

УДК 551.467.3

## ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАРСКОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

© 2022 г. П. А. Шабанов\*

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Шириова,  
Нахимовский пр-т, 36, г. Москва, 117997 Россия

\*e-mail: pa.shabanov@ocean.ru

Поступила в редакцию 27.09.2021 г.

После доработки 21.12.2021 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

Стремительное сокращение площади морского льда в Арктике в XXI веке приводит к увеличению продолжительности безледного периода в акваториях морей Северного Ледовитого океана. Продолжительность безледного периода является важным индикатором климатических процессов в рамках мониторинга береговой динамики арктической зоны РФ. Значительные изменения продолжительности безледного периода существенно влияют на функционирование прибрежной инфраструктуры, навигацию и прибрежные экосистемы. Современные спутниковые данные микроволнового зондирования, охватывающие временной период более 40 лет наблюдений, позволяют проанализировать состояние и динамику состояния морского ледяного покрова в прибрежной зоне российской Арктики. На основе градиентно-порогового метода, адаптированного для данных прибрежных акваторий, по спутниковым данным о сплоченности морского льда различных научных центров (JAXA, OSI SAF и NSIDC) получены ежегодные оценки характеристик безледного периода для прибрежной зоны Карского моря за период 1979–2019 гг. Согласно проанализированным спутниковым источникам данных, продолжительность безледного периода в прибрежной зоне Карского моря практически повсеместно статистически значимо увеличилась за последние десятилетия. Увеличение продолжительности безледного периода происходит как за счет смещения дат таяния морского льда на более ранние сроки (средняя скорость изменений – –8 сут/10 лет), так и за счет смещения дат замерзания морского льда на более поздние сроки (средние темпы изменений – +4 сут/10 лет). Средние темпы изменений общей продолжительности составляют +12 сут/10 лет за период 1979–2019 гг. При этом ведущий вклад в формирование общей продолжительности безледного периода вносит динамика дат начала периода, которая обладает высокой межгодовой изменчивостью и большим пространственным разнообразием. Оценки тенденций продолжительности безледного периода позволили выделить наиболее интенсивно изменяющиеся участки прибрежной зоны Карского моря: Югорский полуостров, западное и северное побережья полуострова Ямал. Проведённое исследование уточняет региональные особенности проявления климатических изменений морского льда в рамках мониторинга береговой динамики российского сектора Арктики.

**Ключевые слова.** безледный период, сплоченность ледяного покрова, морской лед, арктическая прибрежная зона, изменения климата

**DOI:** 10.31857/S0030157422040104

### ВВЕДЕНИЕ

Около половины протяженности берегов арктических морей России сложены многолетнемерзлыми дисперсными породами, которые слабо устойчивы к термомеханическому воздействию. При этом морские ледовые условия играют большую роль в прибрежной динамике циркумполярной Арктики [22, 24]. Большая часть эрозии береговой линии происходит в течение относительно короткого периода отсутствия льда – безледного периода (БЛП). Показано, что ско-

рость отступления береговой зоны в Арктике во многом определяется именно продолжительностью безледного периода [4]. Стремительное сокращение площади морского льда в Арктике в XXI веке [3, 11, 23, 33] приводит к увеличению продолжительности безледного периода в акваториях морей Северного Ледовитого океана [7, 9, 26]. Увеличение же продолжительности безледного периода в прибрежной зоне приводит к интенсификации процессов термоабразии и, в конечном итоге, к более быстрым изменениям положения берега [25].

Исследование представляет новый базовый статистический анализ среднемноголетних значений и тенденций продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря (от 60° в.д. до 105° в.д.) по спутниковым данным микроволнового зондирования. Прибрежной зоной будем считать ближайшие к береговой линии участки моря, в пределах от 2 до 30 км.

Продолжительность безледного периода является важным индикатором климатических процессов в рамках мониторинга береговой динамики арктической зоны РФ. Значительные изменения продолжительности безледного периода существенно влияют на прибрежную инфраструктуру, навигацию и прибрежные экосистемы. Понимание динамики продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря является критически важным для оценки рисков и прогноза береговой динамики данного района.

Межгодовые изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне акватории могут быть описаны с помощью анализа ключевых дат в годовом ходе сплоченности морского льда [9, 28, 29]. В представленном исследовании продолжительность безледного периода определяется в соответствии с задачами береговой динамики. Пусть продолжительность безледного периода – это временной период, когда количество морского льда в прибрежной зоне настолько мало, что его влиянием можно пренебречь при расчетах ветро-волнового и термического воздействия на береговую зону. Согласно устоявшимся представлениям, за границу пренебрежимо малого количества морского льда принимается сплоченность морского льда менее 15% [13, 27]. Будем считать, что прибрежная зона Карского моря в подавляющем числе случаев считается ежегодно очищающейся ото льда хотя бы на несколько недель, и рассчитывается непрерывная продолжительность безледного периода, в отличие, например, от характеристики “число дней без льда”, которая является суммой не обязательно последовательных дней [18].

Результаты исследования обогащают представление о динамике ледовых условий в прибрежной зоне Карского моря в современном климате и могут быть использованы при формировании будущих “дорожных карт” и сценариев развития рационального природопользования в соответствующих арктических регионах России.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

На текущий момент для российской Арктики оперативное ледовое картирование и мониторинг практически полностью основано на спутниковых данных видимого и инфракрасного диапазонов [5]. Для определения продолжительности

БЛП в прибрежной зоне Карского моря были использованы данные микроволновых пассивных радиометров из следующих спутниковых наборов данных уровня обработки L3-L4 о сплоченности морского льда: OSISAF, NSIDC и JAXA. Аббревиатуры указывают на научные центры, в которых были разработаны эти массивы данных. При этом каждый из источников основан на использовании пассивных микроволновых радиометров с различных спутниковых миссий, в каждом источнике был использован свой алгоритм для расчета сплоченности морского льда в Арктике [5]. Разнообразие подходов к оценке сплоченности морского льда на основе данных микроволнового зондирования дает возможность оценить вариативность оценок продолжительности безледного периода и его изменений в прибрежной зоне Карского моря.

### *Спутниковые данные*

Под аббревиатурой OSISAF подразумеваются два продукта европейского центра OSI SAF (Satellite Application Facility on Ocean and Sea Ice, <https://osi-saf.eumetsat.int>), развивающегося в рамках Европейской организации спутниковой метеорологии (EUMETSAT): OSI-450 [14] и OSI-430-b [19]. Массив данных OSI-450 является второй версией глобального архива климатических данных о сплоченности морского льда OSI SAF (SIC CDR v2.0). Массив данных OSI-430-b является полуоперативной версией, которая пополняет ряды наблюдений с временной задержкой в 16 дней. Сплоченность морского льда в данных OSI SAF рассчитывается на основе данных, полученных со сканирующего мультисканального микроволнового радиометра SMMR (1979–1987), прибора SSM/I (1987–2008) и SSMIS (2006–2015), а также с помощью расчетов численной модели прогноза погоды Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) ERA-Interim. Массив данных о сплоченности морского льда OSI-430-b дополняет архив OSI-450 после 2015 года, основанный на данных с прибора SSMI/S с использованием оперативного анализа и прогнозов Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Во всех остальных отношениях продукты OSI-450 и OSI-430-b используют одни и те же методы и алгоритмы (ARTIST Sea Ice, ASI), что обеспечивает согласованность между продуктами [31].

Под аббревиатурой NSIDC будем понимать архив климатических данных (Climate Data Records, ID: G02202) Национального Центра данных США по Снегу и Льду (NOAA/NSIDC) о сплоченности морского льда [20, 25]. Был использован вариант “Goddard Merged”, который представляет собой комбинацию оценок сплоченности льда по двум хорошо зарекомендовав-

шим себя алгоритмам, а именно алгоритму NASA Team (NT) [10] и алгоритму NASA Bootstrap [12].

Под аббревиатурой JAXA будем понимать массив данных JASMES (JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies) о сплоченности морского льда, распространяемый Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA). Данный архив с точки зрения организации данных очень похож на данные NSIDC CDR: он использует такую же полярную стереографическую проекцию Polar Stereo с пространственным шагом 25 км [17]. В качестве алгоритма обработки исходных данных здесь заявлен алгоритм JAXA Tuned Bootstrap. Этот массив создан с помощью данных нескольких микроволновых радиометров: SMMR (ноябрь 1978 г.—июль 1987 г.), SSM/I (июль 1987 г.—июнь 2002 г.), AMSR-E (июнь 2002 г.—октябрь 2011 г.), WINDSAT (октябрь 2011 г.—июль 2012 г.), AMSR2 (июль 2012 г.—настоящее время).

Все три источника (OSISAF, NSIDC, JAXA) спутниковой информации о сплоченности морского льда охватывают временной период 1979—2019 гг. и имеют заявленное пространственное разрешение 25 км. Временное разрешение всех наборов данных приведено к 1 суткам, данные о сплоченности морского льда были преобразованы в проценты, диапазон 0—100%.

Помимо спутниковых данных о сплоченности морского льда, существует специализированный массив данных о климатических индикаторах морского ледяного покрова в Арктике (Arctic Sea Ice Seasonal Change and Melt/Freeze Climate Indicators from Satellite Data, Version 1), который был создан и распространяется Национальным Центром данных США по Снегу и Льду, NSIDC [32]. Данный массив имеет идентификационный номер NSIDC-0747, который далее будет использован как аббревиатура этого архива данных. Среди различных параметров в архиве есть подготовленный массив о продолжительности безледного периода (Inner Ice Free Period IIFP), определяемый как разность между датами устойчивого перехода сплоченности через 15% порог [9, 25]. Этот архив также был использован в исследовании изменений продолжительности БЛП в прибрежной зоне Карского моря.

#### *Метод выделения безледного периода*

Чтобы выделить безледный период во внутригодовой динамике сплоченности морского льда, чаще всего применяют пороговый метод. В этом подходе все пиксели или узлы сетки, участвующие в оценке, где значения меньше порогового (обычно порог устанавливается на 15%), помечаются как “открытая вода” [24, 26]. Этот метод широко используется в климатических исследовани-

ях морского ледяного покрова Арктики [16], в том числе для расчета “количества дней открытой воды” [8, 18]. Однако простое число дней с открытой водой не дает информацию о начале и окончании безледного периода. Другие исследования [9, 26] используют также пороговый метод для выделения ключевых дат в годовом ходе сплоченности морского ледяного покрова. Для данного исследования такой подход является наиболее подходящим с рядом уточнений.

Во внутригодовой динамике сплоченности морского льда по спутниковым данным наблюдаются существенные вариации и биения 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 “spillover”) при смене типа подстилающей поверхности с моря на сушу [19], и занижение на 40% итоговой сплоченности в сравнении с данными спектро радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) в ходе постобработки спутникового сигнала алгоритмами ASI (ARTIST Sea Ice), NASA Team 2 и Bootstrap [27]. 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 [13, 15, 21] в существующих климатических массивах данных о сплоченности. Основная идея состоит в том, чтобы объединить преимущества порогового метода с анализом градиентов, характеризующих сезонные периоды таяния/намерзания морского льда. Градиентно-пороговый метод позволяет определять характеристики БЛП, такие как продолжительность и даты начала/окончания периода, на основе анализа годовых временных рядов сплоченности морского льда [29]. Для определения продолжительности необходимо рассчитать дату начала и дату окончания БЛП. Поиск даты начала БЛП происходит в период с 1 марта по 15 сентября, даты окончания — с 15 сентября по 31 декабря. В некоторых районах арктических морей (в рассматриваемом районе — на западе Югорского п-ва) окончание БЛП не обязательно регистрируется в течение текущего календарного года. Поэтому в общем виде период

поиска дат окончания безледного периода расширяется с 15 сентября по 1 марта следующего от текущего календарного года.

Временные ряды сплоченности морского льда нормализуются в пределах каждого из двух периодов поиска, т.е. приводятся в диапазон от 0 до 100%. В течение всего периода поиска с шагом в 1 сутки скользящим методом по нормализованным временным рядам внутри 28-суточного интервала рассчитываются градиенты как разница между последним и первым элементами. Таким образом, получается набор временных интервалов с шагом в 1 сутки, каждый из которых характеризуется градиентом сплоченности. Далее выбираются интервалы, в которых сплоченность достигает пороговых значений в 15% (согласно методологии, как в [26]), т.е. где хотя бы один элемент был меньше/больше (дата начала/дата окончания соответственно) порогового значения.

Из оставшихся временных интервалов выбирается интервал с максимальным градиентом. Его последний/первый элемент интерпретируется как дата начала/окончания БЛП соответственно. Ширина скользящего окна (здесь 28 сут) может рассматриваться как репрезентативный период таяния/намерзания морского льда, когда наблюдаются самые значительные изменения в годовой динамике сплоченности морского льда. Тесты с данными наблюдений за ледовыми явлениями показали, что оптимальная по качеству с точки зрения среднеквадратичных ошибок ширина окна находится вблизи 28 суток.

#### *Подготовка данных*

В полосе акватории Карского моря вдоль береговой были выбраны 76 районов с характерным размером  $25 \times 25$  км<sup>2</sup>, называемые далее точками. Эти размеры соответствуют пространственному разрешению массивов сплоченности льда. Центры районов отстоят друг от друга в среднем на 40 км (рис. 2), а от береговой черты — на 14 км (минимум — 2 км, максимум — 30 км). Такое расположение точек позволяет проанализировать межгодовые изменения продолжительности БЛП в заданном районе так, чтобы каждая точка описывалась уникальным значением спутниковой информации. Для каждой из 76 точек были составлены временные ряды сплоченности морского льда за период 1979–2019 гг. с временным шагом в 1 сутки по трем наборам спутниковых данных (JAXA, OSI SAF, NSIDC) методом ближайшего соседа. Данные трех источников спутниковых данных о сплоченности морского льда также были обобщены в виде медианных ансамблевых оценок (ансамбль ENSEMBLE). Ансамблевые оценки менее подвержены систематическим ошибкам, присутствующим конкретным наборам спутниковых данных, и обладают большей устойчивостью за счет

согласования результатов. Все полученные временные ряды были дополнительно сглажены 15-суточным медианным фильтром для исключения выбросов, существенно затрудняющих применение градиентно-порогового метода [26]. С помощью градиентно-порогового метода по ежесуточным временным рядам сплоченности для каждой из 76 точек были получены ежегодные оценки дат начала и окончания БЛП и рассчитаны продолжительности безледного периода за 1979–2019 гг. Ежегодные оценки продолжительности безледного периода из архива NSIDC-0747 (параметр Inner Ice Free Period, IIFP) за период 1979–2019 гг. также были приведены к выбранным 76 точкам вдоль береговой линии Карского моря методом ближайшего соседа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Большая протяженность Карского моря с юго-запада на северо-восток определяет существенные различия ледового режима в разных районах в течение года [1]. Поэтому среднесезонные характеристики БЛП и их тенденции, полученные по спутниковым данным для прибрежной зоны, имеет смысл рассматривать для юго-западной и северо-восточной частей Карского моря отдельно (рис. 1).

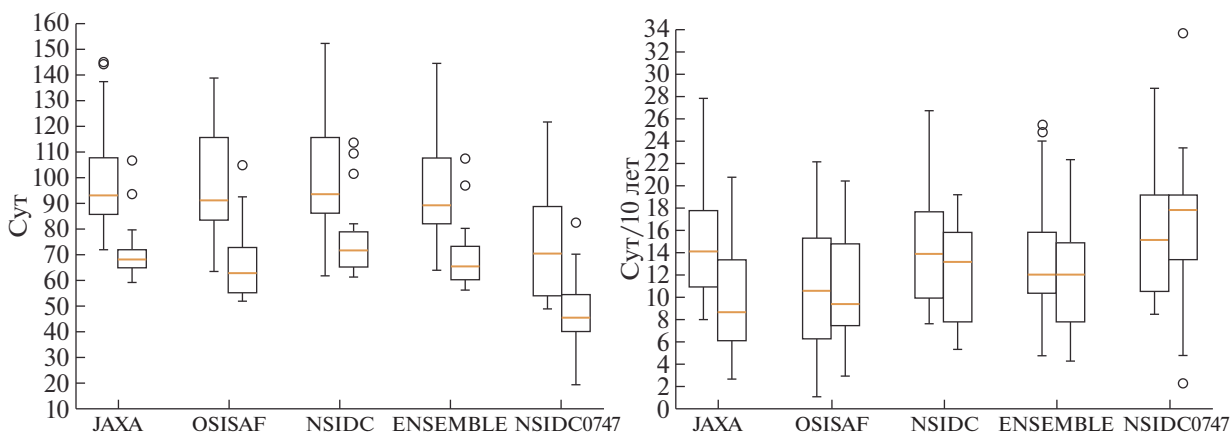
#### *Среднесезонная продолжительность безледного периода в прибрежной зоне Карского моря*

По ежегодным оценкам продолжительности БЛП, полученным для пяти наборов спутниковых данных (JAXA, OSISAF, NSIDC, их ансамбль ENSEMBLE и данные архива NSIDC0747), были рассчитаны стандартные статистики по среднесезонным значениям для юго-западной (53 точки) и северо-восточной (23 точек) частей прибрежной зоны Карского моря (табл. 1).

Между районами Карского моря наблюдается существенное различие в продолжительности БЛП по всем пяти источникам (рис. 1). Среднесезонная продолжительность БЛП в северо-восточной части Карского моря составляет 48–76 сут, что на 25–31 сут меньше, чем в юго-западной.

Стандартное отклонение среднесезонной продолжительности БЛП в северо-восточной части Карского моря на 7–10 сут меньше, чем в юго-западной, размах экстремумов — в несколько раз меньше. Для сравнения: по данным NSIDC разброс экстремальных продолжительностей БЛП в юго-западной части составляет 62–152 сут, в северо-восточной — 61–114 сут.

Наборы данных JAXA, OSISAF, NSIDC и ENSEMBLE показывают хорошее согласие между собой в распределении среднесезонных характеристик БЛП внутри каждого района. Продолжительность БЛП по данным архива NSIDC0747



**Рис. 1.** Распределение среднемноголетней продолжительности безледного периода (слева) и их тенденций (справа) в юго-западной (левый “ящик с усами”) и северо-восточной (правый “ящик с усами”) частях прибрежной зоны Карского моря по данным пяти наборов спутниковых данных.

заметно короче: средняя составляет 74 и 48 сут для юго-западной и северо-восточной частей Карского моря соответственно. При этом средняя продолжительность БЛП, рассчитанная по градиентно-пороговому методу для ENSEMBLE, изменяется в диапазонах 97–101 и 66–76 сут соответственно, что на три недели больше, чем у NSIDC0747.

Среднемноголетняя продолжительность БЛП в прибрежной зоне Карского моря сокращается при движении с юго-запада на северо-восток (рис. 2). При этом в закрытых участках (губы, заливы, закрытые островами участки береговой линии) продолжительность БЛП уменьшается по сравнению с соседними более открытыми районами. Например, в Байдарацкой губе продолжительность БЛП составляет 80–95 сут, тогда как на соседних участках она более 100 суток.

Различия между среднемноголетними продолжительностями БЛП вдоль береговой линии Карского моря по данным NSIDC, JAXA, OSISAF в среднем не превышают 12 сут (медиана не превышает 10 сут), и изменяются в диапазоне от 2 до

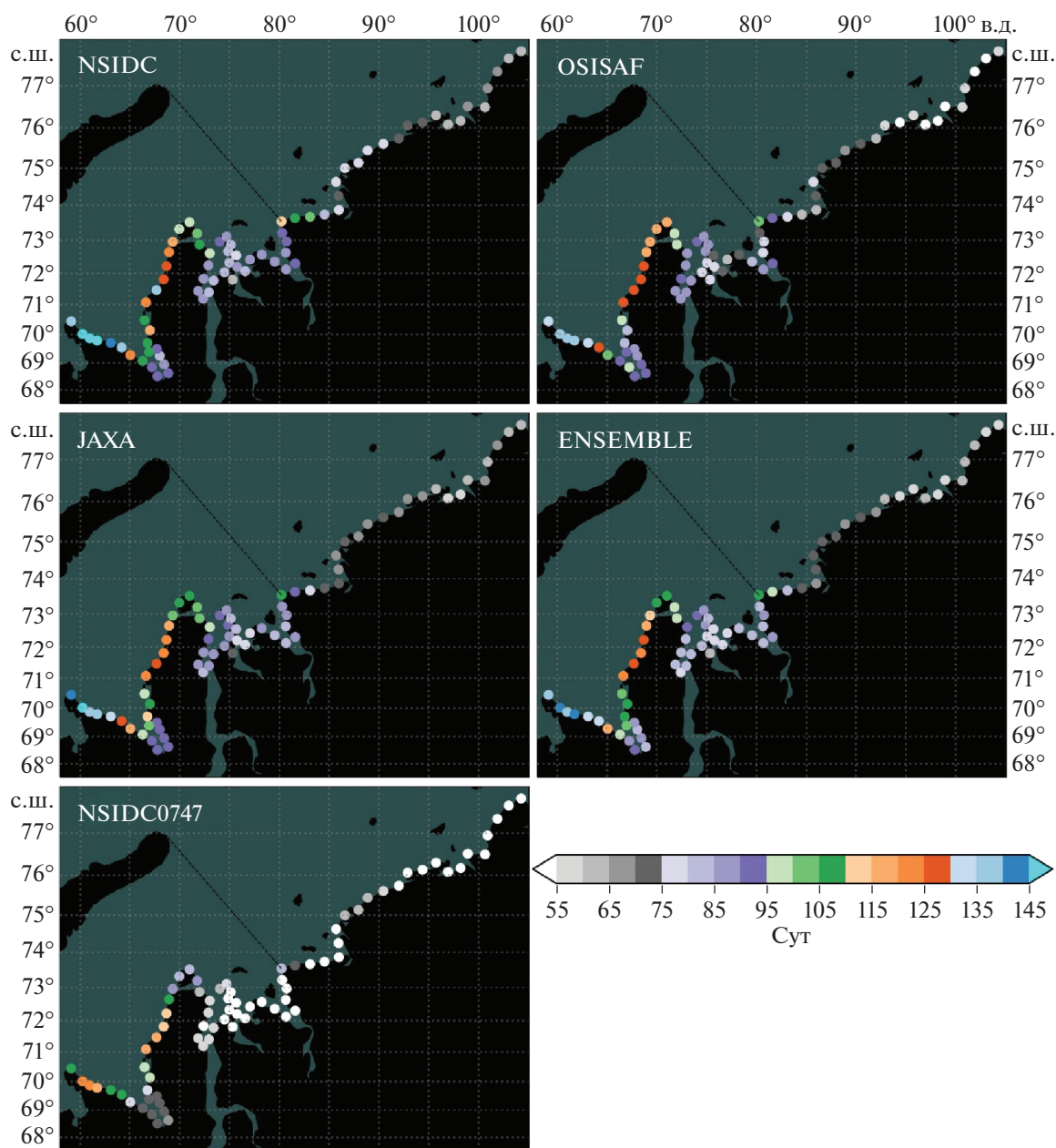
33 сут (рис. 3). При этом оценки среднемноголетней продолжительности БЛП из архива NSIDC0747 заметно ниже, чем у рассмотренных спутниковых наборов данных и их ансамбля ENSEMBLE. В среднем различия между среднемноголетними продолжительностями БЛП у ENSEMBLE и архива NSIDC0747 составляют более трех недель. При этом у обоих источников данных все основные особенности пространственного распределения продолжительности БЛП вдоль береговой линии прослеживаются и для юго-западной, и для северо-восточной частей Карского моря.

Так как среднемноголетние данные о продолжительности БЛП у NSIDC, OSISAF, JAXA и ENSEMBLE различаются между собой не так сильно, как с данными NSIDC0747, то далее будут рассматриваться распределения среднемноголетней продолжительности БЛП по данным ансамбля ENSEMBLE и NSIDC0747 как разные и независимые источники информации.

На западе Карского моря по данным ENSEMBLE продолжительность БЛП в прибрежной зоне –

**Таблица 1.** Статистические характеристики среднемноголетней продолжительности безледного периода для юго-западной и северо-восточной частей Карского моря (сут)

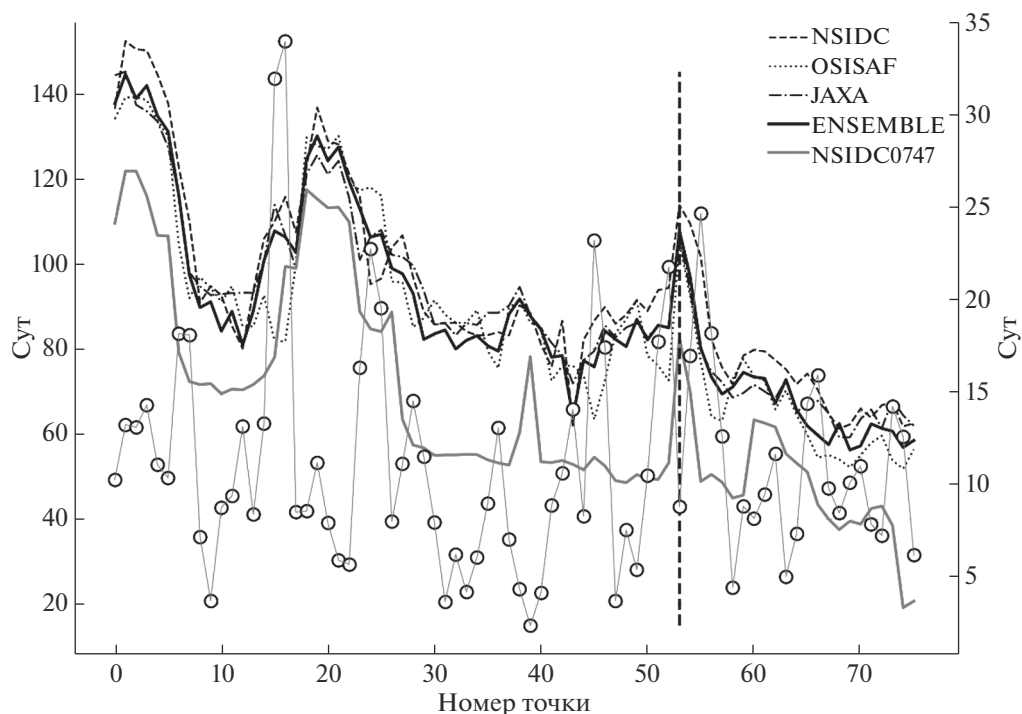
	Юго-западная					Северо-восточная				
	ENS	JAXA	NSIDC	NS0747	OSI	ENS	JAXA	NSIDC	NS0747	OSI
СРЕД	98	100	101	74	97	69	70	76	48	66
СКО	21	19	22	24	21	13	11	15	14	13
МИН	64	72	62	49	63	56	59	61	19	52
25%	82	86	86	54	84	60	65	65	40	55
50%	89	93	94	70	91	66	68	72	46	63
75%	108	108	116	89	116	73	72	79	54	73
МАКС	144	145	152	122	139	108	107	114	82	105



**Рис. 2.** Пространственное распределение среднемноголетней продолжительности безледного периода за период 1979–2019 гг. Пунктирная черная линия разграничивает юго-западную и северо-восточную части Карского моря.

более 140 сут, а на востоке Карского моря – всего 56 сут (121 и 19 сут соответственно по данным NSIDC0747). Размах среднемноголетних значений продолжительности БЛП в прибрежной зоне Карского моря достигает 88 сут (102 сут согласно NSIDC0747). Северо-восточная часть Карского моря по продолжительности БЛП имеет заметно более ровное распределение. На восток, начиная от о. Диксон, продолжительность со 108 сут быстро убывает до значений менее 75 сут и далее восточнее о. Правды уменьшается до 60 сут (с 82 до 21 сут согласно NSIDC0747).

Среднемноголетняя продолжительность БЛП в прибрежной зоне юго-западной части Карского моря в целом убывает при движении с запада на восток, однако заливы и губы нарушают линейный характер изменений. Наибольшая продолжительность БЛП в 130–140 сут (115–125 сут согласно NSIDC0747) наблюдается на самом западе Югорского п-ва, рядом с о. Вайгач. В районе Байдарачьей губы наблюдается заметное сокращение продолжительности БЛП до 80–95 сут (70–80 сут согласно NSIDC0747), далее вдоль западного побережья п-ва Ямал продолжительность



**Рис. 3.** Распределение среднемноголетней продолжительности безледного периода в 76 точках вдоль прибрежной зоны Карского моря по спутниковым данным за период 1979–2019 гг. По правой оси – разность в сутках между соответствующими оценками ENSEMBLE и NSIDC0747 (круглые маркеры на серой линии). Пунктирная черная линия разграничивает юго-западную и северо-восточную части Карского моря.

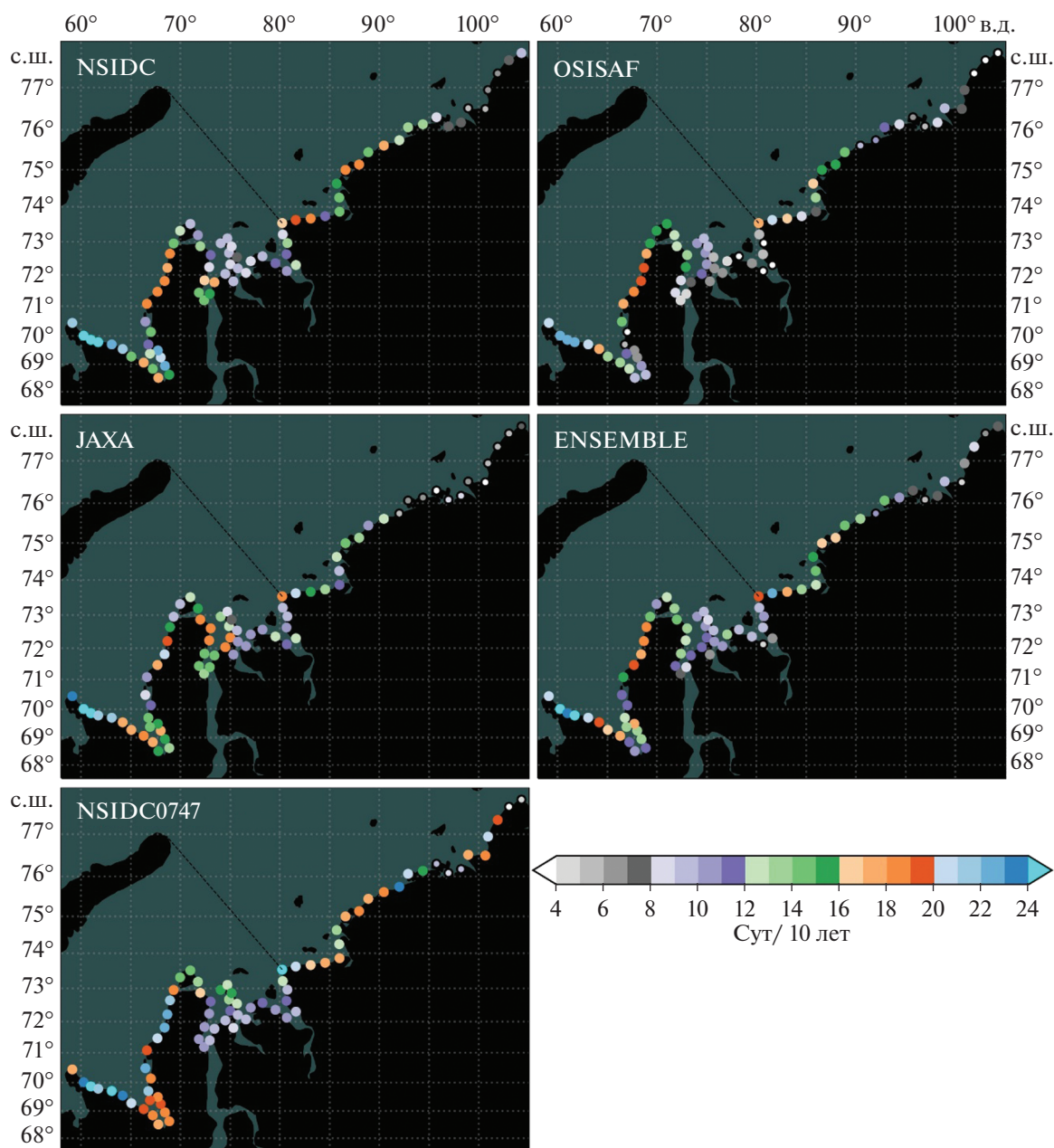
возрастает до 105–130 суток (100–115 сут согласно NSIDC0747). На восточном побережье п-ва Ямал, на окраинах Гыданского п-ва, вплоть до о. Диксон (точка 53) среднемноголетняя продолжительность БЛП уменьшается до 95–75 сут (85–50 сут согласно NSIDC0747). В северо-восточной части после пика около о. Диксон, который прослеживается по всем спутниковым данным и архиву NSIDC0747, продолжительность БЛП плавно уменьшается при движении с запад на восток со 100 до 58 сут (80–21 сут согласно NSIDC0747). Стоит отметить, что среднемноголетняя продолжительность БЛП, согласно архиву NSIDC0747, в северо-восточной части Карского моря уменьшается до 40 суток с небольшим повышением около Таймырского залива до 63 сут и только на самых северо-восточных участках снижается до 20 сут.

#### *Тенденции продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря*

По ежегодным оценкам продолжительности БЛП, полученным для четырех наборов данных (JAXA, OSISAF, NSIDC и их ансамбль ENSEMBLE), а также для продолжительности БЛП по архиву NSIDC0747 (параметр IFFP) были рассчитаны тенденции продолжительности БЛП с оценкой их статистической значимости для юго-западной и северо-восточной частей прибрежной

зоны Карского моря за 1979–2019 гг. Оценки тенденций проводились с помощью линейной регрессии на основе статистического python-пакета `scipy.stats.linregress`. Статистически значимыми признавались результаты на  $\alpha$ -уровне  $< 0.05$ .

Описывая изменения продолжительности БЛП за более чем 40-летний период спутниковых наблюдений (1979–2019 гг.), в первую очередь следует отметить безусловное увеличение продолжительности безледного периода как в юго-западной, так и в северо-восточной частях прибрежной зоны Карского моря (рис. 4). Средние темпы увеличения продолжительности БЛП составляют 10–16 сут/10 лет в северо-восточной части и 11–17 сут/10 лет в юго-западной части прибрежной зоны Карского моря (табл. 2). Таким образом, наблюдается небольшое расхождение в средних оценках тенденций продолжительности БЛП в юго-западной и северо-восточной частях прибрежной зоны Карского моря. При этом на итоговое увеличение продолжительности БЛП позитивно влияют изменения дат начала и окончания периода: даты начала периода смещаются на более ранние сроки со средней скоростью  $-6$ – $10$  сут/10 лет, а даты окончания периода – на более поздние сроки со скоростью  $+5$ – $6$  сут/10 лет. Размах минимумов среди тенденций продолжительности БЛП в юго-западной части Карского моря нахо-



**Рис. 4.** Пространственное распределение тенденций продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным за период 1979–2019 гг. Пунктирная черная линия разграничивает юго-западную и северо-восточную части Карского моря.

дится в пределах от 1 до 8 сут/10 лет, в восточной — в пределах от 2 до 5 сут/10 лет. Размах максимальных значений по разным спутниковым данным составляет 22–29 сут/10 лет в юго-западной части и 20–34 сут/10 лет в северо-восточной части прибрежной зоны Карского моря.

В отличие от среднееголетней продолжительности БЛП, распределение тенденций продолжительности БЛП заметно отличается у разных спутниковых данных как внутри одного рай-

она, так и при сравнении районов друг с другом (рис. 1, справа).

Так, медиана тенденций продолжительности БЛП из архива NSIDC0747 больше на 3 сут/10 лет в северо-восточной части прибрежной зоны Карского моря, чем в юго-западной. Тогда как для ENSEMBLE медианы тенденций в обоих районах практически одинаковы (12 сут/10 лет), а по данным NSIDC, OSISAF и особенно JAXA, наоборот, медиана тенденций продолжительности БЛП в



**Таблица 2.** Статистические характеристики тенденций продолжительности безледного периода для юго-западной и северо-восточной частей Карского моря (сут/10 лет)

	<i>Юго-западная</i>					<i>Северо-восточная</i>				
	ENS	JAXA	NSIDC	NS0747	OSI	ENS	JAXA	NSIDC	NS0747	OSI
СРЕД	13.3	14.8	14.4	15.7	11.1	11.9	9.9	12.2	16.3	10.4
СКО	4.6	4.5	5.2	5.1	5.8	4.8	4.8	4.7	6.5	4.9
МИН	4.8	8.0	7.6	8.5	1.1	4.2	2.6	5.3	2.3	2.9
25%	10.3	10.9	10.0	10.5	6.2	7.8	6.1	7.8	13.3	7.5
50%	12.0	14.1	13.8	15.1	10.6	12.0	8.7	13.1	17.7	9.3
75%	15.8	17.7	17.6	19.1	15.2	14.8	13.3	15.7	19.1	14.7
МАКС	25.4	27.7	26.7	28.7	22.1	22.3	20.8	19.1	33.6	20.4

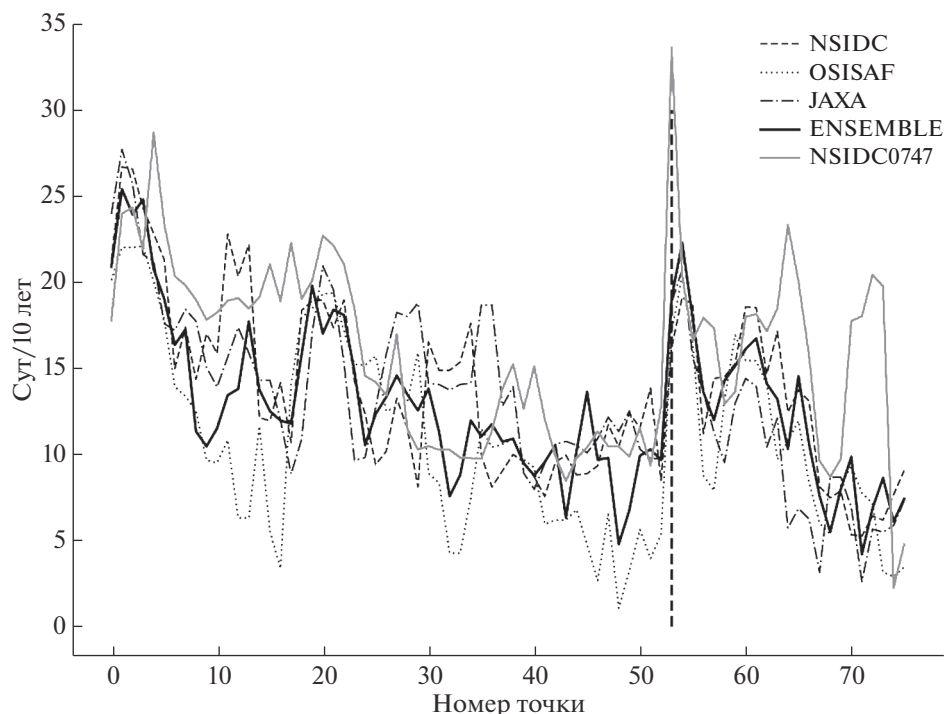
юго-западной части заметно выше, чем в северо-восточной части прибрежной зоны Карского моря (табл. 2). Тенденции продолжительности БЛП из архива NSIDC0747 заметно выше, чем значения других рассмотренных спутниковых данных, особенно в северо-восточной части прибрежной зоны Карского моря.

Тенденции продолжительности БЛП по данным OSISAF в среднем меньше остальных рассмотренных спутниковых данных, при этом здесь же наблюдается максимальный процент (17%) статистически незначимых оценок трендов. Оценки тенденций продолжительности БЛП по данным JAXA выше, чем у NSIDC в юго-западной части и меньше в северо-восточной части прибрежной зоны Карского моря за счет большого количества статистически незначимых положительных трендов здесь у оценок JAXA (15% от общего числа выборки).

Пространственное распределение тенденций продолжительности БЛП в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным, в отличие от распределения среднесезонных значений, не имеет ярко выраженного меридионального характера (рис. 5).

При движении с юго-запада на северо-восток от о. Вайгач до Байдарацкой губы темпы изменений продолжительности БЛП уменьшаются с максимальных значений 22–27 сут/10 лет до 10–17 сут/10 лет. Вдоль западного побережья п-ва Ямал темпы изменений увеличиваются до 15–23 сут/10 лет. От о. Белый и далее на восток темпы изменений постепенно снижаются до 7–17 сут/10 лет вплоть до о. Диксон. В северо-восточной части прибрежной зоны Карского моря в районе о. Диксон они снова увеличиваются до 17–22 сут/10 лет. И далее на восток значения положительных тенденций уменьшаются до 5–10 сут/10 лет в районе м. Стерлигова.

Тенденции продолжительности БЛП из архива NSIDC0747 заметно выше, чем тенденции других рассмотренных спутниковых данных, особенно в северо-восточной части прибрежной зоны Карского моря. С одной стороны, архив NSIDC0747 является высококачественным цифровым продуктом, с другой – оценки среднесезонных значений и тенденций продолжительности БЛП плохо согласуются с другими спутниковыми наборами данных. В случае анализа тенденций, когда разброс оценок различных спутниковых данных высок, наиболее целесообразно рассматривать ансамблевую оценку ENSEMBLE. В юго-западной и северо-восточной частях прибрежной зоны Карского моря изменения продолжительности БЛП за период 1979–2019 гг. происходят на фоне разной среднесезонной продолжительности БЛП. Так, на примере данных ENSEMBLE, при сопоставимых темпах изменений продолжительности БЛП в 10–12 сут/10 лет, например, в районе о. Белый (точка 25) и у западного берега п-ва Таймыр, чуть восточнее м. Стерлегова (точка 68), среднесезонная продолжительность отличается больше чем на месяц (106 и 65 сут соответственно)! В этом примере в северо-восточной части Карского моря наблюдаются высокие темпы смещения на более ранние сроки дат начала БЛП (–7–8 сут/10 лет) и слабо положительные (+3 сутки/10 лет), статистически незначимые скорости изменений для дат окончания БЛП. Для юго-западной же части из примера оба тренда статистически значимы: –7–8 сут/10 лет для дат начала и +4–5 сут/10 лет для дат окончания БЛП. То есть одинаковые темпы изменения происходят на фоне разных среднесезонных значений продолжительности БЛП и разных темпов смещения дат начала и окончания БЛП. К районам с высокими темпами изменений, более 16 сут/10 лет, продолжительности БЛП за период 1979–



**Рис. 5.** Распределение тенденций продолжительности безледного периода в 76 точках вдоль прибрежной зоны Карского моря по спутниковым данным за период 1979–2019 гг. Пунктирная черная линия разграничивает юго-западную и северо-восточную части Карского моря.

2019 гг. в юго-западной части Карского моря можно отнести самый западный район Карского моря, Югорский п-в от о. Вайгач до Байдарацкой губы, западное побережье п-ва Ямал, о. Белый, в северо-восточной – о. Диксон и западное побережье Пясинского залива.

Наименее подвержены изменениям продолжительности БЛП в юго-западной части Карского моря районы Байдарацкой губы, Обской губы и побережье Гыданского п-ва, Енисейский залив, о. Диксон. В оценках OSISAF тенденции продолжительности БЛП в районе Енисейского залива слабopоложительны, статистически незначимы. В северо-восточной части Карского моря восточнее 95° в.д. наблюдаются самые слабые положительные тенденции, практически все они статистически незначимы.

Наибольшее расхождение в оценках тенденций продолжительности БЛП среди проанализированных источников спутниковых данных (OSISAF, JAXA, NSIDC) наблюдается в юго-западной части Карского моря в районе Байдарацкой губы, у юго-западного побережья п-ва Ямал, на восточном побережье п-ва Ямал до Обской губы, а также около Енисейского залива. Здесь стандартное отклонение оценок тенденций достигает значений 5–7 сут/10 лет. В северо-восточной части оценки тенденций продолжительности БЛП сгруппированы лучше, чем в юго-западной.

Стандартное отклонение здесь не превышает 3 сут/10 лет.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании представлен анализ межгодовой изменчивости продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря, проведенный на основе спутниковых данных о сплошности морского льда за период 1979–2019 гг. По сравнению с исследованиями [9, 26], где в том числе оценивались изменения продолжительности безледного периода в Карском море, в данной работе сделан упор на детальный анализ изменений продолжительности БЛП именно в прибрежной зоне. Полученные средние оценки изменений продолжительности БЛП в юго-западной и северо-восточной частях прибрежной зоны Карского моря удовлетворительно согласуются с оценками изменений продолжительности всего Карского моря [26]. Для всего Карского моря среднемноголетняя продолжительность БЛП составляет 79.3 суток (83.5 сут по ENSEMBLE и 61 сут по NSIDC0747), тенденция продолжительности БЛП оценивается в 13.8 сут/10 лет (12.6 сут/10 лет по ENSEMBLE и 16 сут/10 лет по NSIDC0747) [9]. Оба исследования указывают на значимое увеличение продолжительности безледного периода в Карском море.

Полученные оценки указывают на существенные изменения режима ледовитости в период 1979–2019 гг. в прибрежной зоне Карского моря, однако подтвердить полученные результаты на основе другого источника информации на таком пространственно-временном масштабе не удается.

Сравнение с данными береговых наблюдений возможно лишь на некоторых участках побережья. К тому же возникает проблема интерпретации данных наблюдателя с берега и данных спутниковой ячейки. Проведенные сравнения с данными наблюдений за ледовыми условиями на станции “Марресаля” (западный Ямал) показали принципиальную возможность получения адекватных оценок характеристик БЛП и их тенденций в прибрежной зоне российской Арктики по спутниковым данным [30]. Сравнивая результаты спутниковых оценок продолжительности БЛП и наблюдения на прибрежных станциях сроков ледовых явлений, можно предполагать, что реальные темпы изменений продолжительности БЛП в прибрежной зоне Карского моря ниже оценок, показанных в данной работе. В первую очередь это касается дат начала безледного периода, для которых наблюдается высокая межгодовая и пространственная изменчивость, что существенным образом влияет на итоговую продолжительность безледного периода. Оценки дат окончания БЛП имеют более консервативный и однородный характер, что дает больше оснований считать их близкими к реально происходящим процессам в прибрежной зоне Карского моря. Среднегодовые продолжительности БЛП внутри рассмотренного региона и характер их тенденций показан верно и носит устойчивый характер.

Точность полученных в работе оценок продолжительности БЛП с помощью градиентно-порогового метода зависит от качества данных о сплоченности морского льда из разных источников данных (NSIDC, JAXA, OSISAF). В работе [27] показано, что сплоченность морского льда по данным алгоритмов ASI (ARTIST Sea Ice), NASA Team 2 и Bootstrap оказывается заниженными на 40% по сравнению с данными измерений спектрометра MODIS. Хотя исследование [27] было проведено на ограниченной выборке, этот факт может объяснить завышенные значения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне по спутниковым микроволновым данным за счет более низкой сплоченности в период активного таяния и появления снежиц по сравнению с данными береговых наблюдений [1, 2]. Наличие снежицы на поверхности приводит к занижению летней сплоченности льда, так как радиометрические свойства открытой воды и воды снежиц одинаковы [6, 10]. Тем не менее, несмотря на известные проблемы при оценке сплоченности морского льда, особенно в прикромочной зоне [5], непрерывно пополняемые архивы пассивного микро-

волнового зондирования уже более 40 лет остаются важнейшим источником фактической информации о состоянии арктического ледяного покрова.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование представляет базовый статистический анализ среднегодовых значений и тенденций продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря. В работе использован градиентно-пороговый метод для оценки продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по данным о сплоченности морского льда с пассивных микроволновых радиометров различных спутниковых миссий. Представленные в работе результаты описывают количественные различия среднегодовой продолжительности безледного периода и его изменений в юго-западной и северо-восточной частях Карского моря между разными источниками спутниковых данных.

По оценкам рассмотренных спутниковых наборов данных, среднегодовая продолжительность БЛП в юго-западной части Карского моря составляет 73–107 сут, что на 25–31 сут больше, чем в северо-восточной. Наборы данных JAXA, OSISAF, NSIDC и ENSEMBLE показывают хорошее согласие между собой в распределении среднегодовых статистик БЛП внутри каждого района. Продолжительность БЛП по данным архива NSIDC0747 заметно короче, в среднем составляет 74 и 48 сут для юго-западной и северо-восточной частей Карского моря соответственно.

Показано, что продолжительность безледного периода в прибрежной зоне Карского моря за период 1979–2019 гг. повсеместно увеличилась, средние темпы изменений оцениваются в 12 сут/10 лет. Тенденции продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря в большей степени зависят от смещения дат начала БЛП на более ранние сроки, чем от изменений дат окончания периода на более поздние. Понимание условий начала процесса таяния морского льда является наиболее важным для прогноза продолжительности безледного периода.

К районам Карского моря с наиболее высокими темпами изменений продолжительности БЛП (>16 сут/10 лет) за период 1979–2019 гг. в юго-западной части следует отнести самый западный район Карского моря, от о. Вайгач до Байдарацкой губы, западное побережье п-ва Ямал, о. Белый, в северо-восточной – о. Диксон и западное побережье Пясинского залива. Наименее подвержены изменениям продолжительности БЛП в юго-западной части Карского моря районы Байдарацкой губы, Обской губы и побережья Гыданского п-ва, Енисейский залив, о. Диксон. В северо-

ро-восточной части Карского моря восточнее 95° в.д. наблюдаются самые слабые положительные тенденции (<6 сут/10 лет), практически все они статистически незначимы.

Полученные с помощью спутниковых пассивных микроволновых радиометров среднемноголетние оценки БЛП (NISDC, JAXA, OSISAF) имеют большое сходство как по общим статистическим показателям, так и по пространственному распределению в прибрежной зоне Карского моря. При этом рассчитанные по этим же наборам спутниковых данных тенденции продолжительности БЛП за период 1979–2019 гг. заметно отличаются по абсолютным значениям. В обоих случаях рекомендуется использовать ансамбль этих данных ENSEMBLE, который менее подвержен систематическим погрешностям конкретных наборов данных.

Среднемноголетняя продолжительность БЛП (ИФР согласно [9]) по архиву NSIDC0747 в среднем на три недели меньше, чем по данным других спутниковых оценок, в том числе и ансамбля ENSEMBLE. Тенденции продолжительности БЛП по архиву NSIDC0747 в среднем на 2–5 сут/10 лет выше, чем аналогичные оценки NSIDC, JAXA и OSISAF. Таким образом, этот архив NSIDC0747 показывает завышенные тенденции продолжительности БЛП и систематически заниженные среднемноголетние значения продолжительности БЛП в прибрежной зоне Карского моря по сравнению с другими рассмотренными спутниковыми данными.

**Источники финансирования.** Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ, проект 14 W03.31.0006. Мониторинг продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря выполнен при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-55-14003 АНФ\_а. Тестирование и апробация градиентно-порогового метода выделения безледного периода в прибрежной зоне арктических морей России выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0128-2021-0003).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
2. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
3. Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С. Ледовитость арктических морей и её связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // Лед и Снег. 2020. Т. 60(1). С. 134–148.
4. Павлидис Ю.А., Леонтьев И.О., Никифоров С.Л. и др. Генеральная прогнозная схема развития прибрежной зоны арктических морей Евразии в 21 веке // Океанология. 2007. Т. 47. № 1. С. 129–140.
5. Репина И.А., Иванов В.В. Применение методов дистанционного зондирования в исследовании динамики ледового покрова и современной климатической изменчивости Арктики // Совр. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 89–103.
6. Репина И.А., Тихонов В.В. Снежицы на поверхности льда в летний период и их связь с климатическими изменениями в Арктике // Российская Арктика. 2018. № 2. С. 15–30.
7. Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Ефимов Я.О. и др. Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в юго-западной части Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 239–254.
8. Barnhart K., Overeem I., Anderson R. The effect of changing sea ice on the physical vulnerability of Arctic coasts // The Cryosphere. 2014. V. 8. P. 1777–1799. <https://doi.org/10.5194/tc-8-1777-2014>
9. 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. V. 14(4). 045003. P. 1–11.
10. Cavalieri D., Gloersen P., Campbell W. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR // J. Geophys. Res. 1984. V. 89(D4). P. 5355–5369. <https://doi.org/10.1029/JD089iD04p05355>
11. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // The Cryosphere. 2012. V. 6. № 4. P. 881–889.
12. Comiso J. Characteristics of arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // Journal of Geophysical Research. 1986. V. 91(C1). P. 975–994.
13. Comiso J., Zwally H. Concentration gradients and growth/decay characteristics of the seasonal sea ice cover // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1984. V. 89(C5). P. 8081–8103.
14. EUMETSAT Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility. Global sea ice concentration climate data record 1979-2015 // 2017. V2.0 [Online]. Norwegian and Danish Meteorological Institutes. [https://doi.org/10.15770/EUM\\_SAF\\_OSI\\_0008](https://doi.org/10.15770/EUM_SAF_OSI_0008)
15. 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. V. 404. P. 71–83.
16. 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. V. 36(10). P. 1–6.
17. JASMES JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies. Polar Climate data (Sea Ice Concentration and Sea Ice Extent from 1978 to the present // 2019.

- [Online]. JAXA, URL: [ftp://apollo.eorc.jaxa.jp/pub/JASMES/Polar\\_XXkm/ic0/climate/](ftp://apollo.eorc.jaxa.jp/pub/JASMES/Polar_XXkm/ic0/climate/).
18. *Khon V., Mokhov I., Latif M. et al.* Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the twenty-first century // *Climatic Change*. 2010. V. 100. Issue 3–4. P. 757–768. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9683-2>
  19. *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. V. 13. P. 49–78. <https://doi.org/10.5194/tc-13-49-2019>
  20. *Meier W.N., Fetterer F., Savoie M. et al.* NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 3. [G02202]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. 2017. [04.03.2020]. <https://doi.org/10.7265/N59P2ZTG>
  21. *Meier W., Stroeve J.* Comparison of sea-ice extent and ice-edge location estimates from passive microwave and enhanced-resolution scatterometer data // *Annals of Glaciology*. 2008. V. 48. P. 65–70. <https://doi.org/10.3189/172756408784700743>
  22. *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. V. 9. № 3. P. 53–73. [https://doi.org/10.15356/2071-9388\\_03v09\\_2016\\_04](https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_04)
  23. *Onarheim I., Eldevik T., Smedsrud L., Stroeve J.* Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss // *Journal of Climate*. 2018. V. 31(12). P. 4917–4932.
  24. *Overeem I., Anderson R.S., Wobus C.W. et al.* Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. L17503. <https://doi.org/10.1029/2011GL048681>
  25. *Peng G., Meier W.N., Scott D., Savoie M.* A long-term and reproducible passive microwave sea ice concentration data record for climate studies and monitoring // *Earth Syst. Sci. Data*. 2013. V. 5. P. 311–318. <https://doi.org/10.5194/essd-5-311-2013>
  26. *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. V. 10. P. 1328–1353.
  27. *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. V. 6. P. 431–446. <https://doi.org/10.5194/tc-6-431-2012>
  28. *Shabanov P.A., Shabanova N.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>
  29. *Shabanov P.A., Shabanova N.N.* Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone // *Russ. J. Earth. Sci.* 2020. V. 20. ES6016. <https://doi.org/10.2205/2020ES000725>
  30. *Shabanov P.A., Shabanova N.N., Ogorodov S.A.* Ice-free period detection uncertainties over the coastal zones // *Proceedings of the 14th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation. Vol. 2 of MEDCOAST 2019. — Mediterranean Coastal Foundation Grand Yazici Club Turban Hotel, Marmaris, Turkey*, 2019. P. 663–674.
  31. *Spreen G., Kaleschke L., Heygster G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № C02S03. <https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
  32. *Steele, M., Bliss A.C., Peng G. et al.* Arctic Sea Ice Seasonal Change and Melt/Freeze Climate Indicators from Satellite Data, Version 1. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. 2019. <https://doi.org/10.5067/KINANQKEZI4T>.
  33. *Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M. et al.* The Arctic’s rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis // *Climatic Change*. 2012. V. 110. P. 1005–1027. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>

## Ice-Free Period Duration Changes in the Coastal Zone of the Kara Sea Using Satellite Data

P. A. Shabanov<sup>#</sup>

<sup>1</sup>*P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Nakhimovski ave., 36, Moscow, 117997 Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: pa.shabanov@ocean.ru*

Rapid arctic sea ice reduction in XXI century leads to an increase in the duration of the ice-free period in the Arctic Ocean seas. The duration of the ice-free period is an important climate indicator for the coastal dynamics monitoring in Russian Arctic zone. Climate changes in the duration of the ice-free period significantly affect the functioning of coastal infrastructure and ecosystems, increase opportunities for economic activity such as resource extraction, shipping, and tourism. Modern satellite data from remote microwave sensing cover more than 40 years of observations and provide to analyze the state and dynamics of the sea ice cover in the coastal zone of the Russian Arctic. Based on the gradient-threshold method, which was specially developed for the coastal data, the annual ice-free period duration estimates for the Kara Sea coastal zone over the period 1979–2019 were ob-

tained from satellite sea ice concentration datasets, distributed by several scientific centers (JAXA, OSI SAF and NSIDC). According to analyzed satellite data sources, the ice-free period duration in the coastal zone of the Kara Sea has almost everywhere increased significantly over the past decades. The ice-free period duration increase occurs both due to the earlier melt onset (averaged trend is  $-8$  days/decade), and delayed autumn freeze-up (averaged trend is  $+4$  days/decade). The total ice-free period duration averaged trend is  $+12$  days/decade for the period 1979–2019 in the coastal zone of the Kara Sea. The sea ice retreat dates changes contribute more than sea ice advance dates the total ice-free period duration changes due higher interannual variability and a large spatial diversity. Ice-free period duration trends estimations allowed us to identify the most intensively changing areas within the Kara Sea coastal zone: the Yugorsky Peninsula, the western and northern coasts of the Yamal Peninsula. The study clarifies the regional features of the sea ice climate changes in the framework of the Russian Arctic coastal dynamics monitoring.

**Keywords:** ice-free period, sea ice concentration, sea ice, arctic coastal zone, climate changes