картам ААНИИ, алгоритм VASIA2 определяет сплочённость льда в диапазоне от 1 до 2.3 балла. В то же время алгоритм Bootstrap показывает отсутствие льда. Тренды изменения сплочённости льда, полученные на базе алгоритмов VASIA2 и Bootstrap, для периода с 1996 по 2020 г. отличаются незначительно: в июне, июле и ноябре разница составляет 0.05 балла/год, в октябре 0.06 балла/год, а в августе и сентябре они совпадают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спутниковые данные микроволнового диапазона — важный инструмент для получения информации о характеристиках ледяного покрова.

В работе эти данные применены для выявления тенденций изменения сплочённости ледяного покрова в проливе Вилькицкого. Принимая во внимание сложности, связанные с восстановлением сплочённости льда по спутниковым измерениям в области исследования, проведено сравнение доступных рядов данных, полученных с использованием разных алгоритмов. Показано, что алгоритм NT занижает оценку сплочённости льда во всём диапазоне значений. Алгоритм ASI хорошо очерчивает границу льдов со сплочённостью от 6 баллов и выше, но “не видит”, как правило, лёд меньшей сплочённости. Кроме того, на картах, полученных с помощью алгоритма ASI, наблюдаются ложные обнаружения льда на границе суши и воды. Алгоритм Bootstrap в целом показывает наилучшие результаты в восстановлении сплочённости льда, хотя при таянии он несколько занижает этот показатель, а при замерзании несколько завышает. Алгоритм NT2 продемонстрировал более высокие результаты в восстановлении сплочённости льда по сравнению с ASI и NT.

Однако он оказался менее эффективным, чем алгоритм Bootstrap. Данные о сплочённости льда, полученные на базе алгоритма Bootstrap, выбраны в качестве основного источника информации. Тренды изменения сплочённости льда в проливе получены для периода с 1979 по 2024 г. Проведено сравнение с алгоритмом NT2, наиболее близким по эффективности, за период с 2002 по 2024 г. Результаты демонстрируют различия между алгоритмами и показывают, как изменилась сплочённость льда в период, когда ледяной покров стал более уязвимым к разрушениям.

Показано, что за период в 46 лет в холодные месяцы (с декабря по апрель) уровень сплочённости льда в проливе Вилькицкого практически не изменился. В среднем этот показатель составил 9.8 балла, с незначительными колебаниями. В мае и ноябре отмечено небольшое сокращение сплочённости льда, около 1.1% за десятилетие. В следующие за маем месяцы тенденция сокращения этого параметра усиливалась. Максимальная скорость сокращения сплочённости льда зафиксирована в сентябре — 22% за десятилетие. В августе этот показатель составил 18%. Отмечено, что выявленное уменьшение сплочённости льда в тёплое время года наблюдалось на фоне значительной изменчивости этого параметра. Проведено сравнение сплочённости льда в двух частях пролива — расположенной со стороны Карского моря и примыкающей к морю

Лаптевых. С мая по август лёд в проливе чаще задерживался со стороны Карского моря. В сентябре и октябре ситуация была противоположной: лёд со стороны моря Лаптевых наблюдался чаще.

Различия между алгоритмами Bootstrap и NT2 неодинаково проявляются в тёплое и холодное время года. В холодный сезон алгоритмы демонстрируют близкие результаты. В сезон таяния и формирования ледяного покрова расхождение становится заметным. Когда появляется разреженный и редкий лёд в период таяния, алгоритм NT2 занижает его сплочённость. Средняя разница между сплочённостями льда, рассчитанными по алгоритмам Bootstrap и NT2, находится в диапазоне от 0.3 балла (в октябре) до 1.2 балла (в июле). Максимальные значения трендов сплочённости льда за период 2002–2024 гг. соответствуют сентябрю и составляют 51% за десятилетие по данным алгоритма Bootstrap и 56% по NT2. При этом оценки трендов в баллах отличаются незначительно: максимальная разница составляет 0.06 балла в год (в сентябре), минимальная — 0.01 балла в год (в октябре).

Сравнение сплочённости льда в первые и последние пять лет периода 1979–2024 гг. показывает значительное снижение этого показателя в проливе в тёплое время года. В июне средняя сплочённость льда уменьшилась с 9.0 до 7.5 балла, в июле — с 8.4 до 4.8 балла, в августе — с 6.9 до 1.0 балла, в сентябре — с 7.9 до 0.3 балла, а в октябре — с 9.6 до 4.9 балла. Таким образом, климатические изменения проявились в том, что ледовая обстановка в проливе Вилькицкого летом и ранней осенью стала значительно менее суровой, что позволяет продлевать навигацию. Однако пролив остаётся сложным участком СМП, в частности, из-за значительной изменчивости ледовой обстановки от года к году.

Благодарности. Авторы признательны Арктическому и Антарктическому научно-исследовательскому институту (АНИИ) за разработку и предоставление в открытом доступе карт ледяного покрова Северного ледовитого океана (AARI..., 2025). Авторы благодарны Национальному центру данных по исследованию снега и льда (NSIDC) за архивирование и предоставление в открытом доступе данных о концентрации ледяного покрова, полученных по алгоритму Bootstrap (nsidc.org³..., 2025), по алгоритму NASA Team (nsidc.org²..., 2025), по алгоритму NASA Team-2 (nsidc.org¹..., 2025), а также Университету Бремена за данные ASI (seaice.uni-bremen...,

2025). Авторы также выражают благодарность рецензентам за полезные замечания.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-27-00308, (rscf.ru..., 2025).

Acknowledgments. The authors are grateful to the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) for developing and making publicly available maps of the Arctic Ocean sea ice cover (AARI..., 2025). The authors are thankful to the National Snow and Ice Research Data Center (NSIDC) for archiving and making publicly available the data on sea ice concentration obtained using the Bootstrap algorithm (nsidc.org³..., 2025), the NASA Team algorithm (nsidc.org²..., 2025), and the NASA Team-2 algorithm (nsidc.org¹..., 2025), as well as the University of Bremen for ASI data (rscf.ru..., 2025).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Тихонов В.В., Смоляницкий В.М., Афанасьева Е.В., Раев М.Д., Шарков Е.А.* Анализ областей морского льда в Северном Ледовитом океане, не определяемых алгоритмом ASI по данным спутниковой микроволновой радиометрии // Исследование Земли из космоса. 2021. Т. 6. С. 22.
<https://doi.org/10.31857/S0205961421060026>
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва: Росгидромет, 2025. 135 с.
- Егоров А.Г.* Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова Арктических морей России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 124–143.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>
- Кучейко А.А., Иванов А.Ю., Давыдов А.А., Антонюк А.Ю.* Дрейф и распределение айсбергов в проливе Бориса Вилькицкого по данным детальных радиолокационных и оптических спутниковых изображений // Исследования Земли из космоса. 2015. № 5. С. 73–83.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415040065>
- Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылёв Л.П.* Явление арктического усиления и его движущие механизмы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 13. № 3. С. 3–19.
<https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
- Лоция Карского моря. Часть 1. Ленинград, 1938. 546 с.
- План развития Северного морского пути на период до 2035 года. Москва, 2022. 57 с.
- Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И.* Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного морского пути за период 1997–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 328–340
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340>
- Тихонов В.В., Репина И.А., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Комарова Н.Ю.* Комплексный алгоритм определения ледовых условий в полярных регионах по данным спутниковой микроволновой радиометрии (VASIA2) // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 2. С. 78–93.
<https://doi.org/10.7868/S0205961415020104>
- 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>
- Шукуров К.А.* Статистические характеристики вариаций концентрации морского льда в проливах Северного морского пути в последние десятилетия // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: XXVIII Международный симпозиум. Томск, 2022. С. 141–144
- seaice.uni-bremen// Электронный ресурс. URL: <https://seaice.uni-bremen.de/data-browser> (Дата обращения: 10.05.2025).
- nsidc.org¹// Электронный ресурс. URL: https://nsidc.org/data/au_si12/versions/1 (Дата обращения: 10.05.2025).
- nsidc.org²// Электронный ресурс. URL: <https://n5ei01u.ecs.nsidc.org/PM/NSIDC-0051.002/> (Дата обращения: 10.05.2025).
- nsidc.org³// Электронный ресурс. URL: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0079/versions/4> (Дата обращения: 10.05.2025).
- AARI // Электронный ресурс. URL: https://data.aari.ru//odata/_d0015.php (Дата обращения: 10.05.2025).
- rscf.ru // Электронный ресурс. URL: <https://rscf.ru/project/25-27-00308> (Дата обращения: 10.05.2025).
- 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. № 21. P. 2481.
<https://doi.org/10.3390/rs11212481>
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P., Comiso J.C., Zwally H.J.* Deriving Long-Term Time Series of Sea Ice Cover from Satellite Passive-Microwave Multi-sensor Data Sets // Journal of Geophysical Research. 1999. V. 104. P. 15803–15814.
<https://doi.org/10.1029/1999JC900081>

- Chen X., Zhao J., Zhao Y., Liu X., Ma L., Liu M., Shao Z., Xiao J., Chen Z., Zhang S., Zhao D., Mu F.* Risk Assessment of Ice-Class-Based Navigation in Arctic: A Case Study in the Vilkitsky Strait // *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. V. 2718. 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2718/1/012040>.
- Comiso J.C., Meier W.N., Gersten R.* Variability and Trends in the Arctic Sea Ice Cover: Results from Different Techniques // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. V. 122. № 8. P. 6883–6900. <https://doi.org/10.1002/2017JC012768>
- Comiso J.C.* Characteristics of Arctic Winter Sea Ice from Satellite Multispectral Microwave Observations // *Journal of Geophysical Research*. 1986. V. 91. P. 975–994.
- Kern S., Lavergne T., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Bell L., Meyer M., Zeigermann L.* Satellite Passive Microwave Sea-Ice Concentration Data Set Intercomparison Using Landsat Data // *The Cryosphere*. 2022. V. 16. № 1. P. 349–378. <https://doi.org/10.5194/tc-16-349-2022>
- 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., Tonboe R., Saldo R., Sørensen A.* 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>
- Kwok R.* Arctic Sea Ice Thickness, Volume, and Multiyear Ice Coverage: Losses and Coupled Variability (1958–2018) // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. 105005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae3ec>
- Lavergne T., Sørensen A.M., Kern S., Tonboe R., Notz D., Aaboe S., Bell L., Dybkjær G., Eastwood S., Gabarro C., Heygster G., Killie M.A., Kreiner M.B., Lavelle J., Saldo R., Sandven S., Pedersen L.T.* Version 2 of the EU-METSAT OSI SAF and ESA CCI Sea-Ice Concentration Climate Data Records // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>
- Liu M., Zhao J., Zhao J., Gnatiuk N., Shalina E., Chen X., Shao Z., Xiao J., Chen Z., Zhang S., Zhao D., Mu F.* The Influence of Landfast Ice on the Navigation in the Arctic Northeast Passage // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2024. V. 2718. № 1. P. 12011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2718/1/012011>
- Markus T., Cavalieri D.J.* The AMSR-E NT2 Sea Ice Concentration Algorithm: Its Basis and Implementation // *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*. 2009. V. 29. P. 216–225.
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Winn J.P., Hogan E., Killick R.E., Dunn R.J.H., Osborn T.J., Jones P.D., Simpson I.R.* An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change from 1850: the HadCRUT5 Data Set // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2021. V. 126. e2019JD032361. <https://doi.org/10.1029/2019JD032361>
- Serreze M., Barry R.* Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis // *Global and Planetary Change*. 2011. V. 77. № 1–2. P. 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- Serreze M., Meier W.* The Arctic's Sea Ice Cover: Trends, Variability, Predictability, and Comparisons to the Antarctic // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2019. V. 1436, № 1. P. 36–53. <https://doi.org/10.1111/nyas.13856>
- Shukurov K.A., Semenov V.A.* Large-Scale Atmospheric Circulation Patterns Favoring Sea Ice Concentration Extremes in the Northern Sea Route Straits in June–November of 1979–2017 // *27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics*. 2021. V. 11916. P. 1030–1035. <https://doi.org/10.1117/12.2601742>
- Simmonds I., Li M.* Trends and Variability in Polar Sea Ice, Global Atmospheric Circulations, and Baroclinicity // *Annals of the New York Academy of Sciences*. 2021. V. 1504. № 1. P. 167–186. <https://doi.org/10.1111/nyas.14592>
- Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea Ice Remote Sensing Using AMSR-E 89-GHz Channels // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. V. 113. C02S07. <https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- 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>
- Wang X., Guo Z., Zhao Y., Yang Z.* Sea Ice Concentration Inversion Based on ASI Algorithm Combined with Bootstrap Algorithm // *Ecological Indicators*. 2024. V. 158. P.111484. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111484>
- Wang Q., Lu P., Zu Y., Li Z., Leppäranta M., Zhang G.* Comparison of Passive Microwave Data with Shipborne Photographic Observations of Summer Sea Ice Concentration along an Arctic Cruise Path // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. № 17. P. 2009. <https://doi.org/10.3390/rs11172009>
- Yu M., Lu P., Li Z.* Sea Ice Conditions and Navigability Through the Northeast Passage in the Past 40 Years Based on Remote-Sensing Data // *Int. J. Digit. Earth*. 2021. V. 14. № 5. P. 555–574. <https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1886355>
- Zhou W., Leung L.R., Lu J.* Steady Threefold Arctic Amplification of Externally Forced Warming Masked by Natural Variability // *Nat. Geosci.* 2024. V. 17. P. 508–515. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01432-2>

Citation: *Shalina E.V., Frolova A.V. Changes in Sea Ice Concentration in the Vilkitsky Strait, as Observed from Satellite Microwave Radiometry Data Between 1979 and 2024. Led i Sneg. Ice and Snow. 2026, 66 (1): 121–137. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526010092*

Changes in Sea Ice Concentration in the Vilkitsky Strait, as Observed from Satellite Microwave Radiometry Data Between 1979 and 2024

© 2026 E. V. Shalina[#], A. V. Frolova

Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre (NIERSC), St. Petersburg, Russia

[#]*e-mail: elena.shalina@gmail.com*

Received August 8, 2025; revised September 21, 2025; accepted December 29, 2025

Climate change in the Arctic has various effects, including rising temperatures and reduced sea ice cover. This paper analyses the change in sea ice concentration in the Vilkitsky Strait using data from microwave satellite measurements over the last 46 years. The efficiency of four methods for estimating sea ice concentration during a limited time interval that includes the processes of sea ice melting and sea ice cover formation is compared. When assessing the reliability of satellite data, the AARI maps were used as basic characteristics of the sea ice concentration. The Bootstrap algorithm has been shown to be the optimal choice. The NASA Team 2 algorithm produced the closest results with regard to the efficiency of sea ice concentration retrieval, so the results of its use are also provided. The mean values of sea ice concentration, their spread and trends are calculated and analysed for the time interval 1979–2024. It has been shown that significant changes to the sea ice in the strait occurred during the warm half of the year. During the cold months (December to April), the sea ice concentration remained almost unchanged, at an average of 98% concentration with minimal variation. A slight decrease in sea ice concentration of around 1.1% per decade was recorded in May and November. In the months following May, the trend of decreasing sea ice concentration intensified. The maximum reduction rate, amounting to 22% over a decade, was recorded in September; and it was 18% in August. These reductions are accompanied by significant variability of sea ice concentration. We also compare the sea ice concentration in two parts of the Strait — the Kara Sea side and the Laptev Sea side. From May to August, sea ice in the Kara Sea side was more often delayed in the Strait. In September and October, the situation was opposite.

Keywords: warming Arctic, Vilkitsky Strait, sea ice concentration, satellite data, Bootstrap algorithm, NASA Team2 algorithm

REFERENCES

- Alekseeva T.A., Sokolova Yu.V., Tikhonov V.V., Smolyanitsky V.M., Afanasyeva E.V., Raev M.D., Sharkov E.A.* Analysis of Sea Ice Areas in the Arctic Ocean Undetectable by the ASI 2 Algorithm Using Satellite Microwave Radiometry. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth Research 3 from Space. 2021, 6: 22. <https://doi.org/10.31857/S0205961421060026> [In Russian].
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2024 god.* Report on Climate Features in the Russian Federation for 2024. Moscow: Roshydromet, 2025: 135 p. [In Russian].
- Egorov A.G.* Changes in the Age Composition and Thickness of Winter Ice Cover in the Arctic Seas of Russia in the Early 21st Century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2020, 66 (2): 124–143. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143> [In Russian].
- Kucheiko A.A., Ivanov A.Yu., Davydov A.A., Antonyuk A.Yu.* Drift and Distribution of Icebergs in the Boris Vilkitsky Strait According to Detailed Radar and Optical Satellite Imagery. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. Earth Research from Space. 2015, (5): 73–83. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040065> [In Russian].
- Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P.* The Phenomenon of Arctic Amplification and Its Driving Mechanisms. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. Fundamental and Applied Hydrophysics. 2021, 13 (3): 3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016> [In Russian].
- Lotsiya Karskogo morya. Chast I.* Kara Sea Sailing Directions. Part 1. Leningrad, 1938: 546 p. [In Russian].

- Plan razvitiya Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda.* The Northern Sea Route Development Plan for the Period up to 2035. Moscow, 2022: 57 p. [In Russian].
- Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I.* Variability of Ice Navigation Conditions Along the Northern Sea Route in 1997–2018. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2019, 65 (3): 328–340. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340> [In Russian].
- Tikhonov V.V., Repina I.A., Raev M.D., Sharkov E.A., Boyarskii D.A., Komarova N.Yu.* An Integrative Algorithm for Ice Conditions Determination in Polar Regions from Satellite Microwave Radiometry (VASIA2). *Issled. Zemli iz kosmosa*. Research. Earth from space. 2015, 51(9): 914–928. <https://doi.org/10.1134/S0001433815090194>
- Shalina E.V.* Regional Features of Ice Conditions Changes in the Russian Arctic Seas and Along the Northern Sea Route According to Satellite Observations. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space. 2021, 18 (5): 201–213. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-201-213> [In Russian].
- Shukurov K.A.* Statistical Characteristics of Sea Ice Concentration Variations in the Northern Sea Route Straits in Recent Decades. *Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery: XXVIII Mezhdunarodnyy simpozium*. Atmospheric and Oceanic Optics. Atmospheric Physics: XXVIII International Symposium. Tomsk, 2022: 141–144 [In Russian].
- seoice.uni-bremen: official site. Retrieved from: URL: <https://seoice.uni-bremen.de/data-browser> (Last access: May 10, 2025).
- nsidc.org¹: official site. Retrieved from: URL: https://nsidc.org/data/au_si12/versions/1 (Last access: May 10, 2025).
- nsidc.org²: official site. Retrieved from: URL: <https://n5ei101u.ecs.nsidc.org/PM/NSIDC-0051.002/> (Last access: May 10, 2025).
- nsidc.org³: official site. Retrieved from: URL: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0079/versions/4> (Last access: May 10, 2025).
- AARI: official site. Retrieved from: URL: https://data.aari.ru/odata/_d0015.php (Last access: May 10, 2025).
- rscf.ru: official site. Retrieved from: URL: <https://rscf.ru/project/25-27-00308> (Last access: May 10, 2025).
- 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 Observations. *Remote Sens.* 2019, 11 (21): 2481. <https://doi.org/10.3390/rs11212481>
- Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Gloersen P., Comiso J.C., Zwally H.J.* Deriving Long-Term Time Series of Sea Ice Cover from Satellite Passive-Microwave Multisensor Data Sets. *Journal of Geophysical Research*. 1999, 104: 15803–15814. <https://doi.org/10.1029/1999JC900081>
- Chen X., Zhao J., Zhao Y., Liu X., Ma L., Liu M., Shao Z., Xiao J., Chen Z, Zhang S., Zhao D., Mu F.* Risk Assessment of Ice-Class-Based Navigation in Arctic: A Case Study in the Vilkitsky Strait. *J. Phys. Conf. Ser.* 2024, 2718: 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2718/1/012040>
- Comiso J.C., Meier W.N., Gersten R.* Variability and Trends in the Arctic Sea Ice Cover: Results from Different Techniques. *J. Geophys. Res. Oceans* 2017, 122 (8): 6883–6900. <https://doi.org/10.1002/2017JC012768>
- Comiso J.C.* Characteristics of Arctic Winter Sea Ice from Satellite Multispectral Microwave Observations. *J. Geophys. Res.* 1986, 91: 975–994
- Kern S., Lavergne T., Pedersen L.T., Tonboe R.T., Bell L., Meyer M., Zeigermann L.* Satellite Passive Microwave Sea-Ice Concentration Data Set Intercomparison Using Landsat Data. *The Cryosphere* 2022, 16 (1): 349–378. <https://doi.org/10.5194/tc-16-349-2022>
- 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, 14: 2469–2493. <https://doi.org/10.5194/tc-14-2469-2020>
- Kern S., Lavergne T., Notz D., Pedersen L., Tonboe R., Saldo R., Sørensen A.* 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>
- Kwok R.* Arctic Sea Ice Thickness, Volume, and Multiyear Ice Coverage: Losses and Coupled Variability (1958–2018). *Environ. Res. Lett.* 2018, 13: 105005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae3ec>
- Lavergne T., Sørensen A.M., Kern S., Tonboe R., Notz D., Aaboe S., Bell L., Dybkjær G., Eastwood S., Gabarro C., Heygster G., Killie M.A., Kreiner M.B., Lavelle J., Saldo R., Sandven S., Pedersen L.T.* Version 2 of the EU-METSAT OSI SAF and ESA CCI Sea-Ice Concentration Climate Data Records. *The Cryosphere* 2019, 13: 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>
- Liu M., Zhao J., Zhao J., Gnatiuk N., Shalina E., Chen X., Shao Z., Xiao J., Chen Z, Zhang S., Zhao D., Mu F.* The Influence of Landfast Ice on the Navigation in the Arctic Northeast Passage. *J. Phys. Conf. Ser.* 2024, 2718: 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2718/1/012011>

- Markus T., Cavalieri D.J.* The AMSR-E NT2 sea ice concentration algorithm: its basis and implementation. *J. Remote Sens. Soc. Jpn.* 2009, 29: 216–225
- Morice C.P., Kennedy J.J., Rayner N.A., Winn J.P., Hogan E., Killick R.E., Dunn R.J.H., Osborn T.J., Jones P.D., Simpson I.R.* An Updated Assessment of Near-Surface Temperature Change from 1850: the HadCRUT5 Data Set. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2021, 126: e2019JD032361.
<https://doi.org/10.1029/2019JD032361>
- Serreze M., Barry R.* Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis. *Glob. Planet. Change* 2011, 77 (1–2): 85–96.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- Serreze M., Meier W.* The Arctic's Sea Ice Cover: Trends, Variability, Predictability, and Comparisons to the Antarctic. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2019, 1436 (1): 36–53.
<https://doi.org/10.1111/nyas.13856>
- Shukurov K.A., Semenov V.A.* Large-Scale Atmospheric Circulation Patterns Favoring Sea Ice Concentration Extremes in the Northern Sea Route Straits in June–November of 1979–2017. *Proc. 27th Int. Symp. Atmos. Ocean Opt.* 2021, 11916: 1030–1035.
<https://doi.org/10.1117/12.2601742>
- Simmonds I., Li M.* Trends and Variability in Polar Sea Ice, Global Atmospheric Circulations, and Baroclinicity. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2021, 1504 (1): 167–186.
<https://doi.org/10.1111/nyas.14592>
- Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea Ice Remote Sensing Using AMSR-E 89-GHz Channels. *J. Geophys. Res. Oceans* 2008, 113: C02S07.
<https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- 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>
- Wang Q., Lu P., Zu Y., Li Z., Leppäranta M., Zhang G.* Comparison of Passive Microwave Data with Shipborne Photographic Observations of Summer Sea Ice Concentration Along an Arctic Cruise Path. *Remote Sens.* 2019, 11 (17): 2009.
<https://doi.org/10.3390/rs11172009>
- Wang X., Guo Z., Zhao Y., Yang Z.* Sea Ice Concentration Inversion Based on ASI Algorithm Combined with Bootstrap Algorithm. *Ecol. Indic.* 2024, 158: 111484.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111484>
- Yu M., Lu P., Li Z.* Sea Ice Conditions and Navigability Through the Northeast Passage in the Past 40 Years Based on Remote-Sensing Data. *Int. J. Digit. Earth* 2021, 14 (5): 555–574.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2021.1886355>
- Zhou W., Leung L.R., Lu J.* Steady Threefold Arctic Amplification of Externally Forced Warming Masked by Natural Variability. *Nat. Geosci.* 2024, 17: 508–515.
<https://doi.org/10.1038/s41561-024-01432-2>