

ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА ПО ДАННЫМ БЕРЕГОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В КАРСКОМ МОРЕ

П. А. Шабанов¹, Н. Н. Шабанова²

¹ *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36;*

² *МГУ им. М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1,
e-mail: pa.shabanov@ocean.ru*

На основе данных наблюдений за сроками ледовых явлений на 12 береговых станциях в Карском море рассчитаны среднееголетние значения и количественно описаны изменения дат начала, окончания и продолжительности безледного периода (БЛП) за период с 1979 по 2020 гг. Полученные оценки были сопоставлены с результатами расчетов дат начала и окончания БЛП по спутниковым данным микроволнового зондирования. На 9 из 12 рассмотренных станций наблюдается увеличение продолжительности безледного периода. Это происходит как за счет смещения дат начала БЛП (наблюдается на 8 из 12 станций) на более ранние сроки, так и за счет смещения дат окончания БЛП на более поздние сроки (отмечается на 11 из 12 станций). Сравнение расчетов среднееголетних величин и тенденций сроков начала, окончания и продолжительности БЛП, полученных по спутниковым данным и по данным береговых наблюдений, подтверждает, что спутниковые данные микроволнового зондирования (сплоченность морского льда) можно использовать для анализа межгодовой изменчивости характеристик БЛП в прибрежной зоне Карского моря. Показано, что результаты, полученные по предлагаемому модифицированному пороговому методу (МПМ), находятся в большем согласии с данными береговых наблюдений, чем широко используемый пороговый 15 % метод выделения БЛП.

Ключевые слова: Карское море, безледный период, морской лед, береговые наблюдения, прибрежная зона, сплоченность морского льда

Введение

Ледовые условия арктического региона играют большую роль в климатической системе Земли. Наблюдаемое сокращение площади морского льда в морях Северного Ледовитого океана (СЛО) в начале XXI в. является ярким проявлением процесса глобального потепления климата (Cavalieri & Parkinson, 2012; Макаров и др., 2020). Морские ледовые условия играют большую роль в прибрежной динамике циркумполярной Арктики (Ogorodov et al., 2016). Морской лед ограничивает прямое взаимодействие между сушей и морской водой в холодный период года. Прибрежный морской ледяной покров защищает побережье от волновых и термических воздействий. При этом около половины протяженности берегов арктических морей России сложены многолетнемерзлыми дисперсными породами, которые слабоустойчивы к

термомеханическому воздействию. Волновое и термическое воздействия оказывают существенное влияние на динамику береговой зоны лишь в условиях отсутствия сплоченного льда вдоль берега (Irrgang et al., 2022). Большая часть эрозии береговой линии происходит в течение относительно короткого периода отсутствия льда – безледного периода (Ogorodov et al., 2020). Сокращение площади морского льда естественным образом приводит к увеличению продолжительности безледного периода в акваториях морей Северного Ледовитого океана. При этом увеличение продолжительности безледного периода в прибрежной зоне приводит к интенсификации процессов термоабразии и, в конечном итоге, к более быстрым изменениям положения берега, так как скорость отступления береговой зоны в арктических регионах во многом определяется именно продолжительностью безледного периода (Шабанов и Шабанова, 2020; Irrgang et al., 2022).

Изучение изменений ледовых условий непосредственно в прибрежной зоне имеет ряд особенностей. Так, в отличие от открытых акваторий, морской лед в прибрежной зоне встречается в форме неподвижного льда, припая. Припай формируется и разрушается позже, чем морской лед, в открытой части Карского моря (Карклин и др., 2016). Во-вторых, непосредственно вблизи береговой линии спутниковые данные наблюдений за морским ледяным покровом (сплоченностью в первую очередь) имеют существенные ограничения за счет захвата сигнала от суши. Особенно это касается периода активного таяния снега и льда. В-третьих, открытых и доступных для анализа данных наблюдений непосредственно у береговой линии в Арктике совсем немного для исчерпывающего описания наблюдаемых изменений.

В представленной работе на основе данных береговых наблюдений Росгидромета исследованы изменения сроков начала и окончания безледного периода в прибрежной зоне Карского моря. Основное внимание уделено данным наблюдений, которые описывают процессы в непосредственной близости от береговой линии. Исследований, посвященных изучению изменений ледовых условий (включая прогноз) именно в прибрежной зоне Карского моря, на текущий момент недостаточно для детального описания наблюдаемых изменений. Несмотря на то, что существует не один климатический архив ледовых условиях в Арктике, качество измерений и расчетов именно в прибрежной зоне остается малоизученным.

В исследовании проводится сравнение сроков начала, окончания и продолжительности БЛП, полученных по данным береговых наблюдений и по спутниковым данным микроволнового зондирования. Это позволяет оценить, насколько данные наблюдений на береговых станциях сопоставимы со спутниковыми данными, получить количественную оценку сходимости климатических средних и их наблюдаемых изменений.

Данные и методы

На станциях гидрометеорологической наблюдательной сети Росгидромета, расположенных вблизи от побережья, проводятся регулярные наблюдения за ледовыми явлениями в прилегающей акватории (рисунок 1).

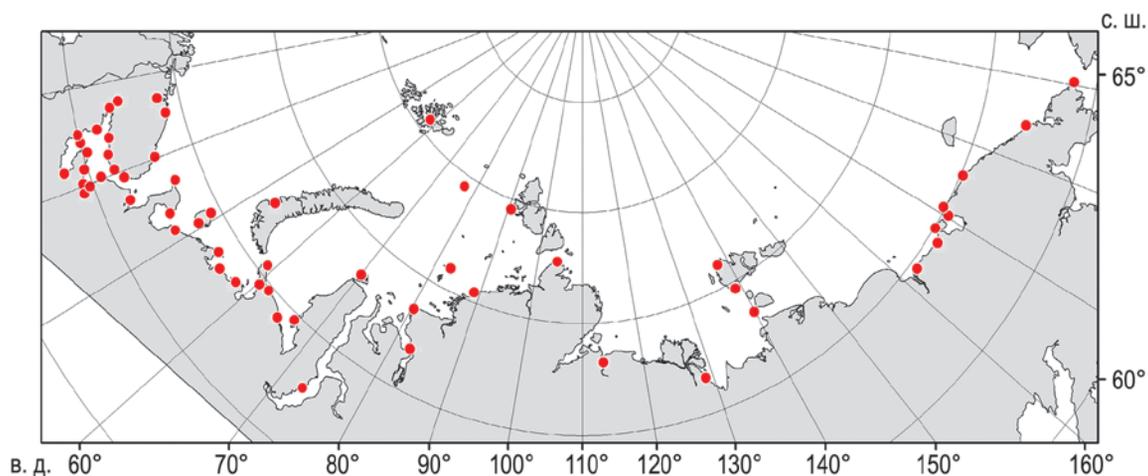


Рис. 1 – Конфигурация сети береговых арктических станций Росгидромета по состоянию на 2019 г. Рисунок 6 из (Афанасьева и др., 2019)

Среди собираемой информации фиксируются различные характеристики ледяного покрова и сроки ледовых явлений, такие как:

- первое появление льда;
- устойчивое ледообразование;
- первое становление припая;
- устойчивое становление припая;
- достижение толщины льда 30 см, 70 см и 120 см;
- максимальная толщина льда;
- максимальная высота снега;
- окончательное разрушение припая;
- очищение акватории.

Данные о сроках ледовых явлений используются для расчета параметров о ледовых условиях, например, для определения числа дней со льдом как разности между сроком очищения акватории и сроком первого появления льда за ледовый сезон (Думанская, 2014; Думанская, 2017). Эти данные можно использовать и для выделения безледного периода в прибрежной зоне.

Безледный период в контексте задач береговой динамики – это период времени, когда прибрежная зона свободна от припая, дрейфующего льда и открыта к ветро-волновому воздействию без существенного влияния морского льда. Исходя из данного определения безледного периода, его продолжительность можно обозначить как разность между сроком очищения акватории и сроком первого появления льда за один летний сезон. При таком определении продолжительность безледного периода

тождественна сезону открытой воды (open water season) и может быть также охарактеризована числом дней без льда.

В рамках проекта «Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане» под управлением Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ, <https://www.aari.ru>) доступны данные наблюдений за сроками ледовых явлений за период 1996–2020 гг. (<http://old.aari.ru/projects/ECIMO/index.php>). Благодаря сотрудникам ААНИИ, которые любезно предоставили расширенные данные о сроках ледовых явлений, удалось собрать архив из 12 станций в прибрежной зоне Карского моря (5 в северо-восточной части и 7 в юго-западной). Это позволило провести расширенный анализ изменений безледного периода в прибрежной зоне Карского моря за период спутниковых наблюдений 1979–2020 гг.

В качестве дат начала БЛП были использованы даты очищения акватории, а окончания – даты устойчивого ледообразования. Продолжительность БЛП определялась как разность между датами окончания и начала периода, выраженная в днях. Географическое расположение станций наблюдений и метаинформация о них представлены на рисунке 2 и в таблице 1.

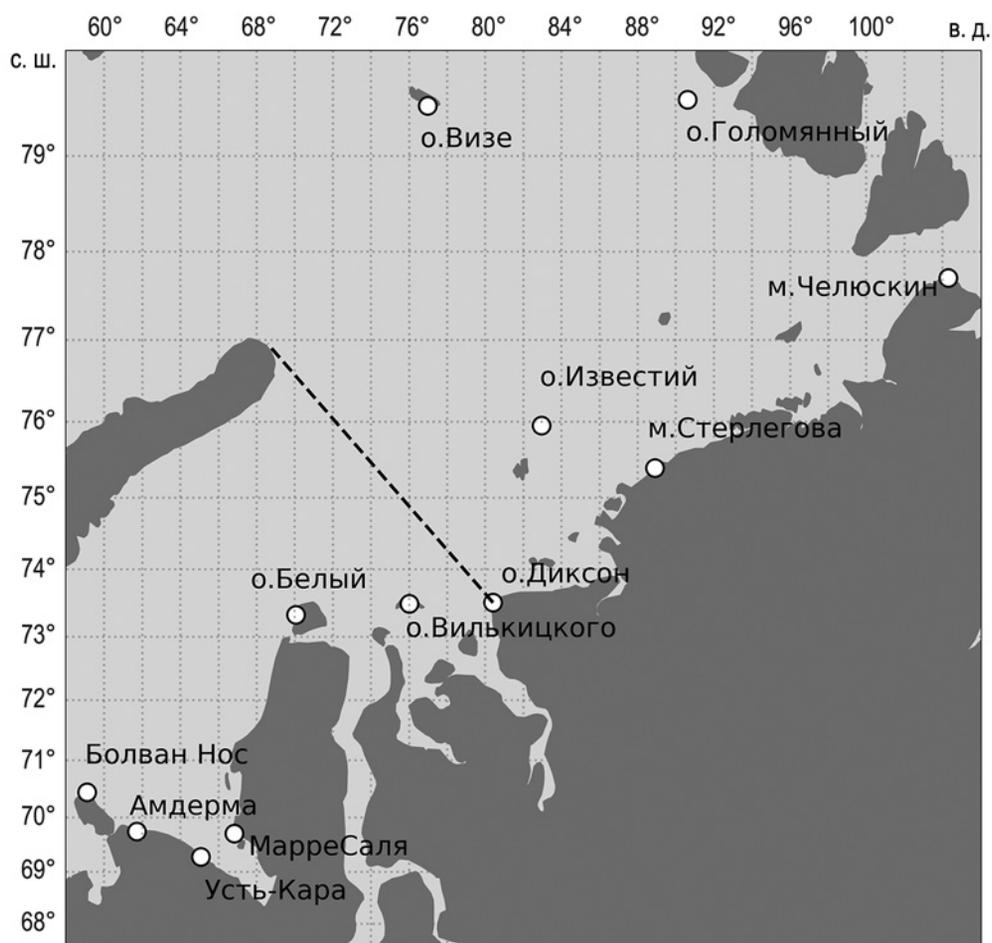


Рис. 2 – Географическое положение проанализированных в работе станций наблюдений за сроками ледовых явлений в Карском море. Пунктирная линия – условная граница между юго-западной и северо-восточной частями Карского моря

Табл. 1 – Метаданные береговых станций наблюдений за сроками ледовых явлений в Карском море согласно ЕСИМО

	Индекс ВМО	Название	Район моря	Долгота, в. д.	Широта, с. ш.	Начало наблюдений	Конец наблюдений
1	20069	о. Визе	СВ	76.9806	79.4908	2000	2019
2	20087	о. Голомянный	СВ	90.6167	79.5500	1997	2019
3	20292	м. Челюскин	СВ	104.2919	77.7131	1992	2020
4	20471	о. Известий	СВ	82.9464	75.9519	1997	2018
5	20476	м. Стерлегова	СВ	88.9106	75.4039	1979	2021
6	20665	о. Вилькицкого	ЮЗ	76.0000	73.5000	1997	2010
7	20667	о. Белый	ЮЗ	70.0664	73.3328	1979	2020
8	20674	о. Диксон	ЮЗ	80.4064	73.5136	1979	2020
9	20946	Болванский Нос	ЮЗ	59.0911	70.4467	1980	2019
10	23022	Амдерма	ЮЗ	61.7000	69.7500	1979	2020
11	23029	Усть-Кара	ЮЗ	65.0604	69.282	1980	2015
12	23032	Марресале	ЮЗ	66.8144	69.7142	1979	2020

Пороговый метод определения безледного периода по данным сплоченности морского льда

В климатических исследованиях ледовых условий на пространственных масштабах море–океан для того, чтобы определить даты начала и окончания БЛП по внутригодовой динамике сплоченности морского льда, чаще всего применяют пороговый метод. В этом подходе все пространственные пиксели или узлы сетки данных, участвующие в оценке, где значения меньше порогового (обычно порог устанавливается на 15 %), помечаются как «открытая вода» (Overeem et al., 2011; Peng et al., 2018). Этот метод широко используется в климатических исследованиях морского ледяного покрова Арктики (Howell et al., 2009), в том числе для подсчета «количества дней открытой воды» (Khon et al., 2010; Barnhart et al., 2014). В исследованиях (Peng et al., 2018; Bliss et al., 2019) используется также пороговый метод для выделения ключевых дат в годовом ходе сплоченности морского ледяного покрова. Для исследования динамики продолжительности БЛП такой метод является наиболее подходящим с рядом уточнений для прибрежной зоны.

Особенности оценок характеристик БЛП в прибрежной зоне Карского моря

В задаче объективной трансформации спутниковых микроволновых измерений в значениях сплоченности морского льда остается ряд проблем, связанных с многообразием строения морского льда и пространственно-временной изменчивостью атмосферных процессов. На итоговые значения сплоченности также оказывает влияние смещение калибровок и изменение характеристик измерительных приборов, описание границы «суша–море».

Среди значимых источников ошибок определения сплоченности морского льда выделяются начальные формы льда (снежура, шуга, склянка), снежницы (талые воды, которые формируются поверх ледяных полей в летний сезон), а также такие атмосферные явления как туман, дождь, снегопад и т. д. Так, например, снежницы, покрывающие более половины площади ледяных массивов в летний сезон, являются одной из основных причин занижения итоговой сплоченности морского льда (Репина, Тихонов, 2018). Самые значительные ошибки в определении сплоченности морского льда наблюдаются в прикромочных зонах (Meier, 2005; Алексеева и Фролов, 2012).

В прибрежной зоне к перечисленным выше проблемам добавляется еще и т. н. “spill-over” проблема. Из-за больших площадей и относительно высоких радиояркостных температур суши и льда, по сравнению с водой, сигнатура суши «выплескивается» в открытую воду прибрежной зоны и будет ошибочно проинтерпретирована как лед промежуточной сплоченности. Этот “spill-эффект” корректируется в современных алгоритмах, например, в ASI (Lavergne et al., 2019). Однако методы прибрежной коррекции несовершенны, и некоторые ложные морские льды идентифицируются алгоритмами вдоль береговых линий, а часть настоящего прибрежного морского льда может быть удалена при применении схем прибрежной коррекции. В результате перечисленных выше факторов наблюдаются значимые различия в оценках многолетних тенденций для существующих алгоритмов расчета сплоченности морского льда (Comiso & Nishio, 2008).

Модифицированный пороговый метод выделения БЛП по ежесуточным данным сплоченности морского льда

Во внутригодовой динамике сплоченности морского льда по спутниковым данным наблюдаются существенные вариации и колебания значений сплоченности на масштабах от нескольких суток до недель. Это обстоятельство затрудняет использование простого порогового метода для выделения БЛП при автоматизированной обработке данных. Например, временные ряды сплоченности морского льда до 1987 г. демонстрируют сложное поведение и завышенные значения, которые не подтверждаются данными береговых наблюдений. Сюда же относятся и помехи сигнала (т. н. проблема “spill-over”) при смене типа подстилающей поверхности с моря на сушу, и занижение на 40 % итоговой сплоченности в сравнении с данными спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) в ходе постобработки спутникового сигнала алгоритмами ASI (ARTIST Sea Ice), NASA Team 2 и Bootstrap (Rösel et al., 2012). В итоге это приводит к тому, что в отдельные годы значения сплоченности морского льда всегда превышают 30–40 % даже летом, в то время как альтернативные наблюдения за морским ледяным покровом показывают значения, близкие к нулевым. Все эти обстоятельства ограничивают применение простого порогового метода в прибрежной зоне арктических морей.

С целью уменьшения влияния описанных выше проблем предлагается новый подход, который позволяет сгладить недостатки классического порогового метода

(Comiso & Zwally, 1984; Meier & Stroeve, 2008; Farquharson et al., 2018) в существующих климатических массивах данных о сплоченности (Shabanov & Shabanova, 2020; Шабанов, 2022).

Модифицированный пороговый метод (МПМ) основан на предположении, что по характерным перегибам, экстремумам временного ряда сплоченности можно определить начало и окончание БЛП, даже если все абсолютные значения выше порогового (например, 15 %). Поиск даты начала БЛП происходит в период с 15 мая по 15 сентября, даты окончания – с 15 сентября по 15 декабря. Ежедневные значения сплоченности морского льда нормализуются, т. е. приводятся в диапазон от 0 до 100 %. В течение периода поиска скользящим методом с шагом в 1 сутки рассчитываются производные по времени как разница между последним и первым элементами внутри 28-суточного интервала. Из полученных производных по времени сплоченности выбирается максимальное значение, во временном интервале которого хотя бы одно значение было меньше/больше (дата начала/дата окончания соответственно) порогового значения в 15 %. Последний/первый элемент выбранного таким образом интервала интерпретируется как дата начала/окончания БЛП соответственно. Ширина скользящего окна (28 суток, ширина окна была выбрана с помощью тестов с данными наблюдений за ледовыми явлениями) может рассматриваться как репрезентативный период таяния/замерзания морского льда, когда происходят самые значительные изменения в годовой динамике сплоченности морского льда.

МПМ следует рассматривать как процедуру сглаживания шумов в исходных данных, для которых применять пороговые методы для выделения БЛП некорректно. В работе (Shabanov, Shabanova, 2019) было продемонстрировано, что архив спутниковых данных NSIDC является оптимальным для оценки изменений характеристик безледного периода, поскольку они лучше соответствуют данным береговых наблюдений за сроками ледовых явлений. В дополнении к этому, архивы центра NSIDC (<http://nsidc.org>) содержат даже несколько архивов сплоченности морского льда и целый ряд сопутствующих наборов данных о морском ледяном покрове, например, о протяженности по морям СЛО. В данном исследовании динамика безледного периода по спутниковым данным микроволнового зондирования рассчитывалась на основе архива NSIDC G02202, version 4 (Meier et al., 2021).

Результаты

Изменения продолжительности БЛП по данным береговых наблюдений в Карском море

По данным береговых наблюдений за сроками ледовых явлений на 12 станциях в Карском море были рассчитаны среднегодовые значения и тенденции дат начала, окончания и продолжительности БЛП. Статистическая значимость тенденций

оценивалась с помощью t-теста Стьюдента. Тенденция признавалась статистически значимой, если она удовлетворяла критерию значимости на уровне 95 %. Межгодовые изменения характеристик БЛП для 5 береговых станций в Карском море представлены на рисунках 3–7.

Средняя продолжительность БЛП по данным 12 рассмотренных береговых станций в Карском море составляет 91 ± 25 сут. Наиболее продолжительный БЛП отмечается на юго-западе моря, на станциях «Болванский Нос» (148 ± 40 сут.), «Усть-Кара» (118 ± 13 сут.) и «Амдерма» (117 ± 41 сут.). Самый короткий БЛП, менее 70 сут., отмечается на северо-восточных станциях, таких как «м. Челюскин» (59 ± 34 сут.), «о. Голомянный» (68 ± 23 сут.) и «м. Стерлегова» (71 ± 22 сут.).

По данным 9 из 12 рассмотренных береговых станций Карского моря за период 1979–2019 гг. наблюдается статистически значимое увеличение продолжительности безледного периода (таблица 2). Разброс статистически значимых показателей составляет от +8 до +30 сут/10 лет, в среднем составляет +17.8 сут/10 лет (для сравнения, средние тенденции продолжительности БЛП по Карскому морю оцениваются по спутниковым данным +23+28 сут/10 лет). В число станций с самыми быстрыми изменениями продолжительности безледного периода входят разные по географии пункты: «о. Визе» (север), «м. Челюскин» (восток), «Болванский Нос» (запад). Почти одинаковые тренды фиксируются на западе, у «Болванский Нос» (+23.1 сут/10 лет) и на востоке, у м. Челюскин (+23.5 сут/10 лет). При этом самые быстрые, относительно среднемноголетней продолжительности, приросты наблюдаются на «м. Челюскин», где среднемноголетняя продолжительность БЛП составляет менее 59 суток, тогда как на «Амдерма» и «Болванский Нос» она составляет 117 и 148 суток соответственно.

Для станции «о. Голомянный» тенденции не рассчитывались, так как фактических данных наблюдений о сроках очищения от морского льда было менее 10 за период 1997–2019 гг.

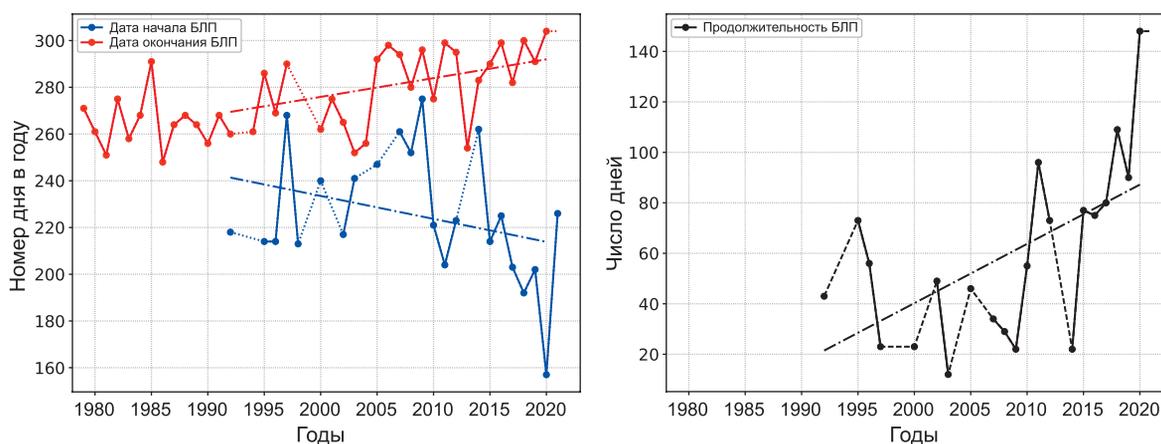


Рис. 3 – Межгодовые изменения дат начала (номер дня в году, синий), дат окончания БЛП (номер дня в году, красный) – слева – и продолжительности (сут., черный) БЛП (справа) по данным береговых наблюдений на станции «м. Челюскин»

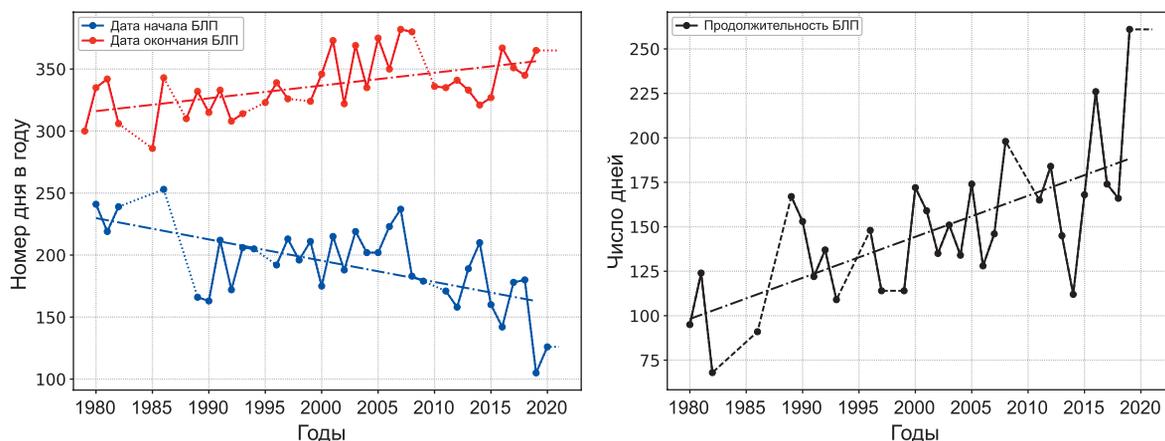


Рис. 4 – Межгодовые изменения дат начала (номер дня в году, синий), дат окончания БЛП (номер дня в году, красный) – слева – и продолжительности (сут., черный) БЛП (справа) по данным береговых наблюдений на станции «Болванский Нос»

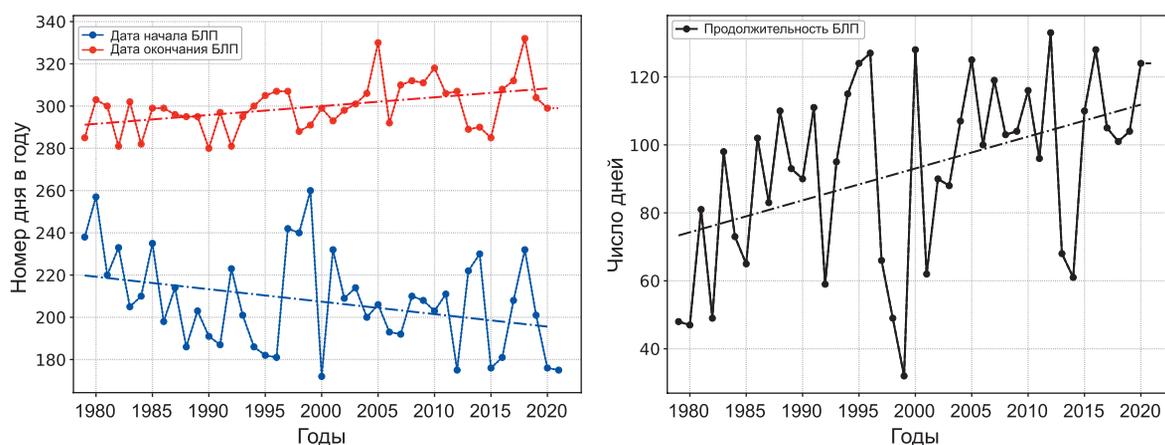


Рис. 5 – Межгодовые изменения дат начала (номер дня в году, синий), дат окончания БЛП (номер дня в году, красный) – слева – и продолжительности (сут., черный) БЛП (справа) по данным береговых наблюдений на станции «Марресалая»

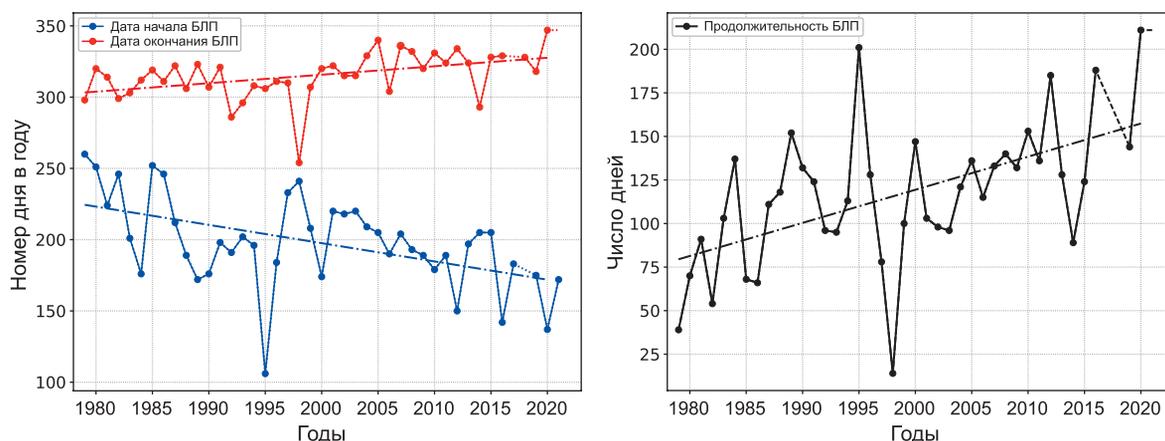


Рис. 6 – Межгодовые изменения дат начала (номер дня в году, синий), дат окончания БЛП (номер дня в году, красный) – слева – и продолжительности (сут., черный) БЛП (справа) по данным береговых наблюдений на станции «Амдерма»

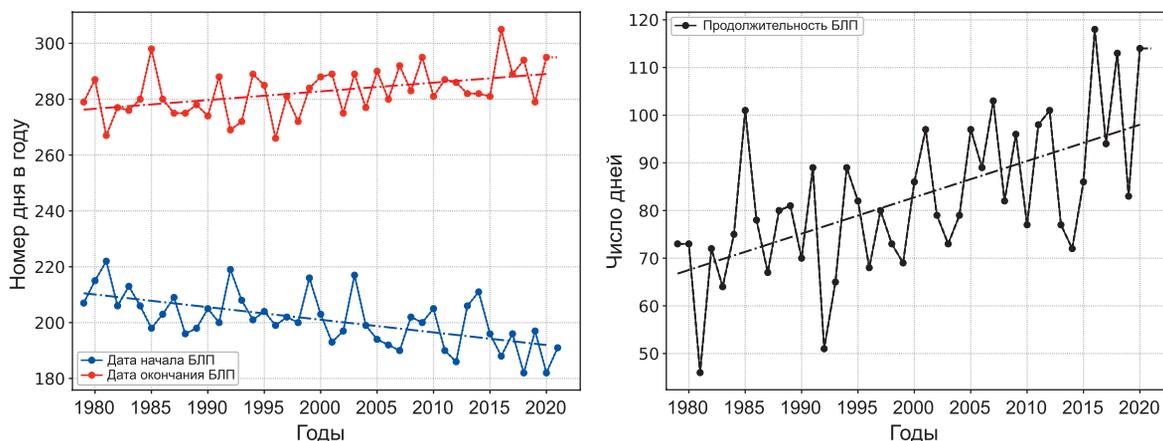


Рис. 7 – Межгодовые изменения дат начала (номер дня в году, синий), дат окончания БЛП (номер дня в году, красный) – слева – и продолжительности (сут., черный) БЛП (справа) по данным береговых наблюдений на станции «Диксон»

Табл. 2 – Среднеголетние (СР.ЗНАЧ., сут.), стандартное отклонение (СКО, сут.) и тенденции (сут/10 лет) значения продолжительности БЛП по данным береговых станционных наблюдений. Курсивом выделены статистически незначимые тенденции

	Индекс ВМО	Название	СР.ЗНАЧ.	СКО	Тенденция
1	20069	о. Визе	77	32	<i>27.7</i>
2	20087	о. Голомянный	68	23	<i>13.8</i>
3	20292	м. Челюскин	59	34	23.5
4	20471	о. Известий	80	30	24.3
5	20476	м. Стерлегова	71	22	11.4
6	20665	о. Вилькицкого	83	16	30.2
7	20667	о. Белый	94	23	11.7
8	20674	о. Диксон	82	16	7.6
9	20946	Болванский Нос	148	40	23.1
10	23022	Амдерма	117	41	19.0
11	23029	Усть-Кара	118	13	<i>4.0</i>
12	23032	Марресале	93	27	9.4

Статистически значимое смещение дат начала БЛП на более ранние сроки наблюдается на 8 из 12 рассмотренных береговых станций Карского моря за период 1979–2020 гг. (таблица 3). Разброс статистически значимых показателей составляет от –17.2 до –3.4 сут/10 лет, в среднем составляет –8.0 сут/10 лет (для сравнения, средние тенденции дат начала БЛП по Карскому морю оцениваются по спутниковым данным –13.2–16.4 сут/10 лет). Стоит отметить, что статистически малые изменения дат начала БЛП в северо-восточной части Карского моря отмечаются на 3 из 5 рассмотренных станций, и все они расположены севернее 75° с. ш.

На 11 из 12 рассмотренных береговых станций Карского моря наблюдается статистически значимое смещение дат окончания БЛП на более поздние сроки (таблица 4). Разброс статистически значимых показателей находится в пределах от +3.1 до +22.9 сут/10 лет, в среднем составляет +10.1 сут/10 лет (для сравнения, средние тенденции продолжительности БЛП по Карскому морю оцениваются по спутниковым данным +9.5–9.9 сут/10 лет).

Табл. 3 – Среднегодовое (СР.ЗНАЧ., номер дня в году), стандартное отклонение (СКО, сут.) и тенденции (сут/10 лет) значения дат начала БЛП по данным береговых стационарных наблюдений.

Курсивом выделены статистически незначимые тенденции на уровне 95 %

	Индекс ВМО	Название	СР.ЗНАЧ.	СКО	Тенденция
1	20069	о. Визе	219	20	<i>-12.0</i>
2	20087	о. Голомянный	232	23	<i>-2.5</i>
3	20292	м. Челюскин	226	27	<i>-9.8</i>
4	20471	о. Известий	213	23	<i>-11.1</i>
5	20476	м. Стерлегова	216	16	<i>-6.7</i>
6	20665	о. Вилькицкого	205	12	<i>-20.2</i>
7	20667	о. Белый	203	14	<i>-5.6</i>
8	20674	о. Диксон	201	9	<i>-4.5</i>
9	20946	Болванский Нос	192	33	<i>-17.2</i>
10	23022	Амдерма	198	32	<i>-12.8</i>
11	23029	Усть-Кара	174	9	<i>-3.4</i>
12	23032	Маррессале	207	23	<i>-5.9</i>

Табл. 4 – Среднегодовое (СР.ЗНАЧ., номер дня в году), стандартное отклонение (СКО, сут.) и тенденции (сут/10 лет) значения дат окончания БЛП по данным береговых стационарных наблюдений.

Курсивом выделены статистически незначимые тенденции

	Индекс ВМО	Название	СР.ЗНАЧ.	СКО	Тенденция
1	20069	о. Визе	292	22	22.0
2	20087	о. Голомянный	284	24	22.9
3	20292	м. Челюскин	276	17	8.0
4	20471	о. Известий	291	14	9.6
5	20476	м. Стерлегова	284	11	5.0
6	20665	о. Вилькицкого	288	9	14.6
7	20667	о. Белый	296	13	5.8
8	20674	о. Диксон	283	8	3.1
9	20946	Болванский Нос	337	23	10.3
10	23022	Амдерма	315	16	5.9
11	23029	Усть-Кара	291	9	<i>0.7</i>
12	23032	Маррессале	300	12	4.2

Тенденции дат начала БЛП вносят большой вклад в общую тенденцию продолжительности БЛП на 6 из 12 рассмотренных станциях. На станции «о. Белый» изменения дат начала и окончания БЛП практически одинаковые, на «м. Челюскин», «о. Известий» тенденции дат начала БЛП хотя и не являются статистически значимыми, однако превосходят по модулю тенденции дат окончания БЛП (таблица 3 и 4).

Сравнение данных береговых наблюдений со спутниковыми данными в прибрежной зоне Карского моря

Данные береговых наблюдений являются важным источником информации о процессах в прибрежной зоне арктических морей России. И хотя сеть наблюдений очень разреженная, а временные ряды наблюдений за сроками ледовых явлений даже за промежуток с 1996 по 2020 гг. содержат пропуски, эти сведения могут быть использованы для валидации оценок БЛП, полученных с помощью данных спутникового дистанционного зондирования.

Чтобы понять, насколько различаются оценки БЛП по классическому пороговому 15 % методу и МПМ в прибрежной зоне Карского моря, были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона (КК) и среднеквадратические ошибки (СКОШ) между временными рядами спутниковых данных и рядов наблюдений для 12 станций за соответствующие периоды, где есть данные наблюдений (таблица 2). Результаты расчетов для временных рядов дат начала, окончания и продолжительности БЛП представлены в таблицах 5–7.

Табл. 5 – Среднеквадратическая ошибка (СКОШ) и коэффициенты корреляции (КК, %) между временными рядами продолжительности БЛП береговых наблюдений и спутниковых данных, полученных пороговым (15 %) и модифицированным пороговым методом (МПМ)

	Название	СКОШ 15%	СКОШ МПМ	КК 15%	КК МПМ
1	о. Визе	67	23	32	88
2	о. Голомянный	29	32	84	83
3	м. Челюскин	24	25	72	70
4	о. Известий	29	24	73	80
5	м. Стерлегова	20	19	84	87
6	о. Вилькицкого	9	8	91	94
7	о. Белый	16	16	75	73
8	о. Диксон	39	39	72	70
9	Болванский Нос	23	29	73	67
10	Амдерма	53	37	72	84
11	Усть-Кара	25	24	55	52
12	Маррессале	24	26	82	73

Табл. 6 – Среднеквадратическая ошибка (СКОШ) и коэффициенты корреляции (КК, %) между временными рядами дат начала БЛП береговых наблюдений и спутниковых данных, полученных пороговым (15 %) и модифицированным пороговым методом (МПМ)

	Название	СКОШ 15%	СКОШ МПМ	КК 15%	КК МПМ
1	о. Визе	58	21	19	77
2	о. Голомянный	30	33	79	79
3	м. Челюскин	21	23	69	63
4	о. Известий	26	24	62	66
5	м. Стерлегова	16	15	78	83
6	о. Вилькицкого	10	11	85	92
7	о. Белый	11	13	71	71
8	о. Диксон	33	34	62	51
9	Болванский Нос	18	21	80	73
10	Амдерма	40	23	60	78
11	Усть-Кара	29	30	48	37
12	Марресале	15	19	83	75

Табл. 7 – Среднеквадратическая ошибка (СКОШ) и коэффициенты корреляции (КК, %) между временными рядами дат окончания БЛП береговых наблюдений и спутниковых данных, полученных пороговым (15 %) и модифицированным пороговым методом (МПМ)

	Название	СКОШ 15%	СКОШ МПМ	КК 15%	КК МПМ
1	о. Визе	16	11	88	91
2	о. Голомянный	17	18	74	69
3	м. Челюскин	9	6	84	90
4	о. Известий	7	8	89	86
5	м. Стерлегова	7	8	82	81
6	о. Вилькицкого	2	4	97	97
7	о. Белый	12	11	62	59
8	о. Диксон	7	6	87	87
9	Болванский Нос	20	23	61	54
10	Амдерма	27	21	69	76
11	Усть-Кара	28	25	45	49
12	Марресале	15	13	59	57

Из таблиц 5–7 видно, что МПМ дает сопоставимые с пороговым 15 % методом оценки для прибрежной зоны. Для станций «Амдерма» (юго-запад) и «о. Визе» (север) оценки среднеквадратической ошибки по МПМ лучше. Среднеголетняя продолжительность БЛП для 12 станций, полученная с помощью МПМ, в целом оказывается ближе к данным наблюдений, чем оценки порогового 15 % метода (таблица 8). Тенденции продолжительности БЛП по методу МПМ также сопоставимы с оценками по пороговому 15 % методу, а для станций «Амдерма», «Болванский Нос» и «Визе» оказываются существенно ближе к данным наблюдений. Таким образом, полученные

оценки продолжительности БЛП по МПМ адекватно воспроизводят наблюдаемые изменения и находятся в согласии с оценками характеристик БЛП, полученными классическим 15 % пороговым методом.

Табл. 8 – Среднемноголетние значения и тенденции за 1979–2022 гг. продолжительности БЛП для береговых станций, полученные по данным береговых наблюдений (НАБЛ) и спутниковых данных, полученных пороговым (15 %) и модифицированным пороговым методом (МПМ). Курсивом выделены статистически незначимые тенденции

	Название	СРЗНАЧ.			Тенденции		
		15%	НАБЛ	МПМ	15%	НАБЛ	МПМ
1	о. Визе	115	77	94	62.4	27.7	31.6
2	о. Голомянный	95	68	98	<i>0.4</i>	<i>13.8</i>	<i>0.1</i>
3	м. Челюскин	70	62	68	21.9	24.8	23.6
4	о. Известий	96	80	92	26.7	24.3	29.8
5	м. Стерлегова	81	72	84	17.5	10.8	17.8
6	о. Вилькицкого	90	83	90	24.4	30.2	27.6
7	о. Белый	97	94	101	12.8	11.5	8.8
8	о. Диксон	112	82	116	19.9	7.8	17.2
9	Болванский Нос	135	139	138	16.1	22.2	19.8
10	Амдерма	144	109	150	27.8	20.2	22.7
11	Усть-Кара	117	118	116	18.5	3.5	5.7
12	Марресале	101	93	108	21.6	9.9	13.4

Выводы и обсуждения

На основе данных береговых наблюдений за сроками ледовых явлений и спутниковых данных микроволнового зондирования за сплоченностью морского льда, были проанализированы изменения продолжительности БЛП для 12 станций в Карском море.

По данным береговых наблюдений на 9 из 12 рассмотренных станций зафиксированы статически значимые положительные тенденции продолжительности БЛП. Увеличение продолжительности БЛП происходит как за счет смещения дат начала БЛП на более ранние сроки, так и за счет смещения дат окончания БЛП на более поздние сроки. При этом более статистически значимое смещение сроков окончания БЛП отмечается на 11 станциях, тогда как для сроков начала БЛП таких станций меньше, а именно 8. При этом величины тенденций дат начала БЛП больше тенденций дат окончания БЛП на 6 из 12 станций, что свидетельствует о ее большем вкладе в итоговое увеличение продолжительности БЛП.

Рассмотренные данные по 12 станциям охватывают большой по площади регион, описывая юго-западную и северо-восточные части Карского моря. В совокупности они составляют пеструю картину как по тенденциям, так и по среднемноголетним

значениям БЛП. Так на станции «Усть-Кара» по данным наблюдений не отмечаются статистически значимые изменения дат начала и продолжительности БЛП. При этом на одной из ближайших к ней станции «Амдерма», наоборот, наблюдается существенное смещение дат начала на более ранние сроки и увеличение продолжительности БЛП. И это при схожих среднемноголетних значениях продолжительности БЛП. Таким образом, даже на относительно небольших расстояниях общая тенденция к увеличению БЛП может не подтверждаться наблюдениями. Это нуждается в дополнительных исследованиях, так как данные наблюдений могут отражать локальные процессы, не характерные для других районов.

В данной работе временные ряды на некоторых станциях были короткими, а также содержали пропуски в сведениях (особенно на «о. Голомянный»). Это ограничивало возможность проанализировать наблюдаемые изменения БЛП за один совместный период. Разрозненность полученных оценок характеристик БЛП не дает возможности детально описать изменения безледного периода в прибрежной зоне арктических морей России на основе только данных береговых наблюдений. В работе предложено решение проблемы непрерывности береговых наблюдений с помощью МПМ по данным дистанционного зондирования. Данные наблюдений при этом были использованы для валидации оценок БЛП, полученных по спутниковым данным сплоченности морского льда.

Из-за особенностей микроволновых измерений в прибрежной зоне расчеты дат начала, окончания и продолжительности БЛП проводились не только с помощью широко известного 15 % порогового метода, но и с помощью МПМ. По данным наблюдений продолжительность БЛП оказалась короче, сроки начала БЛП систематически отмечаются позже, а даты окончания – раньше. То есть наблюдения с береговых станций описывают менее продолжительный БЛП, чем выявляется в прибрежной ячейке по спутниковым наблюдениям.

Оценки, полученные по МПМ, адекватно воспроизводят среднемноголетние величины продолжительности БЛП, а также наблюдаемые на станциях изменения БЛП, и находятся в согласии с оценками характеристик БЛП, полученными 15 % пороговым методом. Причем для 3 из 12 станций оценки тенденций продолжительности БЛП по МПМ заметно ближе к тенденциям наблюдений на этих станциях. Это позволяет утверждать, что для определения характеристик БЛП по спутниковым данным сплоченности морского льда можно использовать МПМ для анализа изменений характеристик БЛП в прибрежной зоне Карского моря.

Благодарности. Сбор, актуализация и первичная обработка архивов данных береговых наблюдений в Карском море были выполнены в рамках государственного задания ИО РАН № FW-2024-0017. Анализ изменений сроков начала и окончания БЛП в прибрежной зоне Карского моря по данным береговых наблюдений и спутниковых данных был выполнен в рамках ВИП ГЗ (Соглашение № 169-15-2023-002).

Список литературы

1. *Алексеева Т. А., Фролов С. В.* Сравнительный анализ спутниковых и судовых данных о ледяном покрове в морях Российской Арктики // Исследование Земли из космоса. 2012. № 6. С. 69–76.
2. *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.
3. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей европейской части России. М., Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
4. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей азиатской части России. М., Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
5. *Карклин В. П., Хотченков С. В., Юлин А. В., Смоляницкий В. М.* Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4. С. 41–50.
6. *Макаров А. С., Миронов Е. У., Иванов В. В., Юлин А. В.* Ледовые условия морей российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 г. // Океанология. 2022. Т. 62. № 6. С. 845–856.
7. *Шабанов П. А.* Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 518–531. <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>.
8. *Шабанова Н. Н., Шабанов П. А.* Характеристики безледного периода на станции Амдерма (Карское море) по данным спутниковых измерений концентрации морского льда в 1979–2018 гг. // Арктика и Антарктика. 2020. № 1. С. 12–22. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.1.31860>.
9. *Barnhart K., Overeem I., Anderson R.* The effect of changing sea ice on the physical vulnerability of Arctic coasts // The Cryosphere. 2014. Vol. 8. P. 1777–1799. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1777-2014>.
10. *Bliss A. C., Steele M., Peng G. et al.* Regional variability of Arctic sea ice seasonal change climate indicators from a passive microwave climate data record // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14 (4). 045003. P. 1–11.
11. *Cavalieri D. J., Parkinson C. L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // The Cryosphere. 2012. Vol. 6. No. 4. P. 881–889.
12. *Comiso J., Zwally H.* Concentration gradients and growth/decay characteristics of the seasonal sea ice cover // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1984. Vol. 89 (C5). P. 8081–8103.
13. *Comiso J. C., Nishio F.* Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2008. Vol. 113. No. C2.
14. *Farquharson L. M., Mann D. H., Swanson D. K. et al.* Temporal and spatial variability in coastline response to declining sea-ice in northwest Alaska // Marine Geology. 2018. Vol. 404. P. 71–83.
15. *Howell S., Duguay C., Markus T.* Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979–2008 // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. No. 10. P. 1–6.
16. *Irrgang A., Bendixen M., Farquharson L. et al.* Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts // Nature Reviews Earth and Environment. 2022. Vol. 3. P. 39–54. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00232-1>.

17. *Khon V., Mokhov I., Latif M. et al.* Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century // *Climatic Change*. 2010. Vol. 100. No. 3–4. P. 757–768. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9683-2>.
18. *Lavergne T., Sorensen A. M., Kern S. et al.* Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records // *The Cryosphere*. 2019. Vol. 13. P. 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.
19. *Meier W., Fetterer F., Windnagel A., Stewart J.* NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration, Version 4. (G02202). Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. 2021. <https://doi.org/10.7265/efmz-2t65>. Date Accessed 04.03.2023.
20. *Meier W. N.* Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2005. Vol. 43. No. 6. P. 1324–1337.
21. *Ogorodov S., Baranskaya A., Belova N. et al.* Coastal dynamics of the Pechora and Kara seas under changing climatic conditions and human disturbances // *Geography, Environment, Sustainability*. 2016. Vol. 9. No. 3. P. 53–73. https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_04.
22. *Ogorodov S., Alekseyutina D., Baranskaya A. et al.* Coastal erosion of the Russian arctic: An overview // *Journal of Coastal Research*. 2020. No. 95. P. 599–604. <https://doi.org/10.2112/SI95-117.1>.
23. *Overeem I., Anderson R., Wobus C. et al.* Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. No. 17. <https://doi.org/10.1029/2011GL048681>.
24. *Peng G., Steele M., Bliss A. et al.* Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record // *Remote Sens*. 2018. Vol. 10. P. 1328–1353. <https://doi.org/10.3390/rs10091328>.
25. *Rösel A., Kaleschke L., Birnbaum G.* Melt ponds on Arctic sea ice determined from MODIS satellite data using an artificial neural network // *The Cryosphere*. 2012. Vol. 6. P. 431–446. <https://doi.org/10.5194/tc-6-431-2012>.
26. *Shabanov P., Shabanova N.* Open Water Season Changes Over the Kara Sea Coastal Zone: Marresalya Example // *IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan, 2019. P. 4218–4221. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900056>.
27. *Shabanov P., Shabanova N.* Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone // *Russ. J. Earth. Sci.* 2020. Vol. 20. ES6016. <https://doi.org/10.2205/2020ES000725>.

Статья поступила в редакцию 26.04.2024, одобрена к печати 16.09.2024.

Для цитирования: Шабанов П. А., Шабанова Н. Н. Изменения продолжительности безледного периода по данным береговых наблюдений в Карском море // *Океанологические исследования*. 2024. № 52 (3). С. 57–76. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(3\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(3).4).

CHANGES IN THE ICE-FREE PERIOD IN THE KARA SEA FROM COASTAL OBSERVATIONS

P. A. Shabanov¹, N. N. Shabanova²

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia;

² Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia,
e-mail: pa.shabanov@ocean.ru

Based on observations for the timing of ice events at 12 coastal stations in the Kara Sea, the long-term means and trends are calculated for start dates, end dates and duration of ice-free period (IFP) for 1979–2020. The obtained results were compared with the calculations for the same IFP parameters based on passive microwave remote sensing data. An increase in the duration of the ice-free period is observed at 9 of the 12 stations considered. This happens both due to the shift of the start dates of the IFP (observed at 8 out of 12 stations) to earlier dates, and due to the shift of the end dates of the IFP to later dates (noted at 11 out of 12 stations). A comparison of long-term means and trends of the start, end dates and duration of the IFP between satellite data and coastal observations confirms that remote sensing microwave data (sea ice concentration) can be used to analyze the interannual variability of IFP characteristics in the coastal zone of the Kara Sea. It is shown, that the results obtained using the proposed modified threshold method (MPM) are in a better agreement with the coastal observation data than the widely used threshold 15 % method.

Keywords: Kara Sea, ice-free period, sea ice, coastal observations, coastal zone, sea ice concentration, passive microwave remote sensing

Acknowledgement: The collection, updating and primary processing of archives of coastal observation data in the Kara Sea, as well as the analysis of changes in the timing of the start and end of the IFP according to coastal observations were carried out within the framework of the state assignment of the IO RAS No. FW-2024-0017. The analysis of changes in the start and end dates of the IFP in the coastal zone of the Kara Sea based on coastal observations and satellite data was conducted as part of the VIP GZ project (Agreement No. 169-15-2023-002).

References

1. Afanasyeva, E. V., T. A. Alekseeva, Yu. V. Sokolova, D. M. Demichev, M. S. Chufarova, Yu. D. Bychenkov, and O. S. Devyataev, 2019: Methods of drawing up ice maps of AARI. *Russian Arctic*, **7**, 5–20.
2. Alekseeva, T. A. and S. V. Frolov, 2012: Comparative analysis of satellite and ship data on ice cover in the seas of the Russian Arctic. *Earth Exploration from space*, **6**, 69–76.
3. Barnhart, K., I. Overeem, and R. Anderson, 2014: The effect of changing sea ice on the physical vulnerability of Arctic coasts. *The Cryosphere*, **8**, 1777–1799, <https://doi.org/10.5194/tc-8-1777-2014>.

4. Bliss, A. C., M. Steele, and G. Peng et al., 2019: Regional variability of Arctic sea ice seasonal change climate indicators from a passive microwave climate data record. *Environmental Research Letters*, **14** (4), 045003, 1–11.
5. Cavalieri, D. J. and C. L. Parkinson, 2012: Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*, **6**, 4, 881–889.
6. Comiso, J. and H. Zwally, 1984: Concentration gradients and growth/decay characteristics of the seasonal sea ice cover. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **89** (C5), 8081–8103.
7. Comiso, J. C. and F. Nishio, 2008: Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **113** (C2).
8. Dumanskaya, I. O., 2017: *Ice Conditions in the Seas of the Asian Part of Russia*. IG SOTsIN, Obninsk, ISBN 978-5-9908623-6-4.
9. Dumanskaya, I. O., 2014: *Ice Conditions in the Seas of the European Part of Russia*, IG SOTsIN, Obninsk, ISBN 978-5-91070-064-6.
10. Farquharson, L. M., D. H. Mann, and D. K. Swanson et al., 2018: Temporal and spatial variability in coastline response to declining sea-ice in northwest Alaska. *Marine Geology*, **404**, 71–83.
11. Howell, S., C. Duguay, and T. Markus, 2009: Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979–2008. *Geophysical Research Letters*, **36** (10), 1–6.
12. Irrgang, A., M. Bendixen, and L. Farquharson et al., 2022: Drivers, dynamics and impacts of changing Arctic coasts. *Nature Reviews Earth and Environment*, **3**, 39–54, <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00232-1>.
13. Karklin, V. P., S. V. Khotchenkov, A. V. Yulin, and V. M. Smolyanitsky, 2016: Seasonal changes in the age composition of ice in the northeastern part of the Kara Sea in the autumn-winter period. *Problems of the Arctic and Antarctic*, **4**, 41–50.
14. Khon, V., I. Mokhov, and M. Latif et al., 2010: Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century. *Climatic Change*, **100** (3–4), 757–768, <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9683-2>.
15. Lavergne, T., A. M. Sorensen, and S. Kern et al., 2019: Version 2 of the EUMETSAT OSI SAF and ESA CCI sea-ice concentration climate data records. *The Cryosphere*, **13**, 49–78, <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>.
16. Makarov, A. S., E. U. Mironov, V. V. Ivanov, and A. V. Yulin, 2022: Ice conditions of the seas of the Russian Arctic in connection with ongoing climate changes and features of the evolution of the ice cover in 2021. *Oceanology*, **62** (6), 845–856, <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>.
17. Meier, W., F. Fetterer, A. Windnagel, and J. Stewart, 2021: *NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration*, Version 4. (G02202). Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/efmz-2t65>. Date Accessed 04.03.2023.
18. Meier, W. N., 2005: Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic peripheral seas. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, **43** (6), 1324–1337.
19. Ogorodov, S., A. Baranskaya, and N. Belova et al., 2016: Coastal dynamics of the Pechora and Kara seas under changing climatic conditions and human disturbances. *Geography, Environment, Sustainability*, **9** (3), 53–73, https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_04.
20. Ogorodov, S., D. Aleksyutina, and A. Baranskaya et al., 2020: Coastal erosion of the Russian arctic: An overview. *Journal of Coastal Research*, **95**, 599–604, <https://doi.org/10.2112/SI95-117.1>.
21. Overeem, I., R. Anderson, and C. Wobus et al., 2011: Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast. *Geophysical Research Letters*, **38** (17), <https://doi.org/10.1029/2011GL048681>.

22. Peng, G., M. Steele, and A. Bliss et al., 2018: Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record. *Remote Sens*, **10**, 1328–1353, <https://doi.org/10.3390/rs10091328>.
23. Rösel, A., L. Kaleschke, and G. Birnbaum, 2012: Melt ponds on Arctic sea ice determined from MODIS satellite data using an artificial neural network. *The Cryosphere*, **6**, 431–446, <https://doi.org/10.5194/tc-6-431-2012>.
24. Shabanova, N. N. and P. A. Shabanov, 2020: Characteristics of the ice-free period at the Amderma station (Kara Sea) according to satellite measurements of sea ice concentration in 1979–2018. *Arctic and Antarctic*, **1**, 12–22, <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.1.31860>.
25. Shabanov, P. A., 2022: Changes in the ice-free period duration in the Kara sea coastal zone from satellite data. *Oceanology*, **62** (4), 518–531, <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>.
26. Shabanov, P. and N. Shabanova, 2019: Open Water Season Changes Over the Kara Sea Coastal Zone: Marresalya Example. IGARSS 2019–2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 4218–4221, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900056>.
27. Shabanov, P. and N. Shabanova, 2020: Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone. *Russ. J. Earth. Sci.*, **20**, ES6016. <https://doi.org/10.2205/2020ES000725>.

Submitted 26.04.2024, accepted 16.09.2024.

For citation: Shabanov, P. A. and N. N. Shabanova, 2024: Changes in the ice-free period in the Kara Sea from coastal observations. *Journal of Oceanological Research*, **52** (3), 57–76, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52\(3\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR2024.52(3).4).