

ОСОБЕННОСТИ МЕЖГОДОВОЙ И ВНУТРИСЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЛЕДОВИТОСТИ ОХОТСКОГО МОРЯ ЗА ПЕРИОД 1979–2024 гг.

В. А. Романюк¹, И. В. Шумилов², В. М. Пищальник^{1,2}, И. В. Никулина²

¹ ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет»,
Россия, 693008, Южно-Сахалинск, Коммунистический проспект, д. 33,
e-mail: varomanyuk2020@gmail.com;

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН,
Россия, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1Б,
e-mail: ilyarolevik1@yandex.ru

В настоящей работе представлены результаты исследования межгодовой и внутрисезонной изменчивости ледовитости Охотского моря за период 1979–2024 гг. Исследование основано на пентадных картах ледяного покрова Японского метеорологического агентства, обработанных в программном комплексе Ice Data Processing. Ледовитость рассчитывалась как доля площади моря, занятой льдом, с приведением к климатической норме 1991–2020 гг. По временным рядам сезонной средней (декабрь–май) и сезонной максимальной ледовитости выполнены корреляционный и регрессионный анализы, а также спектральная оценка характерных масштабов изменчивости. Для внутрисезонной динамики рассчитаны пентадные скорости изменения ледовитости и определены сроки переходов между фазами ледового сезона. Показано статистически значимое сокращение сезонной средней ледовитости на 16 % за 45-летний период (–3.5 % за 10 лет) и более интенсивное уменьшение сезонных максимумов (–4.0 % за 10 лет) при высокой согласованности показателей ($r = 0.89$). Выделены периоды повышенной ледовитости в 1979–2004 гг. (44.4 %) и пониженной в 2005–2024 гг. (34.8 %), а также квазипериодические колебания на межгодовых масштабах порядка 3–7 лет и низкочастотная компонента порядка 15–23 лет. Внутрисезонный анализ выявил ослабление ледообразования в начале зимы (снижение средней скорости роста ледовитости в декабре–январе с 4.3 % до 3.7 % за пентаду), смещение и уменьшение пиковых скоростей прироста (5.8 % – 5.2 % за пентаду) и сдвиг перехода к фазе разрушения льда примерно на 10 дней к более ранним срокам (с 15–20 марта на 5–10 марта), сопровождаемый снижением амплитуды экстремальных скоростей разрушения.

Ключевые слова: Охотское море, протяженность морского льда, морской лед, дистанционное зондирование, спутниковые данные, изменчивость климата, сезонный цикл, тренд, спектральный анализ

Введение

Морской лед является индикатором климатических изменений, поскольку его структура и динамика напрямую зависят от колебаний температуры в атмосфере и океане. Любые изменения термического режима, особенно в условиях современного потепления, достаточно быстро отражаются на площади и толщине льда,

а характеристики ледовитости становятся информативным параметром для оценки климатической изменчивости и ее последствий (Comiso, 2003; Serreze, Barry, 2011). Для Охотского моря это особенно актуально из-за высокой сезонной контрастности и значительной межгодовой изменчивости ледяного покрова, определяющих как средние условия ледового сезона, так и вероятность экстремальных состояний.

Согласно оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC, 2023), глобальная температура к 2023 г. возросла примерно на 1.17 °C относительно доиндустриального уровня 1850–1900 гг., при этом в высоких широтах потепление проявляется сильнее (IPCC, 2023). В таких условиях изменения ледового режима становятся одним из наиболее чувствительных индикаторов климатической системы, а анализ многолетних рядов ледовитости позволяет выделять как направленные тенденции, так и квазипериодические колебания, связанные с крупномасштабной атмосферно-океанической циркуляцией (Parkinson, Cavalieri, 2008; Sun et al., 2023).

Начиная с 1979 г., спутниковые наблюдения обеспечивают однородную и непрерывную информацию о площади ледяного покрова, что создает основу для сопоставимого анализа межгодовой изменчивости и внутрисезонной динамики ледовитости (Parkinson et al., 1987; Drinkwater et al., 1995; Kwok, Cunningham, 2015). Для Охотского моря ранее были получены важные результаты, включая районирование ледяного покрова и оценку аномалий ледовитости относительно климатических норм, а также выявление изменений сезонного хода (Минервин и др., 2015; Романюк и др., 2022). Настоящее исследование развивает эти направления на базе пентадных данных за 1979–2024 гг., что позволяет детально охарактеризовать межгодовую и внутрисезонную изменчивость ледовитости, сопоставить динамику сезонных средних и максимальных значений и оценить перестройку сезонного цикла по скоростям изменения ледовитости.

Материал и методы исследования

В качестве исходного материала использованы пентадные (5-дневные) карты-схемы ледяного покрова, публикуемые Японским метеорологическим агентством (JMA). Для периода 1979–2024 гг. по каждой пентаде рассчитывалась площадь, занятая льдом в пределах Охотского моря, после чего полученная ледовитость выражалась в процентах как отношение площади льда к площади акватории моря. Обработка карт и расчет площадей выполнялись с применением программного комплекса Ice Data Processing (Шумилов и др., 2023).

Границы исследуемой акватории задавались по официальному описанию границ морей (Границы океанов и морей, 2000). Для сопоставимости межгодовых колебаний рассчитывались аномалии ледовитости относительно климатической нормы 1991–2020 гг. Выбор 1991–2020 гг. обусловлен тем, что 30-летние климатические нормы являются стандартом для сопоставимых климатологических оценок; использование

периода 1991–2024 гг. привело бы к включению части анализируемых лет в базу и снижало бы интерпретируемость аномалий. В качестве сезонных характеристик использованы: (1) средняя сезонная ледовитость, определяемая осреднением пентадных значений за ледовый сезон (с декабря по май), и (2) сезонная максимальная ледовитость, соответствующая наибольшему пентадному значению в пределах сезона.

Оценка межгодовой изменчивости включала корреляционный анализ между сезонной средней и сезонной максимальной ледовитостью, а также линейный регрессионный анализ для выявления и количественной оценки трендов за 1979–2024 гг. Для выделения характерных временных масштабов изменчивости применялся спектральный анализ временного ряда сезонной средней ледовитости. Спектр оценивался методом быстрого преобразования Фурье с использованием оконной функции (для уменьшения утечки спектра). Частотное разрешение при годовой дискретизации определяется длительностью ряда $T = 46$ лет ($\Delta f = 1/T$), поэтому для оценок периода P характерную неопределенность положения пика можно оценить как $\Delta P \approx P^2/T$ (например, $\sim \pm 0.1$ года при $P = 2.2$ года и $\sim \pm 11.5$ лет при $P = 23$ года).

Внутрисезонная изменчивость анализировалась по среднему сезонному ходу ледовитости и по пентадной скорости ее изменения. Скорость изменения определялась как разность ледовитости между соседними пентадами и интерпретировалась как интенсивность нарастания (положительные значения) или разрушения ледяного покрова (отрицательные значения). Для выявления перестроек сезонного цикла дополнительно сравнивались усредненные характеристики для двух интервалов с контрастной ледовитостью – 1979–2004 гг. и 2005–2024 гг.

Результаты исследования

Для анализа межгодовой изменчивости ледовитости Охотского моря могут применяться различные подходы, что связано с выраженной сезонностью данного региона. Некоторые исследователи проводят анализ средних значений ледовитости за сезон, тогда как другие предпочитают изучать максимальные значения (Минервин и др., 2015; Романюк и др., 2022). Оба подхода имеют свои преимущества и предоставляют важную информацию о характере изменчивости ледяного покрова. В работе для более полного и наглядного анализа многолетней изменчивости выполнено исследование как средней, так и максимальной ледовитости за сезон. Такой комплексный подход позволяет учесть как общие тенденции изменений, так и экстремальные значения, что дает более полное представление об изменчивости ледовитости Охотского моря.

Проведенный анализ выявил существенные различия в характере изменчивости двух рассматриваемых параметров ледовитости. Ряд средних значений демонстрирует размах 34.6 % с колебаниями от абсолютного минимума – 25.9 %, зарегистрированного в 2022 г., до максимума – 60.5 %, наблюдавшегося в 1979 г. (рисунок 1). Стандартное отклонение данного ряда составляет 8.7 %, что указывает на значительную

межгодовую изменчивость данного параметра. В отличие от этого, ряд максимальных значений характеризуется значительно большим размахом значений ледовитости – 51.8 % (от 43.4 % в 2015 г. до 95.2 % в 2001 г.) и большим стандартным отклонением (11.3 %). Такие различия свидетельствуют о более высокой чувствительности экстремальных показателей ледовитости к кратковременным атмосферным процессам.

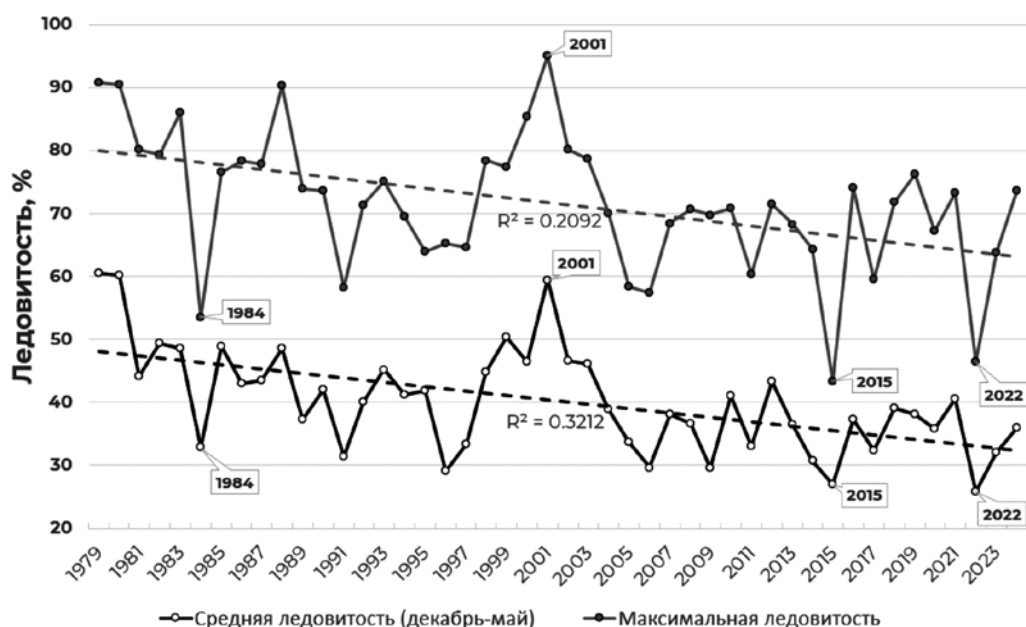


Рис. 1 – Межгодовая изменчивость средней и максимальной ледовитости Охотского моря за период 1979–2024 гг.

Коэффициент корреляции между рядами средних и максимальных значений составляет 0.89, что указывает на очень сильную положительную взаимосвязь и свидетельствует о том, что изменения средних и максимальных значений ледовитости происходят согласованно и обусловлены общими факторами. Годы с высокой средней ледовитостью статистически достоверно характеризуются и высокими максимальными значениями, и наоборот. Эта тесная взаимосвязь подтверждает общность основных механизмов, определяющих оба параметра ледовитости, хотя и с различной степенью интенсивности их проявления.

Регрессионный анализ выявил статистически значимые отрицательные тренды для обоих параметров. Установлено, что средняя ледовитость уменьшалась со скоростью 3.5 % за 10 лет, в то время как максимальная ледовитость демонстрировала более высокую скорость снижения – 4.0 % за 10 лет. При этом линейный тренд объясняет 32 % дисперсии средних значений и несколько меньшую долю дисперсии максимальных значений (около 25 %), что подтверждает значительную естественную изменчивость экстремальных показателей и их более сложную зависимость от внешних факторов. За весь исследуемый период средняя за сезон ледовитость Охотского моря сократилась на 16 % (рисунок 2).

Выявленные различия в динамике двух рядов могут быть объяснены различными физическими механизмами, определяющими их формирование. Средние значения

ледовитости в большей степени отражают кумулятивный эффект термических условий всего холодного сезона и интегральное воздействие таких факторов как средняя температура воздуха, сумма градусодней мороза, теплосодержание водных масс. В отличие от этого, максимальные значения более чувствительны к краткосрочным атмосферным процессам – экстремальным похолоданиям, особенностям синоптической обстановки, интенсивности и продолжительности зимних муссонов.

Экстремальная ледовитость в ледовый сезон 2000/01 гг. (сезонный максимум 95.2 % – наибольшее значение за 1979–2024 гг.), по данным Глебовой (2007), была связана с конфигурацией барических центров над Северной Пацификой: положение Алеутского минимума сместилось к северо-востоку, а Сибирский максимум сформировал выраженный северо-восточный «отрог». Такая схема усиливает горизонтальные градиенты давления и, как следствие, способствует более интенсивной адвекции холодного континентального воздуха, что создает благоприятные термические условия для быстрого нарастания льда. Напротив, аномально малоледовитые ледовые сезоны (например, 2014/15 гг., минимум сезонного максимума пришелся на 2015 г.) могли формироваться при усилении переносов более теплого воздуха и повышении теплового содержания поверхностного слоя, что ограничивает образование льда и ускоряет его разрушение (Глебова, 2007) (рисунок 2).

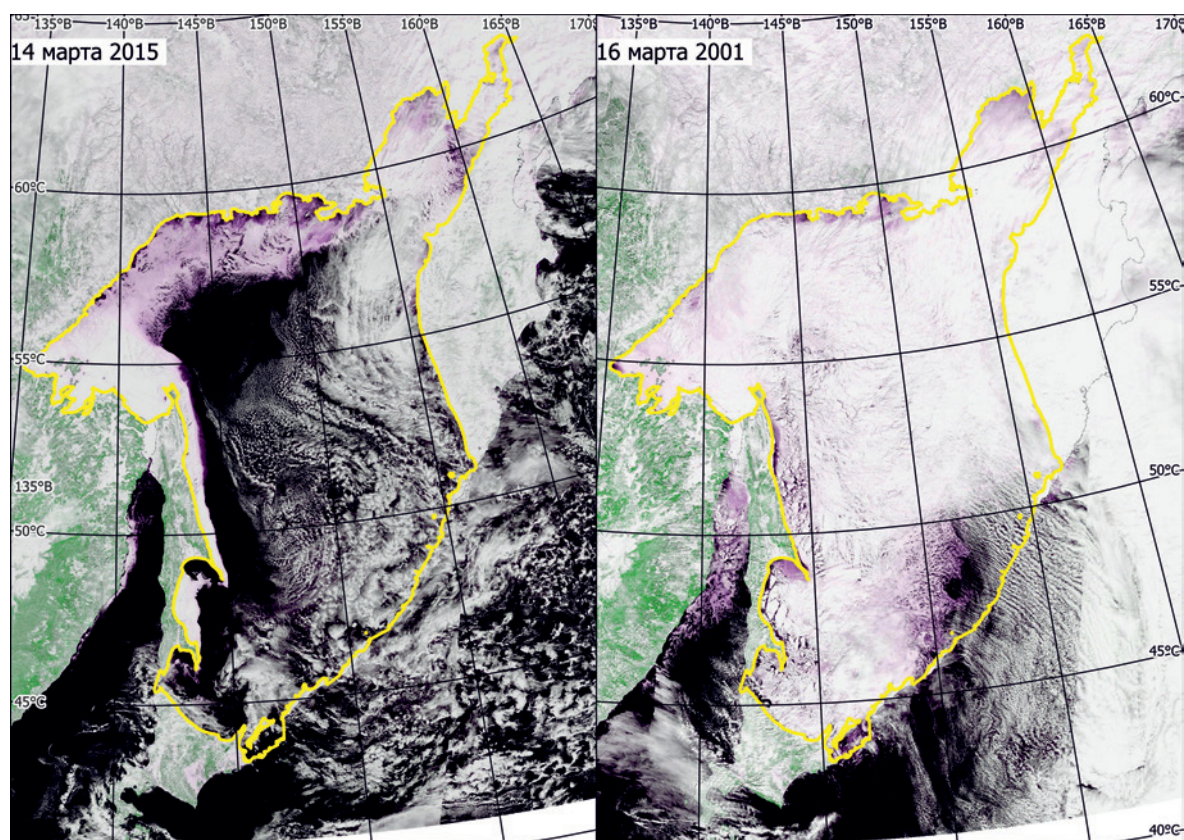


Рис. 2 – Спутниковые снимки ледяного покрова с минимальным (слева) и максимальным (справа) развитием ледовитости в Охотском море; желтая линия – граница Охотского моря (Границы океанов и морей, 2000).

Спектральный анализ ряда сезонной средней ледовитости за 1979–2024 гг. выявил квазипериодические компоненты на межгодовых масштабах порядка 3–7 лет и низкочастотные вариации порядка 15–23 лет. Компоненты 3–7 лет укладываются в типичный диапазон межгодовой изменчивости, часто обсуждаемой для крупномасштабных режимов циркуляции, а низкочастотная компонента относится к вариациям в системе атмосфера–океан Северной Пацифики. Интерпретация выявленных периодов требует отдельной проверки через сопоставление с индексами циркуляции и оценку статистической значимости пиков спектра.

Учитывая значительные колебания и устойчивый отрицательный тренд ледовитости Охотского моря, для дальнейшего анализа были рассчитаны аномалии ледовитости относительно современной климатической нормы за период 1991–2020 гг. Графический анализ распределения аномалий показал, что в период с 1979 по 2004 гг. наблюдалось устойчивое преобладание положительных аномалий, в то время как с 2005 по 2024 гг. начали преобладать отрицательные аномалии (рисунок 3). Таким образом, выделены два периода: 1) повышенной ледовитости (1979–2004 гг.); 2) пониженной ледовитости (2005–2024 гг.).



Рис. 3 – Межгодовое распределение средней за сезон ледовитости и ее аномалий относительно периода 1991–2020 гг. Пунктирные горизонтальные линии – средние значения для периода повышенной ледовитости (1979–2004 гг.) и периода пониженной ледовитости (2005–2024 гг.). Сплошные линии – линейные тренды для выделенных периодов

В период 1979–2004 гг. среднее значение ледовитости составило 44.4 %, что на 5.8 % выше современной климатической нормы. Для этого периода характерен отрицательный тренд со скоростью уменьшения ледовитости 2.4 %/10 лет, что указывает на постепенное, но заметное снижение ледовитости к концу XX века. В период пониженной ледовитости (2005–2024 гг.) среднее значение ледовитости снизилось до 34.8 %, при этом скорость уменьшения ледовитости практически остановилась и составила всего 0.3 %/10 лет, что говорит о значительном ослаблении нисходящего

тренда в 2005–2024 гг. по сравнению с 1979–2004 гг. По обзору некоторых исследователей (Юлин и др., 2019; Sun et al., 2023), сокращение площади морского льда в Арктике носит неоднородный характер по сезонам и годам, однако в новейший период во многих оценках отмечается усиление нисходящего тренда как для зимних, так и для летних характеристик ледяного покрова.

Изменение ледовитости Охотского моря от месяца к месяцу имеет хорошо выраженный сезонный ход, в котором можно выделить три основных периода: 1) фаза интенсивного ледообразования (декабрь–январь); 2) фаза максимального развития (февраль–март); 3) фаза разрушения (апрель–май) льда (Романюк и др., 2022). На рисунке 4 показан среднесезонный сезонный цикл ледовитости для всего ряда 1979–2024 гг. и отдельно в периоды повышенной (1979–2004 гг.) и пониженной (2005–2024 гг.) ледовитости. Форма сезонной кривой в целом сохраняется, однако во втором интервале наблюдается систематическое снижение значений на большинстве стадий ледового сезона, причем величина различий заметно меняется от месяца к месяцу (таблица 1).

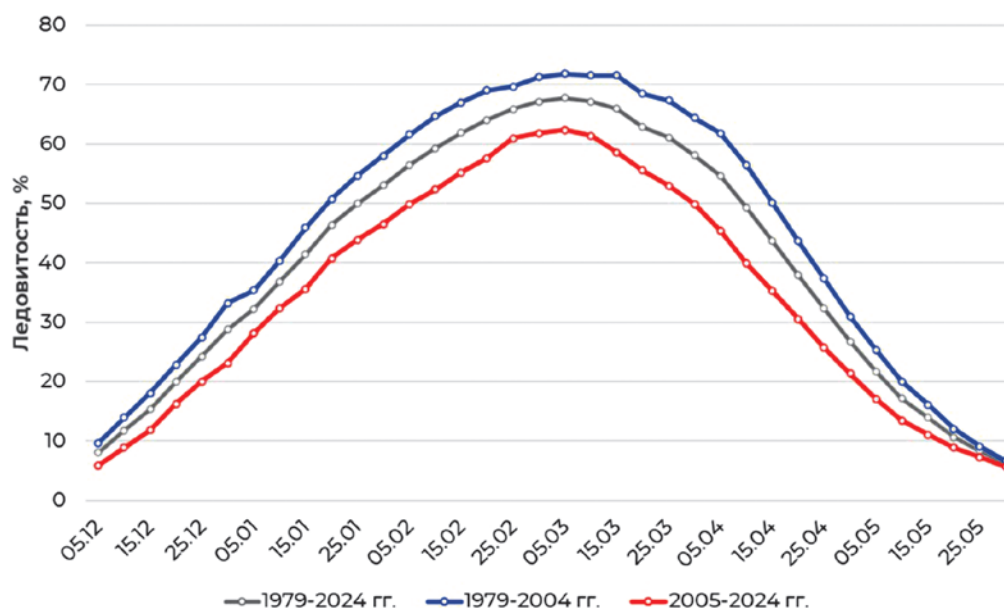


Рис. 4 – Сезонный ход изменения ледовитости Охотского моря

Табл. 1 – Среднемесячные значения ледовитости в Охотском море в периоды повышенной и пониженной ледовитости, %

Месяцы	Периоды наблюдений		
	1979–2004 гг.	2005–2024 гг.	Разность между периодами
Декабрь	20.9	14.3	6.6
Январь	47.5	37.8	9.7
Февраль	67.2	56.3	10.9
Март	69.2	56.8	12.4
Апрель	46.7	33.0	13.7
Май	14.9	10.6	4.3
Среднее за сезон	44.4	34.8	9.6

Из приведенных данных (таблица 1), в период 2005–2024 гг. средняя за сезон ледовитость Охотского моря сократилась на 9.6 % по отношению к периоду 1979–2004 гг. Наименьшая разность между периодами характерна для стадии интенсивного ледообразования (декабрь, январь) и поздней стадии фазы разрушения (май). Наибольшие изменения ледовитости произошли в апреле, снижение составило 13.7 %. На фазе максимального развития ледовитости разность между периодами составляет от 10.9 % в феврале до 12.4 % в марте.

На рисунке 4 видно, что в период 1979–2004 гг. на стадии максимального развития ледяного покрова наблюдался продолжительный интервал высоких значений ледовитости, которые в среднем достигали 71 % и сохранялись с 28 февраля по 15 марта. В период 2005–2024 гг. среднемноголетний сезонный максимум ледовитости составил 62 %. Для количественного определения изменчивости был выполнен анализ динамики площади льда в сезонном цикле, а именно различие между ее значениями в последовательные пятидневные периоды. Интенсивность изменения площади льда представляет собой ключевой показатель, характеризующий динамику роста или сокращения ледяного покрова, что позволяет глубже понять процессы изменчивости и выявить основные факторы, влияющие на эти изменения.

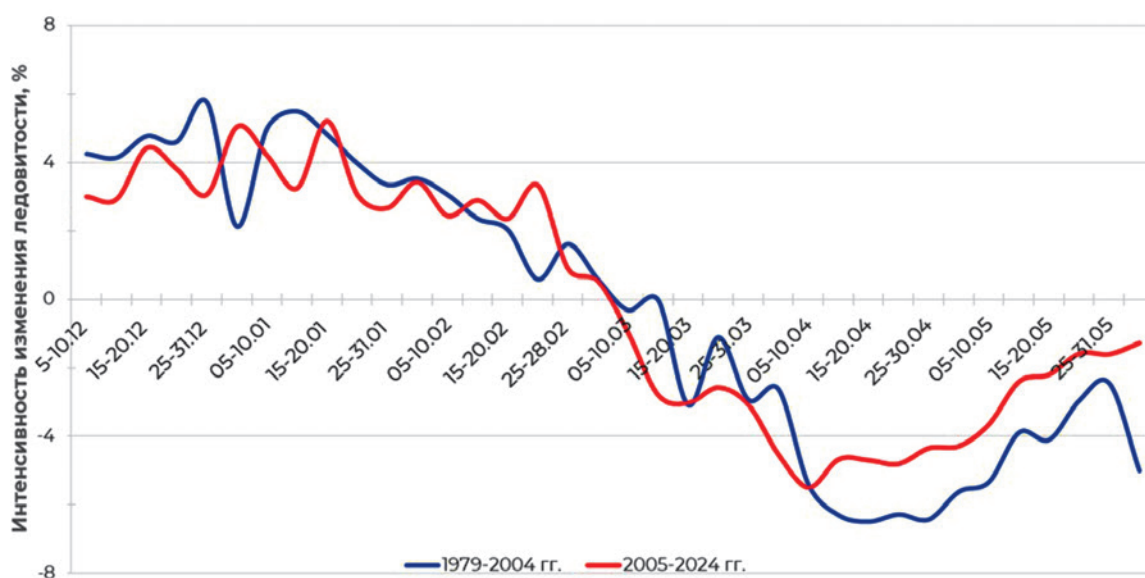


Рис. 5 – Сезонный ход пентадной скорости изменения ледовитости в Охотском море

Анализ внутрисезонной динамики, представленный на рисунке 5, показывает, что наиболее высокая скорость прироста ледяного покрова в Охотском море наблюдается в декабре и январе. В эти месяцы средняя скорость увеличения ледовитости составляла 4.3 % за пентаду в период 1979–2004 гг. и 3.7 % – в период 2005–2024 гг. В феврале скорость нарастания льда снижалась приблизительно вдвое: до 1.7 % и 2.1 % соответственно. Существенное различие между периодами наблюдается в дате перехода скорости изменения ледовитости через ноль, что соответствует смене фазы максимального развития на фазу разрушения. Для периода 1979–2004 гг. этот переход

происходил в интервале 15–20 марта, тогда как в период 2005–2024 гг. он сместился на более ранние сроки – на 5–10 марта, что составляет разницу в 10 дней.

В марте скорость сокращения ледовитости составляла –1.7 % и –2.8 % для первого и второго периодов соответственно. Максимальные скорости разрушения льда наблюдались в апреле (–6.1 % и –4.7 %), а к маю, в связи с переходом на летний муссонный режим и концентрацией остаточного льда в прибрежной зоне, они уменьшались до –3.9 % и –2.1 %. Также зафиксировано смещение сроков экстремальных значений скорости ледообразования. Пиковая скорость ледообразования в период 1979–2004 гг. достигала 5.8 % и наблюдалась 25–31 декабря, тогда как в 2005–2024 гг. этот максимум снизился до 5.2 % и сместился на 15–20 января. На фазе разрушения льда наибольшая скорость его сокращения в первый период отмечалась 15–20 апреля (–6.5 %), а во второй период – 5–10 апреля (–5.5 %).

Анализ скоростей изменения ледовитости показывает, что в период пониженной ледовитости (2005–2024 гг.), по сравнению с предыдущим периодом, произошла перестройка сезонного цикла. Она выражается в снижении скорости ледообразования в начале зимы, более раннем (на 10 дней) переходе к фазе разрушения льда, а также в изменении интенсивности и сроков пиковых значений как нарастания, так и таяния ледяного покрова.

Заключение

Проведенное исследование позволило установить закономерности изменчивости ледового режима Охотского моря под влиянием современных климатических изменений. Анализ 45-летнего ряда спутниковых наблюдений выявил статистически значимое сокращение средней сезонной ледовитости на 16 % с выраженной отрицательной тенденцией –3.5 % за десятилетие. Максимальная ледовитость демонстрирует еще более интенсивное снижение –4.0 % за десятилетие, что свидетельствует о повышенной чувствительности экстремальных показателей к изменению климатических условий.

Высокая корреляция ($r = 0.89$) между рядами средних и максимальных значений указывает на общность климатических механизмов, определяющих оба параметра ледовитости. Выделение двух качественно различных климатических периодов (1979–2004 гг. и 2005–2024 гг.) с разными характеристиками ледового режима свидетельствует о нелинейном характере наблюдаемых изменений.

Спектральный анализ выявил наличие выраженных компонент межгодовой изменчивости (порядка 3–7 лет) и низкочастотных вариаций (порядка 15–23 лет). Эти масштабы сопоставимы с временными шкалами крупномасштабной атмосферно-океанической циркуляции Северной Пацифики (например, ENSO, PDO), однако их физическая интерпретация и статистическая значимость требуют отдельного анализа.

Установлено, что наряду с устойчивым сокращением площади ледяного покрова, в период 2005–2024 гг. произошла трансформация его внутрисезонной динамики. Ключевыми проявлениями этой трансформации являются: снижение интенсивности

ледообразования на фазе интенсивного ледообразования, смещение на 10 дней в сторону более ранних сроков перехода к фазе разрушения льда, а также изменение характеристик пиковых скоростей как нарастания, так и таяния ледяного покрова. Указанные изменения свидетельствуют о сокращении общей продолжительности ледового сезона и изменении его внутренней структуры, что является прямым следствием региональных климатических изменений.

Благодарности. Исследование выполнялось и финансировалось в рамках государственного задания Сахалинского государственного университета «Создание научных основ управления процессами поглощения и накопления углерода биоморфолитосистемами прибрежно-морских водно-болотных угодий и прилегающих морских акваторий (FEFF-2024-0004)» и государственного задания Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (FWWM-2024-0002).

Список литературы

1. Глебова С. Ю. Особенности развития атмосферных процессов над Беринговым морем в 2000–2006 гг. // Изв. ТИНРО. 2007. Т. 151. С. 271–289. EDN: [HQNSKW](#)
2. *Границы океанов и морей: пособие.* № 9031. СПб.: ГУНиО МО, 2000. С. 127–137. <https://www.morkniga.ru/p800326.html?ysclid=mm8tez5hvv858863169>
3. Минервин И. Г., Романюк В. А., Пищальник В. М., Трусков П. А., Покрашенко С. А. Районирование ледяного покрова Охотского и Японского морей // Вестник РАН, 2015. Т. 85. № 3. С. 209–217. EDN: [TLOXRP](#). <https://doi.org/10.7868/S0869587315010119>
4. Романюк В. А., Пищальник В. М., Зарубина Д. В. Анализ вариаций ледовитости Охотского моря на основе авиационных и спутниковых наблюдений // ИнтерКАРТО. ИнтерГИС. 2022. Том. 28. № 1. С. 441–449. EDN: [KZZPTU](#). <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-441-449>
5. Шумилов И. В., Романюк В. А., Пищальник В. М. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2023688937. “Ice Data Processing”. 2023. № 2023682641 от 30.10.2023; опубли. 25.12.2023. <https://fips.ru/EGD/a841422c-d905-46b5-9ce2-c2bedc0f6ff3>
6. Юлин А. В., Вязигина Н. А., Егорова Е. С. Межгодовая и сезонная изменчивость площади льдов в Северном Ледовитом океане по данным спутниковых наблюдений // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 28–40. EDN: [YMCASA](#). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10073>
7. Comiso J. C. Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations // Journal of Climate. 2003. Vol. 16. No. 21. P. 3498–3510. EDN: [LWBNQV](#). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C3498:WTITAF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016%3C3498:WTITAF%3E2.0.CO;2)
8. Drinkwater M. R., Long D. G., Early D. S. Comparison of variations in sea-ice formation in the Weddell Sea with seasonal bottom-water outflow data // 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '95): Quantitative Remote Sensing for Science and Applications. Proc. Vol. 1. Firenze: IEEE, 1995. P. 402–404. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1995.520292>
9. IPCC. 2023: Sections // Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [Core Writing Team; H. Lee, J. Romero (eds.)]. Geneva: IPCC, 2023. P. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>

10. Kwok R., Cunningham G. F. Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2 // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. Vol. 373. No. 2045. 20140157. EDN: UQBVXX. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0157>
11. Parkinson C. L., Comiso J. C., Zwally H. J., Cavalieri D. J., Gloersen P., Campbell W. J. Arctic sea ice, 1973–1976: Satellite passive-microwave observations. NASA SP-489. Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1987. 296 p. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19840002650>
12. Parkinson C. L., Cavalieri D. J. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006 // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2008. Vol. 113. C07003. EDN: USNHDD. <https://doi.org/10.1029/2007JC004558>
13. Serreze M. C., Barry R. G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global and Planetary Change*. 2011. Vol. 77. No. 1–2. P. 85–96. EDN: OLOJLP. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
14. Sun X., Lv T., Sun Q., Ding Z., Shen H., Gao Y., He Y., Fu M., Li C. Analysis of spatiotemporal variations and influencing factors of sea ice extent in the Arctic and Antarctic // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. No. 23. 5563. EDN: CQRJJN. <https://doi.org/10.3390/rs15235563>

Статья поступила в редакцию 25.12.2025, одобрена к печати 19.02.2026.

Для цитирования: Романюк В. А., Шумилов И. В., Пищальник В. М., Никулина И. В. Особенности межгодовой и внутрисезонной изменчивости ледовитости Охотского моря за период 1979–2024 гг. // *Океанологические исследования*. 2026. Т. 54. № 1. С. 25–38. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(1\).2](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).2)

INTERANNUAL AND INTRASEASONAL VARIABILITY OF SEA-ICE EXTENT IN THE SEA OF OKHOTSK (1979–2024)

V. A. Romanyuk¹, I. V. Shumilov², V. M. Pishchalnik^{1,2}, I. V. Nikulina²

¹ *Sakhalin State University,
33, Kommunistichesky Prospekt, Yuzhno-Sakhalinsk, 693008, Russia,
e-mail: varomanyuk2020@gmail.com;*

² *Institute of Marine Geology and Geophysics,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia,
e-mail: ilyarolevik1@yandex.ru*

This paper presents the results of an analysis of interannual and intraseasonal variability of sea-ice extent in the Sea of Okhotsk for 1979–2024 based on pentad sea-ice charts from the Japan Meteorological Agency processed with the Ice Data Processing software. Sea-ice extent was calculated as the fraction of the sea area covered by ice and referenced to the 1991–2020 climatological baseline. Regression and spectral analyses were applied to time series of seasonal mean (December–May) and seasonal maximum sea-ice extent; pentad rates of change were also evaluated to quantify intraseasonal dynamics and timing of transitions between ice-growth and ice-decay phases. A statistically significant decline of seasonal mean sea-ice extent by 16 % over the 45-year period (–3.5 % per decade) and a stronger decrease of seasonal maxima (–4.0 % per decade) are demonstrated, with a high correlation between mean and maximum values ($r = 0.89$). Two contrasting regimes are identified: higher ice conditions in 1979–2004

(44.4 %) and lower ice conditions in 2005–2024 (34.8 %), along with quasi-periodic variability on time scales of 3–7 years and a low-frequency component of 15–23 years. Intraseasonal analysis reveals weakened ice formation in early winter (a decrease in the mean growth rate in December–January from 4.3 % to 3.7 % per pentad), an advance of the transition to the ice-decay phase by about 10 days (from 15–20 March to 5–10 March), and reduced amplitudes with a shift of peak growth and melt rates (the growth peak decreased from 5.8 % on 25–31 December to 5.2 % on 15–20 January; the strongest ice loss shifted from 15–20 April to 5–10 April with a lower magnitude). The obtained results quantitatively characterize the ongoing weakening and shortening of the ice season in the Sea of Okhotsk and can be used for climate monitoring and validation of regional seasonal sea-ice models.

Keywords: Sea of Okhotsk, sea-ice extent, sea ice, remote sensing, satellite data, climate variability, seasonal cycle, trend, spectral analysis

Acknowledgments. The study was carried out and financed within the framework of the state assignment of Sakhalin State University “Creation of scientific foundations for managing the processes of carbon absorption and accumulation by biomorpholithosystems of coastal-marine wetlands and adjacent marine areas (FEFF-2024-0004)” and the state assignment of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (FWWM-2024-0002).

References

1. Comiso, J. C., 2003: Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations. *Journal of Climate*, **16** (21), 3498–3510, EDN: LWBNQV, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C3498:WTITAF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016%3C3498:WTITAF%3E2.0.CO;2)
2. Drinkwater, M. R., D. G. Long, and D. S. Early, 1995: Comparison of variations in sea-ice formation in the Weddell Sea with seasonal bottom-water outflow data. *Proceedings of the 1995 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '95): Quantitative Remote Sensing for Science and Applications*, Vol. 1, Firenze, IEEE, 402–404, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1995.520292>
3. Glebova, S. Yu., 2007: Osobennosti razvitiya atmosferykh protsessov nad Beringovym morem v 2000–2006 gg. (Features of atmospheric processes over the Bering Sea in 2000–2006). *Izvestiya TINRO*, **151**, 271–289, EDN: HQNSKW [in Russian]
4. *Granitsy okeanov i morey*. No. 9031: (Boundaries of oceans and seas). Saint Petersburg, GUNiO MO, 2000, 127–137, <https://www.morkniga.ru/p800326.html?ysclid=mm8tez5hvv858863169> [in Russian]
5. IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team; H. Lee, J. Romero, eds.). Geneva, IPCC, 35–115, <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
6. Kwok, R. and G. F. Cunningham, 2015: Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **373** (2045), 20140157, EDN: UQBVXX, <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0157>
7. Minervin, I. G., V. A. Romanyuk, V. M. Pishchalnik, P. A. Truskov, and S. A. Pokrashenko, 2015: Rayonirovanie ledyanogo pokrova Okhotskogo i Yaponskogo morey (Ice cover zoning of

- the Sea of Okhotsk and the Sea of Japan). *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, **85** (3), 209–217, EDN: TLOXRP, <https://doi.org/10.7868/S0869587315010119>
8. Parkinson, C. L., J. C. Comiso, H. J. Zwally, D. J. Cavalieri, P. Gloersen, and W. J. Campbell, 1987: *Arctic sea ice, 1973–1976: satellite passive-microwave observations*. NASA SP-489. Washington, D.C., National Aeronautics and Space Administration, 296 p., <https://ntrs.nasa.gov/citations/19840002650>
 9. Parkinson, C. L. and D. J. Cavalieri, 2008: Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **113**, C07003, EDN: USNHDD, <https://doi.org/10.1029/2007JC004558>
 10. Romanyuk, V. A., V. M. Pishchalnik, and D. V. Zarubina, 2022: Analysis of the ice cover variations in the Arctic Sea of Okhotsk based on aircraft and satellite observations. *InterCarto. InterGIS*, **28** (1), 441–449, EDN: KZZPTU, <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2022-1-28-441-449>
 11. Serreze, M. C. and R. G. Barry, 2011: Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and Planetary Change*, **77** (1–2), 85–96, EDN: OLOJLP, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
 12. Sun, X., T. Lv, Q. Sun, Z. Ding, H. Shen, Y. Gao, Y. He, M. Fu, and C. Li, 2023: Analysis of spatiotemporal variations and influencing factors of sea ice extent in the Arctic and Antarctic. *Remote Sensing*, **15** (23), 5563, EDN: CQRJJN, <https://doi.org/10.3390/rs15235563>
 13. Shumilov, I. V., V. A. Romanyuk, and V. M. Pishchalnik, 2023: Certificate of state registration of a computer program No. 2023688937. *Ice Data Processing*. No. 2023682641 dated 30.10.2023; published 25.12.2023. (FIPS record). <https://fips.ru/EGD/a841422c-d905-46b5-9ce2-c2bedc0f6ff3>
 14. Yulin, A. V., N. A. Vyazigina, and E. S. Egorova, 2019: Interannual and seasonal variability of Arctic sea ice extent according to satellite observations. *Russian Arctic*, **7**, 28–40, EDN: YMCASA, <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10073>

Submitted 25.12.2025, accepted 19.02.2026.

For citation: Romanyuk, V. A., I. V. Shumilov, V. M. Pishchalnik, and I. V. Nikulina, 2026: Interannual and intraseasonal variability of sea-ice extent in the Sea of Okhotsk (1979–2024). *Journal of Oceanological Research*, **54** (1), 25–38, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54\(1\).2](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2026.54(1).2)

1979–2024年鄂霍次克海冰况年际与季节内变化特征

V. A. Romanyuk¹, I. V. Shumilov², V. M. Pishchalnik^{1,2}, I. V. Nikulina²

¹*Sakhalin State University,
33, Kommunistichesky Prospekt, Yuzhno-Sakhalinsk, 邮编: 693008, Russia,*

电子邮件: varomanyuk2020@gmail.com;

²*Institute of Marine Geology and Geophysics,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
1B, Nauki str., Yuzhno-Sakhalinsk, 邮编: 693022, Russia,*

电子邮件: ilyaroleviki@yandex.ru

本研究基于日本气象厅提供的五日海冰图资料·利用Ice Data Processing软件进行处理·分析了1979–2024年间鄂霍次克海冰况的年际与季节内变化特征·研究中将冰况定义为海域被冰覆盖的面积比例·并以1991–2020年气候标准值为基准进行标准化处理·通过对季节平均(12月至次年5月)和季节最大冰况的时间序列进行相关分析·回归分析及谱分析·揭示了其特征变化尺度·季节内动态方面·计算了五日冰况变化速率·并确定了冰季各阶段的转换时间点·研究表明·45年间季节平均冰况显著减少16%(每10年减少3.5%)·季节最大冰况的减少更为显著(每10年减少4.0%)·且两者高度相关($r = 0.89$)·研究识别出1979–2004年冰况偏高期(44.4%)与2005–2024年冰况偏低期(34.8%)·以及3–7年的准周期年际振荡和15–23年的低频分量·季节内分析显示·冬季初期结冰过程减弱(12月至1月平均冰况增长率从每五日4.3%降至3.7%)·峰值增长率发生偏移并减弱(从每五日5.8%降至5.2%)·海冰消融阶段转换时间提前约10天(从3月15–20日提前至3月5–10日)·同时极端消融速率幅度有所降低·

关键词: 冰况·海冰·鄂霍次克海·遥感·卫星数据·气候变化

致谢: 本研究在萨哈林国立大学国家任务“建立滨海湿地及邻近海域生物形态岩碳吸收与累积过程管理的科学基础”(项目编号:FEFF-2024-0004)与俄罗斯科学院远东分院海洋地质与地球物理研究所国家任务(项目编号:FVWM-2024-0002)框架内进行并获得资助·