

ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ БЕЗЛЕДНОГО ПЕРИОДА В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ ПРИБРЕЖНЫХ И СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

П. А. Шабанов

*Институт океанологии им. П. П. Шишова РАН,
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
e-mail: pa.shabanov@ocean.ru*

Выполнен анализ продолжительности безледного периода (БЛП) по прибрежным ледовым и спутниковым наблюдениям в Восточно-Сибирском море с 1997 по 2023 гг. Для береговых участков пяти гидрометеорологических станций оценены изменения характеристик БЛП: даты начала и окончания БЛП, а также его общая продолжительность. Рассчитаны статистики среднемноголетних характеристик БЛП за период 1997–2023 гг., показана их значимая пространственная неоднородность. В дополнении к анализу климатических изменений прибрежного морского ледяного покрова в Восточно-Сибирском море были привлечены спутниковые данные пассивного микроволнового дистанционного зондирования.

За период 1997–2023 гг. не удалось выявить статистически значимых изменений как дат начала, так и продолжительности БЛП согласно наблюдениям. В 80 % получены статистически значимые положительные изменения дат окончания БЛП. Выводы относительно изменений БЛП в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря, сформулированные в ходе анализа наблюдений, лишь частично подтверждаются анализом спутниковых данных, как для характера изменений, так и для среднемноголетних величин БЛП.

Ключевые слова: безледный период, изменения климата, морской лед, Восточно-Сибирское море, Арктика, прибрежная зона, сплоченность морского льда, дистанционное зондирование

Введение

С конца 80-х гг. XX века в Восточно-Сибирском море заметно чаще стали наблюдаться легкие ледовые условия (Макаров и др., 2022). Так, в 1990 г., впервые с 1946 г. в летний сезон акватория моря практически полностью очистилась от дрейфующих льдов (Юлин и др., 2018). Также в последние десятилетия в Восточно-Сибирском море наблюдается интенсивное уменьшение площади ледяных массивов (Юлин и др., 2018), что напрямую влияет на сокращение ледового периода. В работе (Третьяков и др., 2019) отмечается, что в апреле–мае, когда наблюдается максимальное развитие ледяного покрова, уменьшилась суммарная протяженность морского льда по маршруту плаваний «Обская губа – пролив Вилькицкого – Берингов пролив» (куда входит участок, пролегающий по Восточно-Сибирскому морю) в припае и в сплоченных льдах при наличии старых льдов за период 1998–2018 гг.

В работе (Шалина, 2015) показаны изменения ледовитости северных морей России и оценка доступности северного морского пути (СМП) по данным спутникового мониторинга. Отмечено, что среди изменений протяженности ледяного покрова в арктических морях России, наиболее слабо тенденция сокращения ледяного покрова выражена в Восточно-Сибирском море. Средняя скорость сокращения протяженности ледяного покрова в Восточно-Сибирском море за июль, август и сентябрь, когда наблюдается минимальная ледовитость, составила 10 %, а средняя скорость сокращения ледяного покрова в сентябре – 25 %. В работе (Шалина, 2021) на основе спутниковых данных микроволнового зондирования за период 1979–2020 гг. показано, что заметные изменения в ледяном покрове Восточно-Сибирского моря зафиксированы на временном отрезке с июля по октябрь, т. е. в характерные сроки безледного периода. Также показано, что именно в Восточно-Сибирском море, по сравнению с другими арктическими морями России, наблюдаются наибольшие изменения в сопоставлении с ледовой обстановкой предыдущего XX столетия.

В работе (Мохов и Хон, 2015) были получены оценки продолжительности навигационного периода и изменений его продолжительности в 1980–2013 гг. для СМП на основе спутниковых данных о сплоченности морского льда в Арктическом бассейне. По спутниковым данным средняя продолжительность навигационного периода при степени покрытия акватории льдом меньше 15 % для СМП в 1980–2013 гг. составляла 80 сут, а по расчетам с лучшими климатическими моделями CNRM-CM5, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR – от 75 до 91 сут. При этом скорость увеличения продолжительности периода навигации по данным спутниковых наблюдений была равна 18 сут/10 лет, а по модельным расчетам – от 17 до 21 сут/10 лет.

В работе (Семенов, Черенкова, 2025) проанализированы возможные изменения продолжительности периода открытой воды в XXI веке согласно расчетам ансамбля климатических моделей последнего поколения CMIP6 (O’Neil et al., 2016). Ансамблевые оценки указывают на постепенное увеличение продолжительности безледного периода в исключительной экономической зоне России в XXI веке по умеренным социально-экономическим сценариям SSP245 и SSP585. Согласно прогнозу, по этим сценариям продолжительность незамерзающего судоходства в Восточно-Сибирском море может увеличиться более, чем в 2.5 раза к периоду 2071–2090 гг., по сравнению с периодом 1981–2020 гг., и составить четыре месяца в году во второй половине XXI века (Семенов, Черенкова, 2025).

В работе (Мысленков, 2024) проанализированы изменения продолжительности безледного периода и значимых высот волн в этот период вдоль северной и южной трасс СМП. Отмечается, что на всем протяжении СМП тренды продолжительности БЛП составляют 15–20 сут/10 лет. Минимальные значения БЛП в Восточно-Сибирском море (около 30 сут) наблюдаются на северном маршруте СМП. На южном маршруте продолжительность БЛП приблизительно в 2 раза больше, чем на северном маршруте.

В перечисленных выше работах проводились исследования изменений продолжительности безледного периода, осредненные либо по всей акватории

Восточно-Сибирского моря, либо по соответствующим участкам СМП. В этих работах не привлекались данные прибрежных наблюдений, которые особенно ценны для анализа и мониторинга береговой динамики. Наблюдаемые в конце XX – начале XXI вв. сокращения площади морского льда, его толщины, а также уменьшение доли старых льдов в Восточно-Сибирском море, могут не являться характерными для прибрежной зоны, так как здесь, во-первых, существенный вклад вносят пресные воды рек, а во-вторых, здесь формируется припай. В Восточно-Сибирское море впадают крупные реки, самая значимая, конечно, р. Колыма, в дельте которой расположена печально известная станция «Амбарчик», а также р. Индигирка, р. Алазея, р. Хрома (Думанская, 2017).

Наблюдаемые и прогнозируемые изменения количественных и качественных характеристик морского ледяного покрова в морях СЛО во многом определяют и будут определять динамику отступления арктических берегов России, так как существенная их часть состоит из многолетнемерзлых пород (Ogorodov et al., 2016; Огородов и др., 2022). Уменьшение площади морского ледяного покрова, таяние «вечной» мерзлоты и грунтовых льдов – все это непосредственным образом сказывается на динамике арктических побережий (Nielsen et al., 2020; IPCC, 2023). Береговая эрозия, термоабразия происходят при условии отсутствия значимого количества морского льда в прибрежной зоне (Ogorodov et al., 2020; Shabanov et al., 2020; Irrgang et al., 2022). В XXI в. наблюдается уменьшение сезонной площади морского льда в морях СЛО, что непосредственно проявляется в увеличении продолжительности безледного периода в теплый сезон (Comiso et al., 2017; Ivanov, 2023; Shabanov et al., 2024). Безледный период – период времени, когда прибрежная зона свободна от припая и открыта для воздействия морских волн, в первую очередь, ветровых. Наряду с сокращением площади морского льда, в Восточно-Сибирском море в период 1979–2021 гг. наблюдается значительное увеличение среднегодовой высоты волн (Мысленков, 2023). Расширение безледного периода и усиление волновой активности способствуют ускорению отступления береговой линии (Ogorodov et al., 2016; Шабанова и Шабанов, 2020; Огородов и др., 2022). Для прогноза береговой динамики морей российской Арктики критически важно располагать устойчивыми в статистическом плане оценками будущих изменений продолжительности БЛП, включая сроки его начала и окончания.

В Восточно-Сибирском море насчитывается всего несколько береговых станций, где проводятся прибрежные наблюдения за ледовым покровом (Думанская, 2017; Афанасьева и др., 2019). Количество таких наблюдений недостаточно для мониторинга изменений безледного периода вдоль всей береговой линии Восточно-Сибирского моря. Чтобы расширить географию на произвольный береговой участок Восточно-Сибирского моря, дополнительно к прибрежным наблюдениям в исследовании проводился анализ изменений характеристик безледного периода по данным дистанционного зондирования. С одной стороны, спутниковые данные – это дополнительный источник климатической информации для мониторинга. А с другой, данные береговых станций можно использовать в качестве подспутниковых наблюдений для

валидации спутниковых измерений и сопоставления полученных результатов (Шабанов и Шабанова, 2024).

В работе проанализированы изменения безледного периода за период с 1997 по 2023 гг. по наблюдениям на пяти гидрометеорологических станциях Росгидромета, расположенных в прибрежной зоне в Восточно-Сибирского моря. Использование разных по своей природе наблюдений – in-situ и дистанционное зондирование – для анализа среднемноголетних значений и скорости наблюдаемых изменений БЛП, могут существенно отличаться. Эти количественные различия важны для понимания использования спутниковых данных в прибрежной зоне, так как зачастую, кроме этих данных, других измерений и наблюдений за ледовым режимом арктической зоны РФ там нет. Такой подход обеспечивает научную новизну настоящего исследования изменений безледного периода в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря. В работе (Шабанов, 2024) схожая методология применялась для региона Карского моря, где изменения ледового режима и БЛП существенно отличаются от изменений в Восточно-Сибирском море.

Данные и методы

В Восточно-Сибирском море функционируют 5 арктических гидрометеорологических станций Росгидромета (рисунок 1), где проводятся наблюдения за состоянием морского ледяного покрова (Афанасьева и др., 2019). С сервера Мирового центра данных «Морской лед» Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ, <https://www.aari.ru>) доступны данные наблюдений на гидрометеорологических станциях Росгидромета за период 1996–2020 гг. (<http://wdc.aari.ru/datasets/d0009>). Благодаря участию сотрудников Лаборатории долгосрочных ледовых прогнозов, отдела ледового режима и прогнозов ААНИИ, временные ряды были актуализированы до зимнего сезона 2023–2024 гг. (таблица 1). Все рассмотренные станции описывают ледовый режим в прибрежной зоне только восточной части Восточно-Сибирского моря.

Табл. 1 – Метаданные гидрометеорологических станций Росгидромета в Восточно-Сибирском море, где проводятся прибрежные ледовые наблюдения

	Индекс ВМО	Название	Район моря	Долгота, ° в. д.	Широта, ° с. ш.
1	21978	Валькаркай	восток	170.9253	70.0839
2	25034	Амбарчик	восток	162.3029	69.6248
3	25042	Айон	восток	167.9689	69.9186
4	25044	Рау-Чуа	восток	166.5833	69.5000
5	25051	Певек	восток	170.5947	69.7865

Прибрежные ледовые наблюдения позволяют осуществлять мониторинг климатических изменений в прибрежной зоне (Шабанов, 2024). Например, на их основе



Рис. 1 – Расположение полярных гидрометеорологических станций в Восточно-Сибирском море. Условная пунктирная вдоль 160° в. д. разделяет Восточно-Сибирское море на западную и восточную части. Серыми круглыми маркерами отмечены узлы спутниковых данных NSIDC

рассчитывается климатический индикатор «число дней со льдом», характеризующий степень ледовитости акватории (Матишов и др., 2014). Противоположным по определению, но дополнительным по смыслу, является другой климатический индикатор – «число дней без льда». Этот параметр близок к продолжительности безледного периода. Чтобы охарактеризовать безледный период, нужно знать два ключевых момента: дату его начала и дату окончания. Даты очищения акватории из наблюдений на станциях можно использовать как даты начала БЛП, а даты устойчивого ледообразования – как даты окончания БЛП (Шабанов и Шабанова, 2024). Продолжительность БЛП – разность между этими датами, выраженная в днях (Bliss et al., 2019; Шабанов, 2024). Даты начала и окончания БЛП в работе представлены как в формате «день–месяц–год», так и в формате «номер дня в году».

В холодный сезон в Восточно-Сибирском море формируется припай, особенно широкий в западной части моря. Анализ изменений морского ледяного покрова в прибрежной зоне, включая продолжительность БЛП, непосредственно связан с наблюдениями за припаем. В работе (Думанская, 2017) указывается, что за период 1985–2015 гг. средние толщины припайного льда в Восточно-Сибирском море уменьшились на 2–3 см, а максимальные толщины – на 8–19 см. За период 2000–2015 гг. подобные изменения наблюдаются для средних и максимальных толщин на 4–16 см и 11–32 см соответственно.

В прибрежных ледовых наблюдениях фиксируются сроки формирования припая, а именно даты «первого становления припая», «устойчивого становления припая» и «окончательного разрушения припая». Сравнение с датами устойчивого ледообразования из тех же прибрежных наблюдений показало, что даты становления

припая практически от них не отличаются. При этом даты окончательного разрушения припая либо также не отличаются от дат окончательного очищения акватории, которые были использованы как даты начала БЛП, либо наблюдаются почти на две недели – месяц раньше. Самое важное здесь, что припай разрушается раньше, то есть если для определения продолжительности БЛП взять именно даты становления и разрушения припая, то такая продолжительность БЛП станет только больше по сравнению с БЛП, рассчитанным от дат устойчивого ледообразования и полного очищения. Пространственного разрешения климатических архивов спутниковых данных пассивного микроволнового зондирования недостаточно для корректного определения припая в восточной части Восточно-Сибирского моря. Поэтому для корректного сравнения спутниковых данных и данных прибрежных наблюдений при определении продолжительности БЛП были использованы даты устойчивого ледообразования и полного очищения акватории.

Определение безледного периода по спутниковым данным сплоченности морского льда

Глобальные спутниковые данные дистанционного пассивного микроволнового зондирования позволяют получать климатические данные о сплоченности морского льда с пространственным разрешением ~25 км и временным разрешением одни сутки (Тихонов и др., 2016). По внутригодовой динамике сплоченности морского льда можно определить даты начала и окончания безледного периода (Peng et al., 2018; Shabanov, Shabanova, 2020). Показано, что значение 15 % сплоченности морского льда является порогом, который уверенно разграничивает участки открытой воды от участков, покрытых морским льдом (Comiso, 1986). Временные периоды, когда значения сплоченности менее порогового значения (обычно выбирается порог 15 %), считаются свободными ото льда (Overeem et al., 2011; Bliss et al., 2019; Шабанов и Шабанова, 2024). Этот метод является базовым для анализа таких климатических индикаторов как «сезон открытой воды» (open water season) и «число дней без льда» (number of days with open water) (Howell et al., 2009; Khon et al., 2010; Barnhart et al., 2014; Shabanov et al., 2024). Тем не менее, пороговый метод имеет ограничения в случае анализа спутниковых данных в прибрежной зоне (Shabanov et al., 2020; Шабанов, 2024). Пороговый метод по определению чувствителен к абсолютным значениям сплоченности морского льда. Для прибрежной зоны критически значимым является пространственное разрешение границы «море–суша», когда площадь суши оказывается существенной в измеряемой ячейке спутниковых данных. А так как радиояркостные температуры суши и льда значительно ближе, чем радиояркостные температуры льда и воды, то доля морского льда в такой ячейке может интерпретироваться с ошибкой. Эта известная проблема, называемая также “spill-over” эффектом, учитывается в работе алгоритмов определения сплоченности современных климатических архивов (Lavergne et al., 2019). Однако в данных сплоченности в прибрежной зоне могут оставаться ошибки, связанные с несовершенством методов коррекции.

Автоматизированное определение БЛП в прибрежной зоне с помощью порогового метода может приводить к некорректным результатам. Для решения таких затруднений при анализе изменений БЛП, когда все значения сплоченности выше порогового значения 15–30 %, был разработан модифицированный пороговый метод, МПМ (Shabanov, Shabanova, 2020). Этот метод позволяет определить БЛП с помощью анализа скорости изменений сплоченности. В период активного таяния / замерзания такая скорость заметно выше, чем в предыдущие периоды полного покрытия льдом / безледный период. Скорость изменений сплоченности можно оценить как разность значений сплоченности за некоторый промежуток времени. Это близко к определению скорости изменения сплоченности через коэффициент наклона линейного тренда сплоченности. Более подробно описание МПМ изложено в работах (Шабанов, 2022; Шабанов и Шабанова, 2024). Расчеты БЛП по методу МПМ сравнивались с расчетами по пороговому 15 % методу для получения устойчивых оценок и исключения ошибок при определении характеристик БЛП по данным сплоченности.

В качестве исходных данных дистанционного микроволнового зондирования о сплоченности морского льда был использован массив Центра льда и снега, США, NSIDC G02202, версия 5 (Meier et al., 2024). Пространственное разрешение этого архива составляет 25 км, временное разрешение – 1 сутки. В работе были использованы значения сплоченности из узлов спутниковых данных, ближайших к координатам береговых станций. Расстояния от узлов до станций получились следующие: Амбарчик – 12 км, Айон – 10 км, Валькаркай – 16 км, Рау-Чуа – 12 км и Певек – 27 км.

Скорость изменений характеристик БЛП определялась по коэффициенту наклона линейного тренда. Статистическая значимость изменений проверялась с помощью t-теста Стьюдента. Изменения считались статистически значимыми на отметке 0.05, если не сказано иначе.

Для сравнения временных рядов характеристик БЛП, полученных по прибрежным наблюдениям и спутниковым данным, был применен дисперсионный анализ ANOVA, выполненный с помощью статистической функции “f_oneway” из математического модуля scipy языка программирования python. Различия между выборками считались статистически значимыми также на уровне значимости 0.05.

Результаты

Изменения БЛП в Восточно-Сибирском море по прибрежным ледовым наблюдениям

Для каждой станции в Восточно-Сибирском море (таблица 1) были рассчитаны статистические характеристики безледного периода за период 1997–2023 гг. Результаты расчетов представлены в таблице 2. На рисунках 2–4 показана межгодовая динамика характеристик БЛП для всех пяти станций в Восточно-Сибирском море за период с 1997 по 2023 гг.

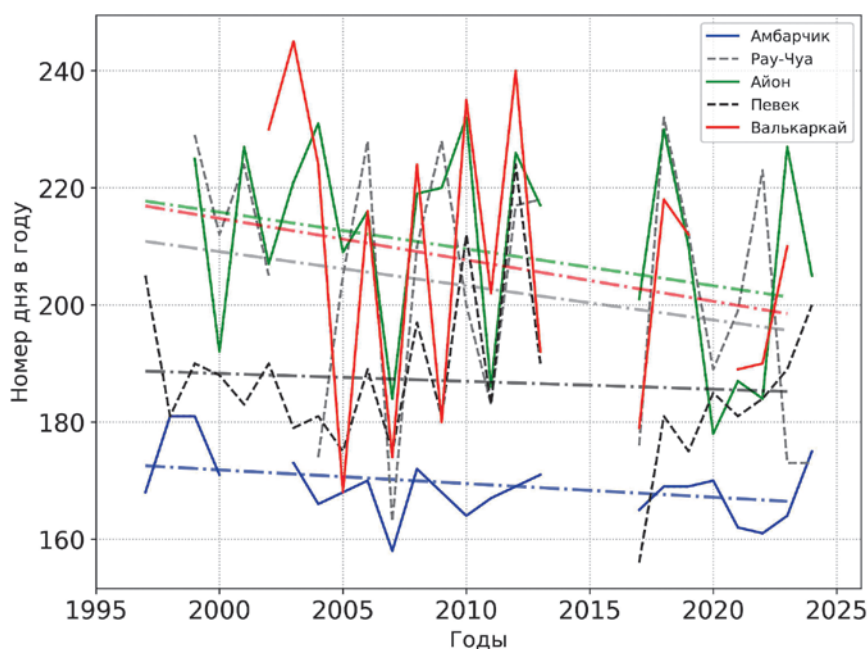


Рис. 2 – Динамика дат начала БЛП за период 1997–2023 гг. на пяти береговых станциях в Восточно-Сибирском море

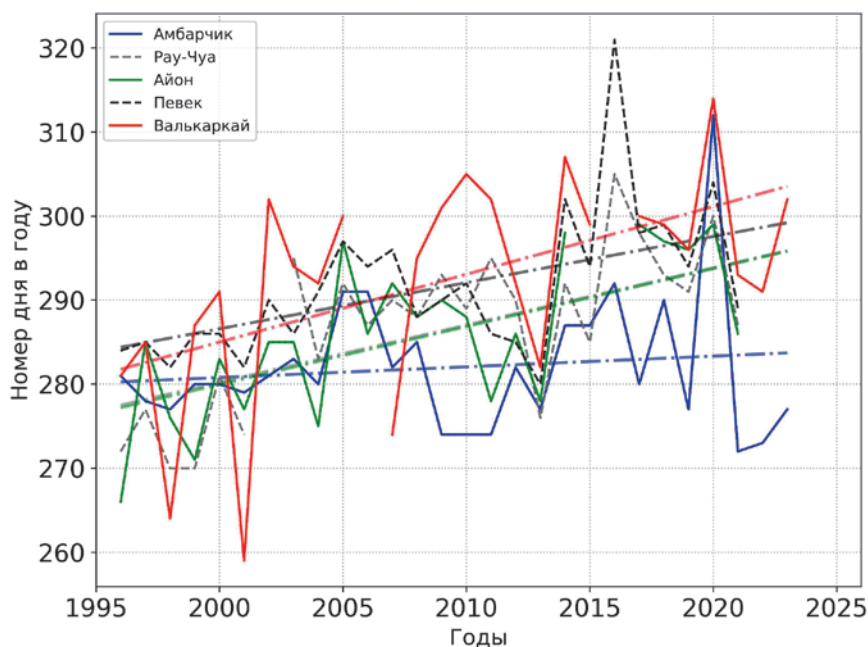


Рис. 3 – Динамика дат окончания БЛП за период 1997–2023 гг. на пяти береговых станциях в Восточно-Сибирском море

Средняя продолжительность БЛП по пяти станциям составила 93 ± 19 сут. Этот результат близок к значению, полученному для побережья Карского моря (Шабанов и Шабанова, 2024). Анализ пространственного распределения показывает, что максимальная продолжительность БЛП характерна для станций, расположенных западнее остальных: «Амбарчик» (113 ± 8 сут) и «Певек» (104 ± 17 сут). Значительно меньшая

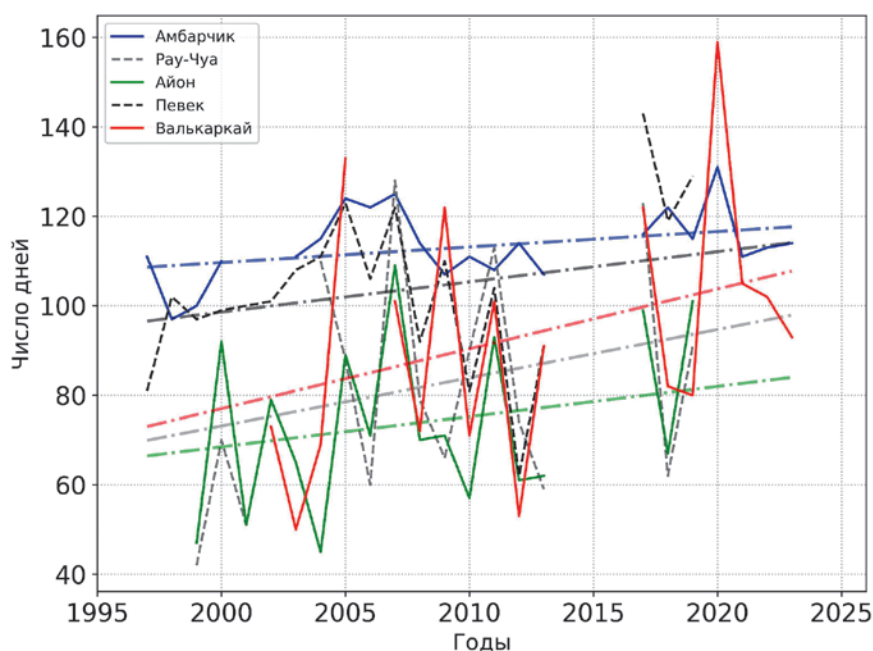


Рис. 4 – Динамика продолжительности БЛП за период 1997–2023 гг. на пяти береговых станциях в Восточно-Сибирском море

продолжительность (менее 90 сут) зафиксирована восточнее – на станциях «Валькаркай» (92 ± 27 сут), «Рау-Чуа» (84 ± 24 сут) и «Айон» (76 ± 19 сут). Стоит отметить, что стандартное отклонение продолжительности БЛП на этих трех станциях составляет более трех недель, что существенно больше, чем на станциях «Певек» и «Амбарчик». Хотя расстояние между станциями «Певек» и «Валькаркай» менее 40 км (таблица 1), разница среднесноголетней продолжительности БЛП составляет почти две недели (таблица 2).

Табл. 2 – Среднесноголетние значения (сут), стандартные отклонения (сут) и скорости изменений (сут/10 лет) характеристик БЛП на береговых станциях Восточно-Сибирского моря за период 1997–2023 гг.: дат начала БЛП (S, номер дня в году), дат окончания БЛП (E, номер дня в году) и продолжительности БЛП (D, сут). Жирным курсивом выделены статистически значимые изменения

	Название	Среднее значение			Станд. отклонение			Изменения		
		S	E	D	S	E	D	S	E	D
1	Валькаркай	207	293	92	23	13	27	–7.1	8.1	13.4
2	Амбарчик	169	282	113	6	8	8	–2.3	1.3	3.5
3	Айон	209	286	74	18	9	19	–6.3	6.9	6.8
4	Рау-Чуа	203	287	84	21	9	24	–5.8	6.8	10.8
5	Певек	187	292	104	13	9	17	–1.3	5.5	6.7

За период 1997–2023 гг. не обнаружено статистически значимого увеличения продолжительности БЛП возле рассмотренных станций в Восточно-Сибирском море (таблица 2). При этом все скорости изменений продолжительности БЛП положительные.

Скорость изменений продолжительности БЛП на станции «Амбарчик» составляет +3 сут/10 лет, на станциях «Айон» и «Певек» оценивается в +7 сут/10 лет, а на станциях «Валькаркай» и «Рау-Чуа» продолжительность БЛП увеличивается со скоростью +11+13 сут/10 лет. На станции «Амбарчик», где за период 1997–2023 гг. наблюдается самая высокая продолжительность БЛП, отмечается самая низкая среди других станций скорость увеличения продолжительности БЛП.

Скорости изменения продолжительности БЛП определяются сочетанием скоростей изменений дат начала и окончания БЛП.

На всех станциях, кроме «Амбарчик», отмечаются статистически значимые положительные изменения дат окончания БЛП (таблица 2). Скорости изменений дат окончания БЛП варьируются от +6 сут/10 лет на станции «Певек» до +8 на остальных станциях. На станции «Амбарчик» отмечается самая низкая положительная статистически незначимая скорость изменения дат окончания БЛП: +1 сут/10 лет. Вероятно, пресный сток р. Колыма в значительной степени обеспечивает постоянство сроков формирования здесь припая, что отражается в незначимых изменениях дат окончания БЛП.

Для дат начала БЛП статистически значимых изменений не обнаружено. При этом все скорости изменений дат начала БЛП отрицательные. Самые медленные изменения дат начала БЛП зафиксированы на станциях «Певек» и «Амбарчик»: –1–2 сут/10 лет. На оставшихся станциях («Рау-Чуа», «Валькаркай» и «Айон») даты начала БЛП смещаются заметно быстрее: –6–7 сут/10 лет. Таким образом, можно сказать, что скорости изменений дат окончания БЛП вносят больший вклад в итоговое изменение продолжительности БЛП на всех пяти рассмотренных станциях.

Изменения БЛП в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря по данным дистанционного зондирования

Архивы данных пассивного микроволнового дистанционного зондирования морей СЛО насчитывают уже более 45 лет наблюдений. Так как сеть данных прибрежных ледовых наблюдений в российской Арктике очень разреженная (Афанасьева и др., 2019), а в морях азиатской части России критически мало станций (Думанская, 2017), то целесообразно сравнить оценки характеристик БЛП, полученных с помощью данных дистанционного зондирования, с наблюдениями в прибрежной зоне. Помимо сравнения среднесезонных и скоростей изменений по разным источникам, в качестве метрик близости данных были использованы стандартные статистические оценки: коэффициент корреляции Пирсона (КК) и среднеквадратическая ошибка (Root mean squared error, RMSE) и F-статистика дисперсионного анализа (ANOVA). Такие статистические меры помогают понять степень согласованности между данными и выявить возможные расхождения в оценках БЛП, что важно для надежного мониторинга ледовых процессов и исследований изменений климата Арктики. Сравнение было проведено между временными рядами наблюдений и временными рядами спутниковых данных отдельно для каждого метода определения БЛП.

Дисперсионный анализ сделан или был подготовлен как для наблюдений и спутниковых данных по выбранному методу, так и для всех трех временных рядов характеристик БЛП одновременно (ANOVA BCE).

Результаты сравнения временных рядов характеристик БЛП (продолжительность, даты начала и окончания БЛП) для пяти береговых станций за совместный период 1997–2023 гг. представлены в таблицах 3–5.

Табл. 3 – Сравнение временных рядов продолжительности БЛП между прибрежными наблюдениями и данными дистанционного зондирования, полученными по пороговому методу (15 %) и МПМ для береговых станций в Восточно-Сибирском море.

КК – коэффициент корреляции Пирсона, RMSE – среднеквадратическая ошибка, ANOVA – F-статистика дисперсионного анализа. Статистически значимые на уровне 0.05 различия выборок по дисперсионному анализу ANOVA выделены жирным курсивом

	Название	RMSE 15 %	RMSE МПМ	ANOVA 15 %	ANOVA МПМ	ANOVA BCE	КК 15 %	КК МПМ
1	Валькаркай	32	35	6	10	6	39	35
2	Амбарчик	28	29	53	46	27	66	66
3	Айон	24	22	1	4	2	32	38
4	Рау-Чуа	31	31	4	6	4	13	20
5	Певек	45	43	29	40	21	35	36

Табл. 4 – Сравнение временных рядов дат начала БЛП между прибрежными наблюдениями и данными дистанционного зондирования, полученными по пороговому методу (15 %) и МПМ для береговых станций в Восточно-Сибирском море. КК – коэффициент корреляции Пирсона, RMSE – среднеквадратическая ошибка, ANOVA – F-статистика дисперсионного анализа. Статистически значимые на уровне 0.05 различия выборок по дисперсионному анализу ANOVA выделены жирным курсивом

	Название	RMSE 15 %	RMSE МПМ	ANOVA 15 %	ANOVA МПМ	ANOVA BCE	КК 15 %	КК МПМ
1	Валькаркай	29	29	2	5	3	0	2
2	Амбарчик	29	28	150	118	77	47	52
3	Айон	23	22	4	7	4	15	24
4	Рау-Чуа	30	29	8	9	6	–20	–7
5	Певек	38	37	46	51	30	1	–2

Анализ статистических характеристик показывает, что оба метода определения характеристик БЛП демонстрируют сопоставимые результаты относительно данных наблюдений (таблицы 3–5), а в случае станций «Айон» и «Певек» RMSE по МПМ ближе к данным наблюдений. В таблице 4 показано, что временные ряды дат начала БЛП, полученные по данным дистанционного зондирования, очень слабо скоррелированы с данными наблюдений за датами начала БЛП. Для станций «Валькаркай» и «Певек» коэффициенты корреляции близки к нулю, а для станции «Рау-Чуа» они отрицательные. Для дат окончания БЛП коэффициенты корреляции положительные,

выше 60 %, и практически не отличаются для обоих методов. Противоречивые оценки коэффициентов корреляции для дат начала БЛП и дат окончания БЛП проявляются в низких положительных коэффициентах для продолжительности БЛП. Только для станции «Амбарчик» коэффициенты корреляции выше 60 %.

Табл. 5 – Сравнение временных рядов дат окончания БЛП между прибрежными наблюдениями и данными дистанционного зондирования, полученными по пороговому методу (15 %) и МПМ для береговых станций в Восточно-Сибирском море.

КК – коэффициент корреляции Пирсона, RMSE – среднеквадратическая ошибка, ANOVA – F-статистика дисперсионного анализа. Статистически значимые на уровне 0.05 различия выборок по дисперсионному анализу ANOVA выделены жирным курсивом

	Название	RMSE 15 %	RMSE МПМ	ANOVA 15 %	ANOVA МПМ	ANOVA BCE	КК 15 %	КК МПМ
1	Валькаркай	12	13	3	6	3	62	60
2	Амбарчик	11	10	0	0	0	24	24
3	Айон	7	7	0	1	0	76	76
4	Рау-Чуа	7	7	1	1	1	75	76
5	Певек	11	9	3	5	3	62	67

Средне многолетняя продолжительность БЛП для пяти станций, полученная с помощью порогового 15 % метода, в целом оказывается ближе к данным наблюдений, чем оценки по МПМ. При этом для каждой станции средняя продолжительность БЛП по данным дистанционного зондирования оказывается систематически короче, чем по данным наблюдений (таблица 6).

Табл. 6 – Расчеты средне многолетней продолжительности БЛП (СР. ЗНАЧ., сут) и скорости ее изменений за 1997–2023 гг. (ИЗМЕНЕНИЯ, сут/10 лет) по данным прибрежных наблюдений (НАБЛ.) и спутниковым данным, полученным пороговым методом (15 %) и МПМ. Жирным курсивом выделены статистически значимые изменения

	Название	СР. ЗНАЧ.			ИЗМЕНЕНИЯ		
		15 %	НАБЛ.	МПМ	15 %	НАБЛ.	МПМ
1	Валькаркай	74	92	68	14.2	13.4	8.2
2	Амбарчик	88	113	87	12.7	3.5	14.3
3	Айон	67	74	62	18.1	6.8	9.3
4	Рау-Чуа	70	84	67	12.8	10.8	12.6
5	Певек	67	104	67	23.6	6.7	19.5

Разница осредненной по всем рассмотренным станциям продолжительности БЛП между спутниковыми данными и прибрежными наблюдениями составляет 20–23 сут. На рисунке 5 показаны различия динамики продолжительности БЛП по данным прибрежных наблюдений и спутниковым данным для станций «Айон», где средне многолетняя продолжительность БЛП менее всего отличается по разным источникам данных, и «Певек», где такое различие наибольшее. На рисунке 6

показана динамики продолжительности БЛП для станций «Рау-Чуа», где скорости изменений продолжительности БЛП по данным прибрежных наблюдений и спутниковым данным оказались наиболее близкими, станции «Амбарчик», где скорости изменений сильно различаются.

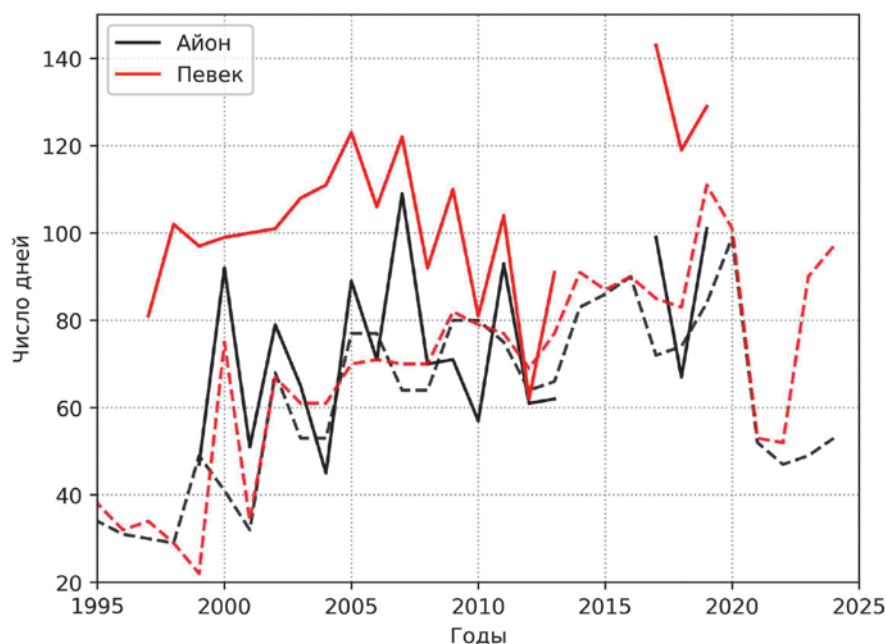


Рис. 5 – Изменения продолжительности БЛП за период 1997–2023 гг. на станциях «Айон» (черный) и «Певек» (красный) по данным прибрежных (непрерывная линия) и спутниковых (пунктирная линия) наблюдений

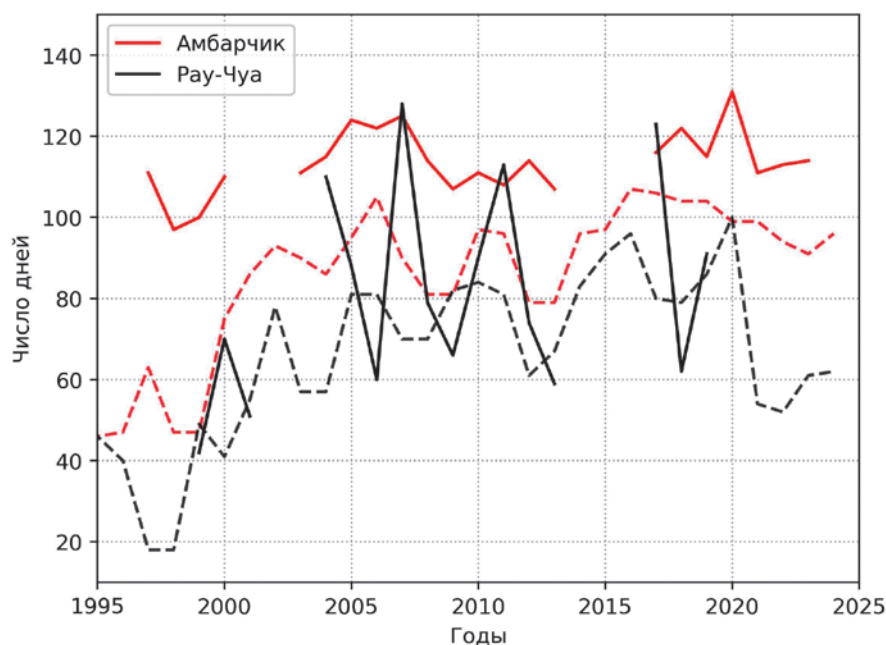


Рис. 6 – Изменения продолжительности БЛП за период 1997–2023 гг. на станциях «Рау-Чуа» (черный) и «Амбарчик» (красный) по данным прибрежных (непрерывная линия) и спутниковых (пунктирная линия) наблюдений

Значимость различий среднемноголетней продолжительности БЛП по наблюдениям и спутниковым данным для береговых станций (таблица 6) подтверждают и результаты дисперсионного анализа (таблицы 3–5). Во-первых, статистически значимые различия средних в рядах продолжительности БЛП обнаружены на всех станциях, кроме «Айон». Во-вторых, временные ряды дат окончания БЛП различаются по наблюдениям и спутниковым данным меньше всего из рассмотренных характеристик БЛП: наиболее точно различия в средних временных рядах дат окончания БЛП обнаружены только для станции «Валькаркай». Для этой же станции не обнаружено статистически значимых различий средних для дат начала БЛП. Статистически значимые различия средних временных рядов дат начала БЛП обнаружены у большинства рассмотренных станций, кроме «Валькаркай». Особенно большие различия временных рядов дат начала БЛП по прибрежным наблюдениям и спутниковым данным отмечаются на станции «Амбарчик» и «Певек», где различия среднемноголетних значений продолжительности БЛП составляют 25 и 37 сут соответственно (таблица 6).

Оценки изменений продолжительности БЛП, полученные, что по МПМ, что по пороговому 15 % методу, значительно отличаются по абсолютной величине и статистической значимости от наблюдений. Для всех пяти станций скорости изменений продолжительности БЛП положительные, по данным наблюдений эти изменения статистически незначимые, по спутниковым данным – статистически значимые. Наиболее близкие к данным наблюдений скорости изменения продолжительности БЛП за период 1997–2023 гг. по спутниковым данным отмечаются на станции «Рау-Чуа».

Для прибрежной зоны восточной части Восточно-Сибирского моря оценки, полученные по данным дистанционного зондирования, слабо воспроизводят изменения продолжительности БЛП, наблюдаемые на береговых станциях.

Обсуждения и выводы

Проведен анализ изменений БЛП в восточной части Восточно-Сибирского моря по данным прибрежных и спутниковых наблюдений на пяти гидрометеорологических станциях за период с 1997 по 2023 гг.

Статистически значимых изменений продолжительности БЛП по данным прибрежных наблюдений не обнаружено ни на одном из рассмотренных участков. При этом все рассчитанные скорости изменений продолжительности БЛП положительные. Положительное изменение продолжительности БЛП происходит благодаря более позднему замерзанию прибрежной акватории, даты окончания БЛП смещаются на более поздние сроки. Такие изменения являются статистически значимыми, они зафиксированы на всех станциях, кроме станции «Амбарчик». Статистически значимых изменений дат начала БЛП на всех пяти станциях не обнаружено. Тем не менее, все рассчитанные скорости изменений дат начала БЛП отрицательные, что свидетельствует о смещении дат начала БЛП на более ранние сроки. Это также влияет

на скорость увеличения общей продолжительности БЛП, но в меньшей степени, чем смещение дат окончания БЛП.

Все рассмотренные станции находятся только в восточной части в Восточно-Сибирском море и расположены сравнительно недалеко друг от друга (наименьшее расстояние между станциями «Певек» и «Валькаркай» – менее 40 км, наибольшее расстояние между станциями «Амбарчик» и «Валькаркай» – 335 км). Тем не менее, здесь отмечается пространственное разнообразие как средних характеристик БЛП, так и темпов их изменений. На станции «Амбарчик», расположенной западнее всего из рассмотренных станций, наблюдается самая высокая продолжительность БЛП и самые низкие скорости ее изменений. А на станциях «Айон» и «Певек» скорость изменений продолжительности БЛП оценивается в $+6.7+6.8$ сут/10 лет, но при этом среднемноголетняя продолжительность БЛП отличается на месяц. Станция «Амбарчик» расположена в дельте реки Колыма (рисунок 1), что существенно влияет на продолжительность БЛП, в первую очередь на даты очищения. За счет более раннего очищения нижнего течения р. Колыма, на станции «Амбарчик» БЛП начинается в среднемноголетнем плане на второй декаде июня, тогда как на других станциях – уже в июле.

Также стоит отметить, что несмотря на достаточно длинный ряд доступных наблюдений для климатического анализа 1996–2023 гг., то есть почти 30 лет, во временных рядах встречаются пропуски как для дат начала, так и для дат окончания БЛП. В итоге это сократило длину рядов продолжительности БЛП от максимально возможной для разных станций от 15 % до 25 %. Особенно много пропусков приходится на период 2014–2016 гг. Это ограничивало возможность анализа наблюдаемых изменений БЛП за непрерывный совместный период. Неравномерное расположение, скученность станций наблюдений вокруг Чаунской губы, пропуски в данных – все это препятствует обстоятельному описанию изменений безледного периода в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря в современный климатический период на основе данных прибрежных наблюдений. Решением данного затруднения стало дополнительное использование спутниковых данных.

Проведенное по данным микроволнового пассивного дистанционного зондирования исследование БЛП показало систематическое преуменьшение средней продолжительности БЛП и завышение скоростей изменений продолжительности БЛП в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря, по сравнению с результатами наблюдений. Дисперсионный анализ показал значимые различия средних временных рядов продолжительности БЛП на большинстве станций. Перекрестный анализ изменений БЛП позволяет уверенно говорить лишь о том, что безледный период в восточной части Восточно-Сибирского моря в течение первой четверти XXI века стал заканчиваться позже. Что свидетельствует о более поздних сроках формирования здесь ледяного покрова и увеличении осенью периода, когда прибрежная зона Восточно-Сибирского моря свободна ото льда.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников Лаборатории долгосрочных ледовых прогнозов, отдела ледового режима и прогнозов ААНИИ за предоставление

актуальных данных наблюдений о сроках наступления ледовых явлений на полярных станциях Восточно-Сибирского моря.

Сбор, актуализация и первичная обработка архивов данных прибрежных ледовых наблюдений в Восточно-Сибирском море проведены в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0017).

Анализ изменений за период 1997–2023 гг. характеристик безледного периода в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря по данным прибрежных наблюдений и их сравнение с данными дистанционного зондирования получены за счет гранта Российского научного фонда (№ 23-77-30001, <https://rscf.ru/project/23-77-30001/>).

Список литературы

1. *Афанасьева Е. В., Алексеева Т. А., Соколова Ю. В. и др.* Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20. EDN: YIIBNO. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071>
2. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 637 с. ISBN 978-5-9908623-6-4. https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_011611064
3. *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 году // Океанология. 2022. Т. 62. № 6. С. 845–856. EDN: JSYWNE. <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>
4. *Матишов Г. Г., Чикин А. Л., Дашкевич Л. В. и др.* Ледовый режим Азовского моря и климат в начале XXI века // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 5. С. 603–607. ISSN 0869-5652. EDN: SHLRWT. <https://doi.org/10.7868/S0869565214230200>
5. *Мохов И. И., Хон В. Ч.* Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. 2015. Т. 2. №. 18. С. 88–95. EDN: UCWIHP
6. *Мысленков С. А.* Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. №. 1. С. 87–101. EDN: QFQQPU. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-87-101>
7. *Мысленков С. А.* Анализ высоты ветровых волн и продолжительности безледного периода вдоль Северного морского пути с 1979 по 2021 гг. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. №. 2. С. 134–145. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.11>
8. *Огородов С. А., Шабанова Н. Н., Кессель А. С. и др.* Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. №. 1. С. 26–42. EDN: YGOZAI. <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/962>
9. *Семенов В. А., Черенкова Е. А.* Оценки возможных изменений периода открытой воды в исключительной экономической зоне России в Арктике в XXI веке // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2025. Т. 520. №. 2. С. 325–332. EDN: GCPFWV. <https://doi.org/10.31857/S2686739725020173>
10. *Тихонов В. В., Раев М. Д., Шарков Е. А. и др.* Спутниковая микроволновая радиометрия морского льда полярных регионов. Обзор // Исследования Земли из космоса. 2016. № 4. С. 65–84. EDN: WFALJR. <https://doi.org/10.7868/S0205961416040072>

11. *Третьяков В. Ю., Фролов С. В., Сарафанов М. И.* Изменения ледовых условий плавания по маршруту Обская губа – Берингов пролив за 1998–2018 годы // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12. №. 3. С. 65–75. EDN: HXKNKU. <https://doi.org/10.7868/S2073667319030080>
12. *Шабанов П. А.* Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 4. С. 518–531. EDN: YCMXRF. <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>
13. *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. EDN: GDBVLQ. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.1.31860>.
14. *Шабанов П. А.* Продолжительность безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по данным спутниковых наблюдений: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук: специальность 1.6.17 «Океанология» / Шабанов Павел Александрович. Москва, 2024. 24 с. <https://disser.ocean.ru/index.php/dissertatsii/file/1897-avtoreferat-dissertatsii-shabanov.html> (дата обращения: 11.08.2025).
15. *Шабанов П. А., Шабанова Н. Н.* Изменения продолжительности безледного периода по данным береговых наблюдений в Карском море // *Океанологические исследования*. 2024. Т. 52. № 3. С. 57–76. EDN: SXORCD. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(3\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(3).4)
16. *Шалина Е. В.* Изменение ледовитости Северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 4. С. 67–78. EDN: UDEYSF. <https://doi.org/10.7868/S0205961415040090>
17. *Шалина Е. В.* Региональные особенности изменения ледовой обстановки в морях российской Арктики и на трассе Северного морского пути по данным спутниковых наблюдений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 5. С. 201–213. EDN: ULPFVN. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-201-213>
18. *Юлин А. В., Шаратунова М. В., Павлова Е. А. и др.* Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018. Т. 64. № 3. С. 229–240. EDN: YQINOX. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240>
19. *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>
20. *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. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb84>
21. *Cavalieri D. J., Parkinson C. L.* Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010 // *The Cryosphere*. 2012. Vol. 6. No. 4. P. 881–889. <https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012>
22. *Comiso J. C.* Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1986. Vol. 91. No. C1. P. 975–994. <https://doi.org/10.1029/jc091ic01p00975>
23. *Comiso J. C., Meier W. N., Gersten R.* Variability and trends in the Arctic sea ice cover: Results from different techniques // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2017. Vol. 122. No. 8. P. 6883–6900. <https://doi.org/10.1002/2017jc012768>
24. *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. <https://doi.org/10.1029/2009gl013761>
25. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2021 – The Physical science basis: Working Group I Contribution to the sixth assessment report of the

- intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
26. 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>
 27. Ivanov V. Arctic sea ice loss enhances the Oceanic contribution to climate change // Atmosphere. 2023. Vol. 14. No. 2. P. 409–419. EDN: DMHCJJ. <https://doi.org/10.3390/atmos14020409>
 28. 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>
 29. 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>
 30. Meier W., Fetterer F., Windnagel A. et al. NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration, Version 5. (G02202). Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. 2024. <https://doi.org/10.7265/rjzb-pf78> (дата обращения: 04.03.2025).
 31. Nielsen D. M., Dobrynin M., Baehr J. et al. Coastal erosion variability at the Southern Laptev Sea linked to winter sea ice and the Arctic oscillation // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. No. 5. P. e2019GL086876. <https://doi.org/10.1029/2019GL086876>
 32. 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. EDN: YHDXLB. https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_04
 33. Ogorodov S., Aleksyutina 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>
 34. O’Neil B. et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geosci. Model Dev. 2016. Vol. 9. P. 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-84>
 35. 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. P. 1–6. <https://doi.org/10.1029/2011GL048681>
 36. 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 Sensing. 2018. Vol. 10 (9). P. 1328–1353. <https://doi.org/10.3390/rs10091328>
 37. Shabanov P., Shabanova N. Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone // Russ. J. Earth. Sci. 2020. Vol. 20. ES6016. EDN: SMHUMB. <https://doi.org/10.2205/2020ES000725>
 38. Shabanov P., Osadchiv A., Shabanova N. et al. Decline in ice coverage and ice-free period extension in the Kara and Laptev Seas during 1979–2022 // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. No. 11. P. 1875–1890. <https://doi.org/10.3390/rs16111875>

Статья поступила в редакцию 07.07.2025, одобрена к печати 20.10.2025.

Для цитирования: Шабанов П. А. Продолжительность безледного периода в Восточно-Сибирском море по данным прибрежных и спутниковых наблюдений // Океанологические исследования. 2025. Т. 53. № 4. С. 76–97. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).5](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).5)

ICE-FREE PERIOD IN THE EAST SIBERIAN SEA ACCORDING TO COASTAL AND REMOTE SENSING OBSERVATIONS

P. A. Shabanov

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,
e-mail: pa.shabanov@ocean.ru*

Based on ice events observations and remote sensing data at 5 coastal stations in the East Siberian Sea, the long-term means and trends were calculated for start dates, end dates and duration of ice-free period (IFP) for the period 1997–2023. These values were compared with the calculations based on remote passive microwave sensing data. No statistically significant changes in IFP duration were found at any of the 5 stations. However, 4 of the 5 stations showed statistically significant shifts in end dates to a later time, while there were no significant changes in start dates.

It has been shown that the calculations of the long-term means and trends for the start and end IFP dates and IFP duration, using the 15 % threshold method and modified threshold method, show similar results, agree with each other and significantly differ from coastal observation data for the East Siberian Sea coastal zone. The long-term means of IFP duration are consistently underestimated according to remote sensing data. The calculated from remote sensing data IFP duration trends show statistically significant increase for 1997–2023 period at 4 out of 5 stations.

Keywords: ice-free period, climate change, sea ice, East Siberian Sea, coastal observations, coastal zone, sea ice concentration, passive microwave remote sensing

Acknowledgement: The author thanks the staff of the Laboratory of Long-Term Ice Forecasts, the Department of Ice Regime and Forecasts of the Arctic and Antarctic Research Institute for providing up-to-date observation data on the timing of the onset of ice phenomena at polar stations in the East Siberian Sea.

The collection, updating and primary processing of coastal observation data for the East Siberian Sea were carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for IO RAS (theme No. FMWE-2024-0017).

Analysis of IFP characteristics changes by coastal observations and its comparison with the results from remote sensing data for the coastal zone of the East Siberian Sea for 1997–2023 period were obtained within the RSF grant (No. 23-77-30001, <https://rscf.ru/project/23-77-30001/>).

References

1. Afanasyeva, E. V., T. A. Alekseeva, and Yu. V. Sokolova et al., 2019: Methods of drawing up ice maps of AARI. *Russian Arctic*, **7**, 5–20, EDN: YIIBNO, <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071>
2. 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>
3. 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, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb84>
4. Cavalieri, D. J. and C. L. Parkinson, 2012: Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*, **6** (4), 881–889, <https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012>
5. Comiso, J. C., 1986: Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **91** (C1), 975–994, <https://doi.org/10.1029/jc091ic01p00975>
6. Comiso, J. C., W. N. Meier, and R. Gersten, 2017: Variability and trends in the Arctic sea ice cover: Results from different techniques. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **122** (8), 6883–6900, <https://doi.org/10.1002/2017jc012768>
7. Dumanskaya, I. O., 2017: *Ice conditions in the seas of the Asian Part of Russia*; IG SOTsIN: Obninsk, 633–637, ISBN 978-5-9908623-6-4, https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_011611064
8. 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, <https://doi.org/10.1029/2009gl013768>
9. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Climate change 2021 – The Physical science basis: Working Group I Contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
10. 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>
11. Ivanov, V. V., 2023: Arctic sea ice loss enhances the Oceanic contribution to climate change. *Atmosphere*, **14** (2), 409–419, EDN: DMHCIJ, <https://doi.org/10.3390/atmos14020409>
12. 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>
13. 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>
14. 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, EDN: JSYWNE, <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>
15. Matishov, G. G., A. L. Chikin, and L. V. Dashkevich et al., 2014: The ice regime of the sea of Azov and climate in the early 21st century. *Doklady Earth Sciences*, **457**, 1020–1024, EDN: SHLRWT, <https://doi.org/10.7868/S0869565214230200>
16. Meier, W., F. Fetterer, and A. Windnagel et al., 2024: NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration, Version 5. (G02202). Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center, <https://doi.org/10.7265/rjzb-pf78> (date accessed: 04.03.2025).

17. Mokhov, I. and V. Khon, 2015: The duration of the navigation period and changes for the Northern Sea Route: model estimates. *Arctic: Ecology and Economy*, **18** (2), 88–95, EDN: UCWIHP
18. Myslenkov, S. A., 2023: Modeling of the wind waves in the Laptev, East Siberian and Chukchi seas. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, **1**, 87–101, ISSN: 2618-9631, EDN: QFQQPU, <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-1-87-101>
19. Myslenkov, S. A., 2024: Analysis of the wind waves height and the duration of ice-free period along the Northern Sea Route from 1979 to 2021. *Lomonosov Geography Journal*, **79** (2), 134–145, ISSN 0579-9414 (Print), <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.11>
20. Nielsen, D. M., M. Dobrynin, and J. Baehr et al., 2020: Coastal erosion variability at the Southern Laptev Sea linked to winter sea ice and the Arctic oscillation. *Geophysical Research Letters*, **47** (5), e2019GL086876, <https://doi.org/10.1029/2019GL086876>
21. 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, EDN: YHDXLB, https://doi.org/10.15356/2071-9388_03v09_2016_04
22. 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>
23. Ogorodov, S. A., N. N. Shabanova, and A. S. Kessel et al., 2022: Changes of hydrometeorological potential of thermoabrasion on the Russian Arctic coasts. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, **1**, 26–42, EDN: YGOZAI, <https://vestnik5.geogr.msu.ru/jour/article/view/962>
24. O’Neil, B. et al., 2016: The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev*, **9**, 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-84>
25. 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), 1–6, <https://doi.org/10.1029/2011GL048681>
26. 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 Sensing*, **10** (9), 1328–1353, <https://doi.org/10.3390/rs10091328>
27. Semenov, V. A. and E. A. Cherenkova, 2025: Estimates of possible changes in the open-water period in the Russian exclusive economic zone in the Arctic in the 21st century. *Doklady Earth Sciences*, **520** (2), 325–332, EDN: GCPFWV, <https://doi.org/10.1134/S1028334X24604164>
28. 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, EDN: GDBVLQ, <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.1.31860>
29. Shabanov, P. A. and N. N. Shabanova, 2020: Ice-free period detection method in the Arctic coastal zone. *Russ. J. Earth. Sci.*, **20**, ES6016, EDN: SMHUMB, <https://doi.org/10.2205/2020ES000725>
30. 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, EDN: SXORCD, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(3\).4](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(3).4)
31. 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, EDN: YCMXRF, <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>
32. Shabanov, P. A., A. A. Osadchiv, N. N. Shabanova, and S. A. Ogorodov, 2024: Decline in Ice coverage and ice-free period extension in the Kara and Laptev Seas during 1979–2022. *Remote Sensing*, **16** (11), 1875–1890, <https://doi.org/10.3390/rs16111875>
33. Shabanov, P. A., 2024: *The duration of the ice-free period in the coastal zone of the Kara Sea according to remote sensing: abstract of the thesis for the degree of candidate of geographical Sciences: specialty 1.6.17 “Oceanology”*. Shabanov Pavel Alexandrovich. Moscow, <https://disser.ocean.ru/index.php/dissertatsii/file/1897-avtoreferat-dissertatsii-shabanov.html> (date of request: 08/11/2025).

34. Shalina, E. V., 2015: Ice retreat in the seas of the Russian Arctic and increased availability of the Northern Sea route from satellite passive microwave observations. *Earth Observation from Space*, 4, 67–78, EDN: UDEYSF, <https://doi.org/10.7868/S0205961415040090>
35. Shalina, E. V., 2021: Regional variability of sea ice in the Russian Arctic and on the Northern Sea Route observed from satellites. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Iz Kosmosa*, 18 (5), 201–213, EDN: ULPFVN, <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-201-213>
36. Tikhonov, V. V., M. D. Raev, and E. A. Sharkov et al., 2016: Satellite microwave radiometry of sea ice of Polar Regions. Review. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 4, 65–84, EDN: WFALJR, <https://doi.org/10.7868/S0205961416040072>
37. Tretyakov, V. Yu., S. V. Frolov, and M. I. Sarafanov, 2019: Climatic changes of ice navigation conditions along Ob Bay – the Bering Strait route. *Fundamental and Applied Hydrophysics*, 12 (3), 65–75, EDN: HXKNKU, <https://doi.org/10.7868/S2073667319030080>
38. Yulin, A. V., M. V. Sharatunova, and E. A. Pavlova et al., 2018: Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian Sea. *Arctic and Antarctic Research*, 64 (3), 229–240, EDN: YQINOX, <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240>

Submitted 07.07.2025, accepted 20.10.2025.

For citation: Shabanov, P. A., 2025: Ice-free period in the East Siberian Sea according to coastal and remote sensing observations. *Journal of Oceanological Research*, 53 (4), 76–97, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(4\).5](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(4).5)

根据沿海和卫星观测·东西伯利亚海无冰期的持续时间

P. A. Shabanov

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 邮编: 117997, Russia,
电子邮件: pa.shabanov@ocean.ru*

基于1997至2023年间东西伯利亚海的沿岸冰情观测与卫星遥感数据·本研究分析了无冰期 的持续时间。针对5个水文气象站所对应的沿岸水域·评估了无冰期特征的变化·包括其开始日期、结束日期及总持续时间。计算了1997–2023年间无冰期年平均特征的统计数据·结果显示出了显著的空间异质性。除分析沿海海冰覆盖的气候变化外·本研究还采用了被动微波卫星遥感数据。

分析表明·在1997–2023年期间·基于观测数据未能发现无冰期开始日期和持续时间的统计显著变化趋势。然而·在80%的站点中·无冰期结束日期呈现出统计显著的提前趋势。需要指出的是·基于沿岸观测得出的关于无冰期变化的结论·在利用卫星数据对其变化性质和年均值进行验证时·仅得到了部分证实。

关键词: 无冰期·气候变化·海冰·东西伯利亚海·沿岸观测·北极·海冰密集度·遥感

致谢: 作者感谢长期冰情预报实验室、冰情监测与预报部的同事们·以及AARI (北极与南极研究所) 的工作人员·他们提供了关于东西伯利亚海极地站点冰情事件发生时间的最新观测数据。沿岸冰情观测数据的收集、更新与初步处理工作·是在俄罗斯科学院教育与科学部为希尔绍夫海洋研究所 (IO RAS) 设定的国家任务框架下完成的 (项目号: FMWE-2024-0017)。

基于沿岸观测结果及其与遥感数据的对比·对1997-2023年期间东西伯利亚海沿岸带无冰期特征变化的分析·由俄罗斯科学基金会资助 (项目号: 23-77-30001, <https://rscf.ru/project/23-77-30001/>)。