# Региональные особенности изменения ледовой обстановки в морях российской Арктики и на трассе Северного морского пути по данным спутниковых наблюдений

### Е.В.Шалина

#### Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», Санкт-Петербург, 199034, Россия E-mail: elena.shalina@niersc.spb.ru Санкт-Петербургский государственный университет Институт наук о Земле

Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле Санкт-Петербург, 199034, Россия

В статье приведены данные о сокращении протяжённости ледяного покрова арктических морей России за период с 1979 по 2020 г., полученные на базе спутниковых измерений. Наблюдения показывают, что во всех морях в летние и осенние месяцы прослеживается тенденция сокращения протяжённости ледяного покрова, которая сопровождается его значительной изменчивостью от года к году. В Карском и Чукотском морях заметные изменения в ледяном покрове произошли на временном отрезке с июня по ноябрь, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском — с июля по октябрь. Сравнение ежедневных данных за 2015–2020 гг. со средней протяжённостью ледяного покрова в последние две декады предыдущего столетия показало, что разрушение ледяного покрова в последние годы начинается раньше, а его формирование осенью происходит позже, причём изменения в каждом из морей имеют свою специфику. Наибольшие изменения по сравнению с ледовой обстановкой предыдущего столетия наблюдаются в Восточно-Сибирском море. Анализ доступности Северного морского пути (СМП) проведён для одной из возможных траекторий движения из группы оптимальных трасс. Наиболее существенные изменения ледовых условий на трассе при сопоставлении с периодом 1979–1999 гг. относятся к периоду с июля по октябрь. В июле в среднем сплочённость ледяного покрова сократилась на 3,2 балла, а в октябре — на 4,8. Наиболее благоприятные ледовые условия на трассе СМП наблюдались в 2019 и 2020 гг.

**Ключевые слова:** морской лёд, Арктика, сокращение ледяного покрова, моря Российской Арктики, Северный морской путь, дистанционное зондирование, потепление климата

Одобрена к печати: 31.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-201-213

### Введение

Сокращение арктического ледяного покрова — один из самых ярких показателей продолжающегося изменения климата (Landrum, Holland, 2020; Serreze, Barry, 2011). Наряду с уменьшением ледяного покрова, как по протяжённости, так и по толщине (см., например, работы (Cavalieri, Parkinson 2012; Shalina et al., 2020a, b; Stroeve, Notz, 2018)), сокращается площадь многолетних льдов (Tschudi et al., 2020), сезон таяния расширяется (Meleshko et al., 2020; Stroeve et al., 2014), а скорость дрейфа льда и скорость его деформации увеличиваются (Kaur et al., 2019; Rampal et al., 2009). Пристальное внимание учёных к арктическим льдам связано как с их воздействием на погодные условия и климат, так и с влиянием на развитие хозяйственной деятельности в регионе. Трансформация ледяного покрова сильнее всего проявляется в летний сезон, а территориально изменения наиболее заметны в морях, омывающих Российскую Федерацию, и в море Бофорта. Региональные изменения рассматриваются в публикациях реже, чем глобальные трансформации льдов Арктики (Meleshko et al., 2020; Onarheim et al., 2018), между тем изменения ледяного покрова в различных районах Арктики по-разному влияют, например, на формирование атмосферной циркуляции. Разумеется, региональные особенности изменений ледяного покрова имеют большое значение при планировании любой активности в Арктической зоне. Настоящая работа посвящена рассмотрению именно региональных особенностей сокращения ледяного покрова за период спутниковых

наблюдений, причём отдельно рассмотрены изменения, произошедшие на трассе Северного морского пути (СМП) за указанный период.

Большая часть нашего понимания изменений, произошедших с арктическими льдами, базируется на спутниковых данных от пассивных микроволновых радиометров. Измерения начались в октябре 1978 г. Они позволили осуществлять непрерывный мониторинг сплочённости и общей протяжённости морского льда с охватом всей Арктики через день до июля 1987 г. и каждый день после этого срока. Во всех работах, основанных на обработке указанных данных и посвящённых обсуждению деградации ледяного покрова в Арктике, отмечается, что наиболее заметное сокращение ледяного покрова произошло в летние месяцы, в сентябре, в конце летнего сезона таяния (Cavalieri, Parkinson, 2012 и др.). В сентябре 2020 г. был зафиксирован второй по величине минимум протяжённости ледяного покрова (Arctic..., 2020) по данным всех крупных провайдеров спутниковых данных по льду, включая NSIDC (англ. National Snow and Ice Data Center, Национальный центр данных по исследованию снега и льда, США), AWI (анел. Alfred Wegener Institute, Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Германия), OSI SAF (англ. Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, подразделение Европейской организации спутниковой метеорологии EUMETSAT (англ. European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)) и JAXA (англ. Japan Aerospace Exploration Agency, Японское агентство аэрокосмических исследований). Рекордный минимум был отмечен в сентябре 2012 г. Оба минимума (2012 и 2020 гг.) отстоят от среднего значения протяжённости сентябрьского ледяного покрова за период 1979-2010 гг. более чем на два стандартных отклонения.

Спутниковые наблюдения показывают, что сокращение протяжённости арктического ледяного покрова к сентябрю 2016 г. на 89 % определялось изменением ледовых условий в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Бофорта (Onarheim et al., 2018), что указывает на изменение сроков и условий ледообразования в морях Российской Арктики. По данным ледовых карт Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) (Егоров, 2020), в арктических морях России за период 1997–2018 гг. в среднем увеличилось количество ниласовых, молодых и тонких однолетних льдов, уменьшилась площадь средних и толстых однолетних льдов, площадь двухлетних и многолетних льдов сократилась примерно в 10 раз. В возрастной структуре льдов произошёл существенный сдвиг: замена двухлетних и многолетних льдов толщиной более 250 см на однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см. Анализ положения южной границы льдов на картах ААНИИ в сентябре (Виноградняя и др., 2020) подтверждает устойчивое сокращение площади старых льдов за последние два десятилетия. Сместились сроки летнего таяния льдов и начала ледообразования осенью во всех морях Российской Арктики (Meleshko et al., 2020); таким образом, увеличилась продолжительность безлёдного периода на трассах СМП.

### Данные

Настоящая работа посвящена анализу данных о ледяном покрове, полученных на базе спутниковых пассивных микроволновых измерений за период с 1979 по 2020 г. Карты ААНИИ, построенные с учётом экспертной оценки каждой ледовой ситуации (Афанасьева и др., 2019), точнее и подробнее описывают ледовую обстановку, однако для морей Евразийской Арктики они доступны начиная с 1998 г. с частотой одна карта в неделю, что ограничивает возможности анализа. При выборе спутниковых данных о ледяном покрове встаёт вопрос о выборе алгоритма расчёта ледовых характеристик. Используемые алгоритмы построены на разных подходах к вычислению характеристик ледяного покрова (Заболотских, 2019; Тихонов и др., 2016; Alekseeva et al., 2019; Ivanova et al., 2014, 2015; Kern et al., 2019; Shalina et al., 2020а); они используют разные допущения для преодоления объективных ограничений, присущих методам пассивной микроволновой радиометрии. Поскольку в настоящей работе одной из задач было исследование доступности СМП, который в настоящее время наиболее активно используется в летний сезон, основным критерием при выборе алгоритма рас-

чёта сплочённости льда стала точность получаемых данных в летние месяцы в прикромочной зоне. Исследование (Kern et al., 2019) содержит сравнение сплочённостей льда, полученных на базе 10 основных алгоритмов, расчёты по которым доступны онлайн, и данных наблюдений с судов (около 8000 наблюдений), выполнявшихся по протоколу ASSIST (англ. Arctic Ship-based Sea-Ice Standardization) с июня 2002 по декабрь 2015 г. В работе (Kern et al., 2019) показано, что наименьшее расхождение с судовыми наблюдениями летом (с мая по сентябрь) обеспечивают расчёты сплочённости по алгоритму Boorstrap (Comiso, 1986; Comiso, Nishio, 2008; Comiso et al., 2017а). Именно эти данные, доступные на сайте NSIDC (https://nsidc. org/data/nsidc-0079), использованы в настоящем исследовании. Последняя реализация этого алгоритма использует динамические (меняющиеся ежедневно) точки привязки для льда и воды, что, в частности, позволяет точнее описывать ледовую обстановку в прикромочной зоне (Comiso et al., 2017b). Сравнение сплочённостей, полученных на базе упомянутых выше десяти самых используемых алгоритмов, с данными, рассчитанными по измерениям прибора MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) для периода с мая по сентябрь 2003–2011 гг. (Kern et al., 2020), продемонстрировало, что разные алгоритмы по-разному реагируют на развитие процесса таяния. Авторы отмечают, что полученные расхождения между результатами расчётов по данным прибора MODIS и по данным пассивных микроволновых радиометров в целом плохо коррелируют с развитием снежниц на поверхности льда. Это объясняется тем, что во время сезона таяния не только снежницы влияют на микроволновый сигнал, принятый от ледяной поверхности, соответствующей пикселю изображения, но также наличие в этот период на льду снега разной степени талости, подмёрзшего или свежего, новых форм льда и пр. (Kern et al., 2016). Разные процессы по-разному влияют на яркостную температуру, регистрируемую на разных частотах и разной поляризации, не обязательно занижая сплочённость льда в сезон таяния. Кроме того, вероятно, что все упомянутые процессы не исключаются полностью при выборе точек привязки для льда, используемых в алгоритмах. Так, сплочённость льда, рассчитанная по алгоритму Bootstrap, в основном превышает результаты расчётов по данным прибора MODIS. Расчёты по другим алгоритмам дают разные по знаку расхождения с оптическими наблюдениями. Отметим, что упомянутое сравнение между описанием ледяного покрова по данным MODIS и пассивных микроволновых радиометров не включало, как правило, прикромочную зону (Kern et al., 2020) (см. puc. 4), пиксели которой по разным причинам (связанным с требованиями к точности) были исключены из анализа. Сопоставление алгоритмов (Kern et al., 2019, 2020) показывает, что, хотя точность расчёта сплочённости (а значит и площади) льдов по разным алгоритмам остаётся неясной (но точно невысокой в сезон таяния), использование при анализе спутниковых данных протяжённости ледяного покрова, определяемой как площадь акватории, занятой льдом сплочённостью более 0,15 (*англ.* extent), вызывает минимум возражений.

#### Ледовая обстановка в морях Российской Арктики: изменчивость и тренды

Несмотря на то, что цель настоящего исследования состоит в анализе ледовой обстановки в морях, через которые проходят трассы СМП, естественно вначале кратко рассмотреть, как менялся за доступный нам срок наблюдений ледяной покров Арктики в целом. Как показывают спутниковые данные (*puc. 1a*, см. с. 204), средняя за год протяжённость ледяного покрова сокращалась с 1979 г. в среднем со скоростью 4,3 % за декаду (референтный период 1980–2010 гг.), что выражается в уменьшении протяжённости примерно на 2,3 млн км<sup>2</sup> за весь период наблюдений. В летние месяцы сокращение происходило более интенсивно. Так, в сентябре ледяной покров сокращался со средней скоростью 12,7 % за декаду, или  $88\cdot10^3$  км<sup>2</sup> в год, что соответствует уменьшению протяжённости ледяного покрова примерно наполовину за весь период наблюдений. Региональные особенности сентябрьского сокращения ледяного покрова иллюстрирует *puc. 16*, который показывает разницу (в баллах) между ледяным покрытием сентября 2020 г. и средним за первые 10 лет спутниковых наблюдений. Синий цвет показывает уменьшение сплочённости. Видно, что основные изменения произошли в морях Российской Арктики и в море Бофорта.

Изменение ледовой обстановки в арктических морях России по месяцам за 42 года наблюдений представлено на *рис. 2* (см. с. 205). На рисунке показано, как менялась протяжённость ледяного покрова (*англ.* sea ice extent — SIE) в каждом месяце с 1979 по 2020 г. Красными точками отмечены значения, зафиксированные в начале периода наблюдений — в 1979 г., и каждая из 12 кривых демонстрирует изменение SIE от 1979 к 2020 г. Дополнительная информация, представляющая изменения численно, содержится в *табл. 1.* В таблице показано, насколько уменьшилась протяжённость ледяного покрова к 2020 г., сколько эта величина составляет по отношению к площади моря в процентах и какова изменчивость SIE относительно линейного тренда, описывающего сокращение ледяного покрова.



*Рис. 1.* Протяжённость ледяного покрова Северного Ледовитого океана с 1979 по 2020 г., средняя за год и в сентябре со среднеквадратическим отклонением (*a*). Изменение сентябрьского ледяного покрова за тот же период в баллах (*б*)

Таблица	1.	Сокращение	протяжённости	ледяного	покрова	$(\Delta SIE)$	за пери	од 1	1979—2020 г.	Г. Е	в единицах
10 <sup>3</sup> км <sup>2</sup> и	ΙB	процентах, а	также среднекв	адратичес	кое откло	нение	(StErr) S	SIE	относителы	ю	линейного
			тре	нда сокра	щения (10	$()^3 \text{ Km}^2)$					

Месяц	Карское море			Море Лаптевых			Восточно-Сибирское море			Чукотское море		
	ΔSIE	ΔSIE, %	StErr	ΔSIE	ΔSIE, %	StErr	ΔSIE	ΔSIE, %	StErr	ΔSIE	ΔSIE, %	StErr
1	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2			9									
3			1									
4			5									
5	25	3	4			0,6			5	78	18	15
6	240	29	56	53	7	29	33	4	29	215	49	50
7	621	75	124	542	70	75	303	32	70	182	41	59
8	509	61	116	603	77	142	872	93	203	142	32	54
9	376	45	129	589	76	151	901	96	196	122	28	52
10	772	93	164	675	87	66	867	92	113	245	56	75
11	429	52	95	0	0	0	0	0	5	343	78	89
12	78	9	37						0	0	0	5



*Рис. 2.* Изменение протяжённости ледяного покрова в арктических морях России в каждом месяце с 1979 по 2020 г. Красная точка отмечает значение, зафиксированное в 1979 г.

Анализируя полученные данные, можно отметить следующее.

- 1. Во всех морях в летние и осенние месяцы прослеживается тенденция сокращения протяжённости ледяного покрова, при этом наблюдается также значительная изменчивость этого параметра от года к году.
- 2. Схожие изменения наблюдаются в Карском и Чукотском морях, а также в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском.
- 3. В первой паре, моря которой подвержены влиянию Атлантики (Карское) и Тихого океана (Чукотское), заметные изменения в ледяном покрове произошли уже в июне. Тенденция сокращения ледяного покрова в этом месяце составляет 3,0·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>/год в Карском и 3,2·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>/год в Чукотском море. Значительные изменения произошли в этих морях также в ноябре: тенденция уменьшения протяжённости ледяного покрова составила 5,6·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>/год в Карском и 7,2·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>/год в Чукотском морях.

В море Лаптевых и Восточно-Сибирском ни в ноябре, ни в июне заметных изменений за 42 года не произошло.

- 4. В июле, августе, сентябре и октябре во всех морях наблюдалось сокращение протяжённости ледяного покрова. В море Лаптевых и Восточно-Сибирском море наибольшая скорость уменьшения протяжённости льдов зафиксирована для сентября, она составила 11,8·10<sup>3</sup> и 18,7·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>/год соответственно. В Карском море тенденция сокращения в августе и октябре описывается большими значениями, чем в сентябре и составляет примерно 12·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>/год, в то время как в сентябре это около 9·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>/год. В сентябре 2020 г. все рассматриваемые моря были практически свободны ото льда.
- 5. В процентном отношении наибольшие изменения зафиксированы в ситуациях, когда море в начале периода наблюдений в определённый месяц было почти полностью покрыто льдом, а в 2020 г. — практически свободно ото льда. Такие условия наблюдались в октябре в Карском море и в августе, сентябре и октябре в Восточно-Сибирском море.
- 6. Симметричность изменений относительно сентября разная. Нарастание ледяного покрова в Восточно-Сибирском море и в море Лаптевых происходит интенсивнее, чем в двух других морях, и более решительно, чем таяние в весенние месяцы.
- 7. Во всех морях тенденция сокращения ледяного покрова сопровождается значительной изменчивостью его протяжённости от года к году. Например, в сентябре 1995 г. море Лаптевых значительно освободилось ото льда и протяжённость ледяного покрова составила 78,6·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>, а в следующем 1996 г., в сентябре, была зафиксирована протяжённость на порядок больше 780·10<sup>3</sup> км<sup>2</sup>. Изменчивость протяжённости относительно линейного тренда, описывающего сокращение ледяного покрова, приведена в *табл. 1* (колонка StErr).

В последние несколько лет, с одной стороны, всё чаще наблюдаются минимальные для конкретного месяца значения протяжённости ледяного покрова; с другой — изменчивость ледяного покрова от года к году остаётся чрезвычайно высокой. Чтобы оценить конкретнее вариабельность ледовых условий в последние годы, были проанализированы ежедневные данные о ледяном покрове за 2015–2020 гг. Эти данные приведены на *рис. 3* (см. с. 207), где показано, какая часть моря (в процентах) была занята льдом с января по декабрь. Изменения, произошедшие с начала текущего столетия, видны из сопоставления наблюдений последних лет со средними за период 1979–1999 гг.

В последние годы начало разрушения ледяного покрова в Карском море наблюдалось в мае – июне. Море освобождалось ото льда наполовину самое раннее в 20-х числах июня, самое позднее — в середине июля. Средний срок 50%-го освобождения моря ото льда в 1979– 1999 гг. — середина августа. Наиболее плавное сокращение ледяного покрова в последние годы наблюдалось в 2020 г. и составляло 1,4 % общей площади моря в день. Самое быстрое сокращение происходило в 2018 г., когда ледяной покров сокращался со скоростью 3,2 % площади моря в день, и в итоге море очистилось ото льда практически за месяц. В сентябре в 2015–2020 гг. Карское море полностью освобождалось ото льда, за исключением 2017 г., когда небольшое количество льда оставалось в восточной части моря.

Море Лаптевых полностью освободилось ото льда лишь в сентябре 2020 г., в остальные годы лёд там присутствовал, причём в сентябре 2016 г., например, льдом было покрыто 31— 38 % моря. Ледовые условия в этом море наиболее изменчивы от года к году. Так, 50%-е покрытие льдом в 2020 г. наблюдалось в конце июня, а в 2016 г. — только в конце августа, т.е. в эти годы разница в сроке освобождения моря ото льда наполовину составляет 2 мес. В 2016 г. разрушение ледяного покрова началось даже позже, чем это наблюдалось в среднем в 1979–1999 гг.

Восточно-Сибирское море полностью освобождалось ото льда в сентябре 2019 и 2020 гг., причём в обоих случаях безлёдный период длился дольше одного месяца. Это море также характеризуется значительной изменчивостью ледовых условий от года к году: в 2020 г. оно освободилось ото льда наполовину в середине июля, а в 2018 г. лишь в 20-х числах августа. Заметим, что именно в Восточно-Сибирском море отмечаются наибольшие изменения по сравнению с ледовой обстановкой предыдущего столетия.



*Рис. 3.* Ежедневное покрытие льдом арктических морей России в процентах от общей площади моря в 2015–2020 гг. и в среднем за 1979–1999 гг.; серая заливка показывает значения СКО относительно среднего в 1979–1999 гг.

В Чукотском море разрушение ледяного покрова начиналось в мае; в 2018 и 2019 гг. к концу мая ледяной покров занимал лишь 60 % общей площади моря. Безлёдный период в этом море наиболее продолжительный по сравнению с другими тремя морями. Во все годы, за исключением 2016 г., безлёдный период длился не менее 2,5 мес. Сокращение ледяного покрова происходило в среднем со скоростью 1,1 % площади моря в день, нарастание шло более интенсивно — в среднем со скоростью около 1,6 % площади моря в день.

### Анализ доступности Северного морского пути

Трасса СМП пролегает через моря Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское. Положение наиболее благоприятного варианта пути по трассе СМП определяется наличием и характеристиками ледяного покрова на пути судна. Фактический вариант движения по СМП зависит от ледовой обстановки в каждом конкретном случае. В настоящем исследовании анализ выполнен для одной из «оптимальных» трасс движения (см. карту на *puc. 4*), описанных ААНИИ в «Справочнике по ледовым условиям плавания на трассах Северного Морского пути» (http://www.aari.ru/resources/a0011\_12/manual\_smp/content.html), которая в тёплое время года соответствует разреженным и редким льдам на трассе или их отсутствию. Анализ ледовых условий плавания по трассе СМП в апреле – мае 1997–2018 гг., т.е. в период наибольшего развития ледяного покрова, содержится в работе (Третьяков и др., 2019).



*Рис. 4.* Ежедневная средняя сплочённость в баллах на участках СМП в 2015—2020 гг., а также осреднённая за 1979—1999 гг. сплочённость и её среднеквадратическое отклонение на четырёх участках трассы

Доступность СМП иллюстрирует *рис.* 4, на котором показан ход ежедневной средней сплочённости в секторах СМП в последние годы, с 2015 по 2020 г., а также осреднённая за 1979–1999 гг. сплочённость на тех же участках трассы. Серой заливкой показано среднеквадратическое отклонение в 1979–1999 гг. Сравнивая ледовые условия на трассе СМП в две заключительные декады прошлого столетия и в последние годы, отметим, что теперь во всех морях разрушение ледяного покрова и освобождение ото льда СМП летом происходит раньше, а формирование ледяного покрова осенью — позже. Это согласуется с выводами статьи (Егоров, 2020) о том, что льды в морях российской Арктики стали существенно тоньше (тонкие льды быстрее тают и легче разрушаются), а также с данными о более раннем начале летнего таяния и более позднем начале ледообразования во всей Арктике (Meleshko et al., 2020; Stroeve et al., 2014). Не вдаваясь в детали исследований о влиянии различных параметров климатической системы на температуру воды, заметим, что лёд играет существенную роль в формировании поля температуры воды в Арктике (Carvalho, Wang, 2020) и раннее разрушение и таяние ледяного покрова приводит к более длительному периоду открытой воды и более интенсивному нагреванию водной поверхности, в результате чего происходит запаздывание формирования ледяного покрова осенью. Кроме сдвига сроков разрушения и формирования ледяного покрова на трассе СМП изменилась скорость этих процессов: и разрушение, и нарастание ледяного покрова происходят быстрее, чем ранее, особенно это проявлено в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых осенью, при ледообразовании. Наиболее существенные изменения ледовых условий на рассматриваемой трассе относятся к периоду с июля по октябрь, причём в октябре изменения более значительны. В среднем по всем морям сплочённость льда в июле уменьшилась на 3,2 балла, а в октябре — на 4,8 баллов. Наименьшие изменения по сравнению с предыдущим столетием произошли на части трассы, проходящей в Чукотском море. Наибольшие изменения на трассе зафиксированы в морях Восточно-Сибирском и Лаптевых в октябре, где сплочённость льда уменьшилась в среднем на 6,3 и 5,4 балла соответственно.

Часть СМП в море	Сплочённость	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	Среднее за 2015-2020 гг.,
				ДІ	дни			
Карском	<1,5	93	106	84	96	115	109	101
	Чистая вода	41	39	27	71	67	82	55
Лаптевых	<1,5	81	65	62	94	94	108	84
	Чистая вода	19	18	1	70	67	87	44
Восточно-	<1,5	80	85	81	67	89	107	85
Сибирском	Чистая вода	49	57	51	38	72	95	60
Чукотском	<1,5	132	124	127	106	125	137	125
	Чистая вода	120	110	102	97	103	118	108

*Таблица 2*. Количество дней, когда средняя сплочённость на четырёх участках трассы СМП была менее 1,5 и когда лёд отсутствовал

Поскольку наиболее благоприятная ледовая ситуация — это полное отсутствие льда на трассе или его минимальное количество, в *табл. 2* рассчитано и приведено количество дней, когда средняя сплочённость на рассмотренных участках трассы в 2015–2020 гг. была менее 1,5 баллов и когда лёд на трассе практически отсутствовал. Наиболее продолжительный безлёдный период наблюдался в Чукотском море (до четырёх месяцев), наименее продолжительный безный — в море Лаптевых. На части СМП в море Лаптевых продолжительность безлёдного периода наиболее изменчива, как и ледовые условия в целом. Так, средняя сплочённость, равная 5, наблюдалась на трассе в этом море как в первой декаде июня, так и в последней декаде июля, с разницей в 50 дней. В целом можно отметить, что наиболее благоприятные ледовые условия на трассе СМП наблюдались в 2019 и 2020 гг.

#### Заключение

В работе с использованием спутниковых данных проанализированы изменения ледяного покрова арктических морей России в течение 1979-2020 гг. Показано, что во всех морях в летние и осенние месяцы наблюдается тенденция сокращения протяжённости ледяного покрова, которая сопровождается его значительной изменчивостью от года к году. В Карском и Чукотском морях заметные изменения ледяного покрова зафиксированы на временном отрезке с июня по ноябрь, а в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море основные изменения сконцентрированы в четырёхмесячном периоде с июля по октябрь. В отдельные месяцы сокращение ледяного покрова от начала периода наблюдений к 2020 г. составило более 90 %. В последние годы всё чаще наблюдаются минимальные для конкретного месяца значения протяжённости ледяного покрова, но изменчивость ледовых условий остаётся чрезвычайно высокой. Сравнение ежедневных данных за 2015-2020 гг. со средней протяжённостью ледяного покрова в последние две декады предыдущего столетия показало, что разрушение ледяного покрова весной начинается раньше, а его формирование осенью стартует позже. Полученные результаты поддерживают заключение работы (Егоров, 2020) о том, что в арктических морях России в текущем столетии однолетние льды стали образовываться примерно на месяц позже. Наибольшие изменения по сравнению с ледовой обстановкой предыдущего столетия наблюдаются в Восточно-Сибирском море. Анализ доступности СМП проведён для одной из возможных траекторий движения из группы оптимальных трасс. Наиболее существенные изменения ледовых условий на трассе при сопоставлении с периодом 1979–1999 гг. относятся к периоду с июля по октябрь. В июле в среднем сплочённость ледяного покрова сократилась на 3,2 балла, а в октябре — на 4,8. Наиболее благоприятные ледовые условия на трассе СМП наблюдались в 2019 и 2020 гг.

Исследования, представленные в данной статье, выполнены в рамках грантов, полученных в 2021 г. от Научного фонда «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена» (Нансен-центр) (*англ*. Nansen Environmental and Remote Sensing Centre) и Научного общества им. Нансена (*англ*. Nansen Scientific Society), Берген, Норвегия.

## Литература

- 2. Виноградняя Е. С., Егорова Е. С., Шевелева Т. В., Юлин А. В. Изменчивость положения границ старых льдов в весенний период и остаточных льдов в осенний период в Северном Ледовитом океане в текущем климатическом периоде // Российская Арктика. 2020. Т. 2(9). С. 41–55.
- 3. *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.
- 4. *Заболотских Е. В.* Обзор методов восстановления параметров ледяного покрова по данным спутниковых микроволновых радиометров // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 128–151. DOI: 10.31857/S0002-3515551128-151.
- 5. *Тихонов В. В., Раев М.Д., Шарков Е.А., Боярский Д.А., Репина И.А., Комарова Н.Ю.* Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов: Обзор // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84.
- 6. *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. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340.
- 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. Art. No. 2481. https://doi.org/10.3390/ rs11212481.
- 8. Arctic sea ice minimum is 2<sup>nd</sup> lowest on record // WMO news. 22.09.2020. URL: https://public.wmo.int/ en/media/news/arctic-sea-ice-minimum-2nd-lowest-record.

<sup>1.</sup> Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20.

- 9. *Carvalho K.S., Wang S.* Sea surface temperature variability in the Arctic Ocean and its marginal seas in a changing climate: Patterns and mechanisms // Global and Planetary Change. 2020. V. 193. Art. No. 103265. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103265.
- Cavalieri D. J., Parkinson C. L. Arctic Sea ice variability and trends, 1979–2010. // The Cryosphere. 2012. V. 6. P. 881–889.
- 11. *Comiso J. C.* Characteristics of arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // J. Geophysical Research. 1986. V. 91. P. 975–994.
- 12. Comiso J. C., Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data // J. Geophysical Research. 2008. V. 113. Art. No. C02S07. https://doi. org/10.1029/2007JC004257.
- 13. Comiso J. C., Meier W. N., Gersten R. A. (2017a) Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. P. 6883–6900. https://doi.org/10.1002/2017JC012768.
- Comiso J. C., Gersten R. A., Stock L. V., Turner J., Perez G. J., Cho K. (2017b) Positive trend in the Antarctic Sea ice cover and associated changes in surface temperature // J. Climate. 2017. V. 30. Iss. 6. P. 2251–2267. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0408.1.
- 15. *Ivanova N., Johannessen O. M., Pedersen L. T., Tonboe R. T.* Retrieval of Arctic Sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: a comparison of eleven sea ice algorithms // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2014. V. 52. P. 7233–7246.
- Ivanova N., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Kern S., Heygster G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M. Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 1797–1817. https://doi.org/10.5194/tc-9-1797-2015.
- 17. *Kaur S.*, *Ehn J. K.*, *Barber D. G.* Pan-arctic winter drift speeds and changing patterns of sea ice motion: 1979–2015 // Polar Record. 2019. V. 54(5–6). P. 303–311. https://doi.org/10.1017/S0032247418000566.
- Kern S., Rösel A., Pedersen L. T., Ivanova N., Saldo R., Tonboe R. T. The impact of melt ponds on summertime microwave brightness temperatures and sea-ice concentrations // The Cryosphere. 2016. V. 10. P. 2217–2239. https://doi.org/10.5194/tc-10-2217-2016.
- 19. *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. DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019.
- 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.
- 21. Landrum L., Holland M. M. Extremes become routine in an emerging new Arctic // Nature Climate Change. 2020. V. 10. P. 1108–1115. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0892-z.
- 22. *Meleshko V.P., Pavlova T., Bobylev L.P., Golubkin P.* Current and projected sea ice in the Arctic in the twenty-first century // Sea Ice in the Arctic. Cham: Springer, 2020. Ch. 10. P. 399–464. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21301-5\_10.
- 23. Onarheim I. H., Eldevik T., Smedsrud L. H., Stroeve J. C. Seasonal and regional manifestation of Arctic Sea ice loss // J. Climate. 2018. V. 31. P. 4917–4932. DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0427.1.
- Rampal P., Weiss J., Marsan D. Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979–2007 // J. Geophysical Research. 2009. V. 114(C5). Art. No. C05013. https://doi. org/10.1029/2008JC005066.
- 25. *Serreze M. C., Barry R. G.* Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis // Global and Planetary Change. 2011. V. 77. P. 85–96. http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
- Shalina E. V., Johannessen O. M., Sandven S. (2020a) Changes in Arctic Sea Ice Cover in the Twentieth and Twenty-First Centuries // Sea Ice in the Arctic. Cham: Springer, 2020. Ch. 4. P. 93–166. https://doi. org/10.1007/978-3-030-21301-5\_4.
- 27. Shalina E. V., Khvorostovsky K., Sandven S. (2020b) Arctic Sea Ice Thickness and Volume Transformation // Sea Ice in the Arctic. Cham: Springer, 2020. Ch. 5. P. 167–246. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21301-5\_5/.
- Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic Sea ice across all seasons // Environmental Research Letters. 2018. V. 13. Art. No. 103001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade5.
- Stroeve J. C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. P. 1216–1225. https://doi. org/10.1002/2013GL058951
- 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.

# Regional variability of sea ice in the Russian Arctic and on the Northern Sea Route observed from satellites

## E.V. Shalina

### Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre Saint Petersburg 199034, Russia E-mail: elena.shalina@niersc.spb.ru Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia

Manifestation of the reduction of sea ice extent in the Russian Arctic is analyzed using satellite data of 1979–2020. Observations demonstrate that in all seas there is a tendency of decrease in regional sea ice extent in summer and autumn, which is accompanied by its significant variability from year to year. In the Kara and Chukchi Seas, noticeable changes in the ice cover occurred in the time period from June to November, in the Laptev Sea and the East Siberian Sea from July to October. Comparison of daily data of 2015–2020 with the average sea ice extent in the last two decades of the previous century has shown that the destruction of the ice cover in recent years begins earlier, and its formation in autumn occurs later, changes in each of the seas having their own specifics. The largest changes in comparison with the ice conditions of the previous century are observed in the East Siberian Sea. The analysis of the sea ice conditions of the Northern Sea Route was carried out for one of the possible navigation trajectories from the group of optimal routes. The most significant changes in sea ice conditions in recent years when compared with the period 1979–1999 belong to the time interval from July to October. In July, on average, the sea ice concentration has decreased by 32 % and in October by 48 %. The most favorable sea ice conditions on the Northern Sea Route were observed in 2019 and 2020.

**Keywords:** sea ice, sea ice loss, Arctic, seas of the Russian Arctic, Northern Sea Route, remote sensing, climate change

Accepted: 31.08.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-201-213

### References

- 1. Afanasyeva E. V., Alekseeva T. A., Sokolova Yu. V., Demchev D. M., Chufarova M. S., Bychenkov Yu. D., Devyataev O. S., AARI methodology for sea ice charts composition, *Rossiiskaya Arktika*, 2019, No. 7, pp. 5–20 (in Russian), DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071.
- 2. Vinogradnyaya E. S., Egorova E. S., Sheveleva T. V., Yulin A. V., Variability of the spring old ice and fall residual ice boundary in the Arctic Ocean over the current period of climate changes, *Rossiiskaya Arktika*, 2020, Vol. 2(9), pp. 41–55 (in Russian).
- Egorov A. G., The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21<sup>st</sup> century, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2020, Vol. 66, No. 2, pp. 124–143 (in Russian), https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143.
- 4. Zabolotskikh E. V., Review of methods to retrieve sea-ice parameters from satellite microwave radiometer data, *Izvestiya*, *Atmospheric and oceanic physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 110–128.
- 5. 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, review, *Issledovanie zemli iz kosmosa*, 2016, No. 4, pp. 65–84 (in Russian).
- Tretyakov V., Frolov S., Sarafanov M., The variability of ice conditions along the Northern Sea Route for the period 1997–2018, *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2019, Vol. 65, No. 3, pp. 328–340 (in Russian), DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-328-340.
- 7. Alekseeva T., Tikhonov V., Frolov S., Repina I., Raev M., Sokolova Yu., 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, Vol. 11, pp. 2481, https://doi. org/10.3390/rs11212481.
- 8. Arctic sea ice minimum is 2<sup>nd</sup> lowest on record, *WMO news*, 22.09.2020, available at: https://public.wmo. int/en/media/news/arctic-sea-ice-minimum-2nd-lowest-record.
- 9. Carvalho K. S., Wang S., Sea surface temperature variability in the Arctic Ocean and its marginal seas in a changing climate: Patterns and mechanisms, *Global and Planetary Change*, 2020, Vol. 193, https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103265.

- 10. Cavalieri D.J., Parkinson C.L., Arctic Sea ice variability and trends, 1979–2010, *The Cryosphere*, 2012, Vol. 6, pp. 881–889.
- 11. Comiso J. C., Characteristics of arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations, *J. Geophysical Research*, 1986, Vol. 91, pp. 975–994.
- Comiso J. C., Nishio F., Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data, J. Geophysical Research, 2008, Vol. 113, Art. No. C02S07, https://doi. org/10.1029/2007JC004257.
- 13. Comiso J. C., Meier W. N., Gersten R. A. (2017a), Variability and trends in the Arctic Sea ice cover: Results from different techniques, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, pp. 6883–6900, https://doi.org/10.1002/2017JC012768.
- 14. Comiso J. C., Gersten R.A., Stock L.V., Turner J., Perez G.J., Cho K. (2017b), Positive trend in the Antarctic Sea ice cover and associated changes in surface temperature, *J. Climate*, 2017, Vol. 30, Issue 6, pp. 2251–2267, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0408.1.
- 15. Ivanova N., Johannessen O. M., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Retrieval of Arctic Sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: a comparison of eleven sea ice algorithms, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, pp. 7233–7246.
- Ivanova N., Pedersen L. T., Tonboe R. T., Kern S., Heygste G., Lavergne T., Sørensen A., Saldo R., Dybkjær G., Brucker L., Shokr M., Inter-comparison and evaluation of sea ice algorithms: towards further identification of challenges and optimal approach using passive microwave observations, *The Cryosphere*, 2015, Vol. 9, pp. 1797–1817, https://doi.org/10.5194/tc-9-1797-2015.
- 17. Kaur S., Ehn J. K., Barber D. G., Pan-arctic winter drift speeds and changing patterns of sea ice motion: 1979–2015, *Polar Record*, 2019, Vol. 54(5–6), pp. 303–311, https://doi.org/10.1017/S0032247418000566.
- Kern S., Rösel A., Pedersen L. T., Ivanova N., Saldo R., Tonboe R. T., The impact of melt ponds on summertime microwave brightness temperatures and sea-ice concentrations, *The Cryosphere*, 2016, Vol. 10, pp. 2217–2239, https://doi.org/10.5194/tc-10-2217-2016.
- 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, Vol. 13, pp. 3261–3307, DOI: 10.5194/tc-13-3261-2019.
- 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, Vol. 14, pp. 2469– 2493, https://doi.org/10.5194/tc-14-2469-2020.
- 21. Landrum L., Holland M. M., Extremes become routine in an emerging new Arctic, *Nature Climate Change*, 2020, Vol. 10, pp. 1108–1115, https://doi.org/10.1038/s41558-020-0892-z.
- 22. Meleshko V. P., Pavlova T., Bobylev L. P., Golubkin P., Current and projected sea ice in the Arctic in the twenty-first century, In: *Sea Ice in the Arctic*, Cham: Springer, 2020, pp. 399–464, https://doi.org/10.1007/978-3-030-21301-5\_10.
- 23. Onarheim I. H., Eldevik T., Smedsrud L. H., Stroeve J. C., Seasonal and regional manifestation of Arctic Sea ice loss, *J. Climate*, 2018, Vol. 31, pp. 4917–4932, DOI: 10.1175/JCLI-D-17-0427.1.
- Rampal P., Weiss J., Marsan D., Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic Sea ice, 1979–2007, J. Geophysical Research, 2009, Vol. 114(C5), Art. No. C05013, https://doi. org/10.1029/2008JC005066.
- 25. Serreze M. C., Barry R. G., Processes and Impacts of Arctic Amplification: A Research Synthesis, *Global and Planetary Change*, 2011, Vol. 77, pp. 85–96, http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004.
- Shalina E. V., Johannessen O. M., Sandven S. (2020a), Changes in Arctic Sea Ice Cover in the Twentieth and Twenty-First Centuries, In: *Sea Ice in the Arctic*, Cham: Springer, 2020, pp. 93–166, https://doi. org/10.1007/978-3-030-21301-5\_4.
- 27. Shalina E. V., Khvorostovsky K., Sandven S. (2020b), Arctic Sea Ice Thickness and Volume Transformation, In: *Sea Ice in the Arctic*, Cham: Springer, 2020, pp. 167–246, https://doi.org/10.1007/978-3-030-21301-5\_5.
- 28. Stroeve J., Notz D., Changing state of Arctic Sea ice across all seasons, *Environmental Research Letters*, 2018, Vol. 13, Art. No. 103001, https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56.
- 29. Stroeve J. C., Markus T., Boisvert L., Miller J., Barrett A., Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss, *Geophysical Research Letters*, 2014, Vol. 41, pp. 1216–1225, https://doi.org/10.1002/2013GL058951.
- 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, Vol. 14, pp. 1519–1536, https://doi. org/10.5194/tc-14-1519-2020.