

УДК 551.467.3:551.326.1

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЯ И АДВЕКЦИИ ТЕПЛА В ГРЕНЛАНДСКОМ МОРЕ НА ДЕГРАДАЦИЮ СТАРЫХ ЛЬДОВ

© 2026 г. Н. А. Лис^{1,*}, Е. А. Чернявская¹, Н. В. Лебедев¹, Е. С. Егорова²,
А. А. Соколов¹, Л. А. Тимохов¹

¹Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: nalis@aari.ru

Поступила 15.10.2025 г.

После доработки 25.11.2025 г.

Принята к печати 23.03.2026 г.

В исследовании анализируется влияние теплосодержания верхнего 300-метрового слоя воды и адвекции тепла в этом слое на сокращение площади старых припайных льдов в Гренландском море — важном регионе взаимодействия арктических и атлантических водных масс. На основе комплексного анализа данных наблюдений и реанализов ERA5, ORAS5 и CMEMS Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis за период 1996–2023 гг. установлена тесная связь между термическим состоянием Северо-Европейского бассейна и сокращением площади старых припайных льдов Гренландского моря. Результаты демонстрируют, что основной фактор деградации льда — прогрев атлантических вод. Ключевую роль играет адвекция тепла через пролив Фрама. Выявлены два доминирующих механизма воздействия: прямое термическое влияние атлантических вод с короткими временными лагами (1–6 месяцев), реализуемое через поток тепла от морской воды к нижней границе морского льда снизу, и опосредованный процесс, связанный с трансформацией водных масс в Норвежском море, эффект от которого проявляется в более длительные сроки (12–48 месяцев). Применение метода PLSR-регрессии позволило выявить выраженную сезонную изменчивость этих процессов. Такой сдвиг режима характеризуется ослаблением океанической стратификации, увеличением глубины перемешанного слоя и интенсификацией вертикального теплообмена, что в совокупности усиливает деградацию старых льдов. Исследование даёт количественную оценку относительно вклада теплосодержания и интегральных потоков тепла в деградацию старых припайных льдов Гренландского моря, что имеет важное значение для совершенствования моделей прогнозирования площади ледяного покрова в условиях меняющегося климата Арктики.

Ключевые слова: Северо-Европейский бассейн, теплосодержание, толщина льда, возраст льда, припай, потоки тепла, атлантификация

DOI: 10.7868/S2412376526020089

ВВЕДЕНИЕ

Современные климатические изменения в Арктике характеризуются уменьшением площади ледяного покрова, усилением адвекции тёплых атлантических вод (АВ) и перестройкой термохалинной структуры океана. Гренландское море — один из ключевых регионов взаимодействия арктических и атлантических водных масс — демонстрирует прямую зависимость динамики старых припайных (неподвижных) льдов от теплового состояния морей Северо-Европей-

ского бассейна (СЕБ). Наблюдаемый прогрев АВ, например, в Западно-Шпицбергенском течении со скоростью до $+0.06$ °C/год, и интенсификация взаимодействия океана с криосферой приводят к особой уязвимости старых припайных льдов (Beszczynska-Möller et al., 2012; Ingvaldsen et al., 2021). Площадь этих льдов служит индикатором устойчивости морской ледовой системы СЕБ, что подтверждается влиянием теплосодержания верхних слоёв океана на субсезонную изменчивость льда и переходом в Гренландском море от формирования глубинных вод к промежуточ-

ным в условиях потепления (Bianco et al., 2024; Strehl et al., 2024). Несмотря на отсутствие значимого долгосрочного тренда в дрейфе льда через пролив Фрама, интегральный объём морского льда в Гренландском море сокращается, особенно в зимний сезон, что указывает на преобладание термодинамических процессов таяния внутри акватории (Karam et al., 2024; Karpouzoglou et al., 2024). Это подтверждается недавними исследованиями, которые показывают резкое увеличение вклада локальных процессов в сокращение объёма льда в Гренландском море в начале XXI века (Luo et al., 2025). Зимняя изменчивость теснее коррелирует с адвекцией льда, тогда как летом изменчивость льда в значительной степени определяется локальными процессами, включая взаимодействие с океаном, что проявляется в сильной корреляции между теплосодержанием и площадью льда с коротким временным лагом (Bianco et al., 2024).

Исследование сосредоточено на анализе влияния локальных термических процессов, таких как теплосодержание и океаническая адвекция тепла, на уменьшение площади старых припайных льдов Гренландского моря. Дрейфующие льды, поступающие в акваторию преимущественно через пролив Фрама с Восточно-Гренландским течением, в настоящей работе не рассматривались. Это обусловлено тем, что их пространственно-временная изменчивость в исследуемом районе преимущественно контролируется крупномасштабным дрейфом льда из Центральной Арктики и влиянием ветра (Smedsrud et al., 2017).

Феномен “атлантификации”, характеризующийся увеличением температуры и солёности, ослаблением стратификации (Polyakov et al., 2020), активно проявляется в центральной части Гренландского моря (Strehl et al., 2024). Ключевым драйвером этих изменений, способствующих ускоренной потере льда, выступает трансформация термического состояния океана, которое оказывает более сильное непосредственное влияние на объём льда, чем приповерхностная температура воздуха (ПТВ) (Bianco et al., 2024). Пространственно наибольший рост температуры воды отмечается вдоль побережья Шпицбергена под влиянием ветви Западно-Шпицбергенского течения (Luo et al., 2025). Эти процессы кардинально меняют структуру водных масс: происходит подъём верхней границы АВ, а температура их ядра в среднем на 0.2 °C превышает значения 1990-х годов, достигая в от-

дельные годы превышения в 1 °C. Параллельно наблюдается осолонение поверхностного слоя, что в сочетании с потеплением ослабляет стратификацию и приводит к утончению слоя полярных вод (Ingvaldsen et al., 2021). Адвекция тепла АВ признана основным источником роста теплосодержания, при этом температура АВ в Западно-Шпицбергенском течении растёт со скоростью до +0.06 °C/год (Beszczynska-Möller et al., 2012). Усиление адвекции атлантических вод после 2015 г. (Polyakov et al., 2020) привело к дальнейшему ослаблению стратификации в Гренландском море, что в полной мере оправдывает применение термина “атлантификация” для описания текущих изменений (Strehl et al., 2024).

Глубина верхнего квазиоднородного слоя — критический параметр доступности тепла для таяния — значительно увеличилась зимой в зоне кромки льда, что способствует подъёму большего количества тепла АВ к поверхности и усиливает таяние (Strehl et al., 2024). Тепловой баланс поверхности претерпел изменения вследствие адвекции тепла океаном, увеличения поглощения солнечной радиации из-за уменьшения альбедо и турбулентных потоков, обусловленных полярными циклонами (Bianco et al., 2024; Gutjahr, Mehlmann, 2024; Oldenburg et al., 2024). Прямое термическое воздействие тёплых АВ на шельфе, ослабление стратификации из-за уменьшения толщины слоя полярных вод ведут к резкому сокращению площади припайных льдов (Ingvaldsen et al., 2021; Bianco et al., 2024). При этом влияние теплосодержания и адвективных потоков тепла на изменение площади старых припайных льдов Гренландского моря до настоящего времени не рассматривалось.

Цель исследования — на основе уникального массива данных о возрасте старых припайных льдов Гренландского моря выполнить комплексный количественный анализ влияния теплосодержания и адвективных потоков тепла в СЕБ на площадь этих льдов, установить причинно-следственные связи и оценить вклад этих факторов в условиях современного изменения климата.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

По международной номенклатуре (WMO—JCOMM, 2014) к старым относятся многолетние и двухлетние льды толщиной более 250 см. Площадь припая такой толщины в Гренландском

море рассчитана по данным региональных ледовых карт ААНИИ (стандарт SIGRID-3) за период 1999–2023 гг. (Миронов и Егорова, 2024). Электронный архив включает значения ледовитости и площади припая в процентах от площади Гренландского моря. Анализ площади старых льдов проводился для зимних месяцев (январь–апрель), так как в этот период ледяной покров достигает своей максимальной протяжённости и мощности в данном районе (Миронов, Егорова, 2024), что позволяет наиболее репрезентативно оценивать состояние многолетних льдов.

Для оценки влияния теплосодержания северных морей на площадь старых льдов Гренландского моря использованы данные реанализа ORAS5 (Ocean Reanalysis System 5) (Zuo et al., 2019), который предоставляет информацию о теплосодержании в слое 0–300 м со среднемесячной дискретностью. В работе рассматривается период с 1996 по 2023 гг. Данные представлены в узлах сетки размером $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Данные по приповерхностной температуре воздуха (ПТВ) используются из реанализа ERA5 за период 1997–2023 гг. в узлах сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Hersbach et al., 2024).

Для оценки интегрального потока тепла через пролив Фрама использовались среднемесячные данные реанализа (CMEMS..., 2025) за период с января 1993 по декабрь 2020 г. Этот глобальный массив данных с пространственным разрешением 0.25° интегрирует три основных океанических реанализа: GLORYS2V4, ORAS5 (ECMWF, EC) и C-GLORSv7. Расчёт тепломассопереноса проводился относительно пороговой температуры -1.8°C (температура замерзания) в соответствии с подходом, изложенным в работе (Schauer et al., 2008). Выбор различных временных периодов для разных наборов данных обусловлен доступностью соответствующих массивов реанализа на момент проведения исследования.

Для каждого узла сетки на акватории Гренландского и Норвежского морей с данными по теплосодержанию в слое 0–300 м был рассчитан коэффициент корреляции с различными лагами (временными сдвигами) с площадью старых льдов в Гренландском море и проверен на значимость по критерию Стьюдента на уровне значимости 0.05.

Количественная оценка вклада основных факторов выполнена с помощью регрессионной модели методом проекции на латентные струк-

туры (PLSR), применяемым для анализа влияния сильно скоррелированных предикторов при ограниченной длине выборки (Abdi, 2010). Для обеспечения надёжности модели выполнена кросс-валидация. Для оценки значимости предикторов использовались VIP-оценки ($VIP > 1$ указывает на значимый вклад).

Для исключения влияния климатической сезонности и выделения межгодовой изменчивости исходные временные ряды были преобразованы в ряды стандартизированных аномалий. Процедура включала два этапа. 1. Для каждого календарного месяца рассчитана климатическая норма – среднемноголетнее значение за весь рассматриваемый период. Затем из фактического значения каждого месяца вычиталась соответствующая климатическая норма, что позволило получить ряды аномалий, отражающие отклонения от среднего состояния. 2. На втором этапе полученные аномалии для каждого месяца нормировались путём деления на стандартное отклонение, также рассчитанное для этого же календарного месяца за весь период наблюдений.

ОБСУЖДЕНИЕ

Связь теплосодержания и площади старых припайных льдов. Корреляционный анализ выявил пространственно-временные закономерности влияния аномалий теплосодержания в слое 0–300 м на площадь старых льдов в Гренландском море за период 1999–2023 гг. (табл. 1).

В табл. 1 представлено расчётное время распространения теплового отклика атлантических вод от указанных районов до северной части Гренландского моря. Эти оценки получены на основе известных диапазонов скоростей течений и аппроксимированных расстояний вдоль их основных траекторий. Отмечено, что данный расчёт – ориентировочный, поскольку реальная динамика морских течений нелинейна, характеризуется переменными скоростями на различных участках пути и подвержена влиянию мезомасштабных процессов, таких как вихри, способные существенно задерживать перенос водных масс на сроки от нескольких месяцев до нескольких лет (Schauer et al., 2008; Asbjørnsen et al., 2021). Обобщённая схема корреляционных связей с учётом временных задержек представлена на рис. 1.

Самые сильные отрицательные корреляции ($R \leq -0.70$) наблюдаются между теплосодер-

Таблица 1. Корреляционные связи площади старых льдов Гренландского моря с теплосодержанием в слое 0–300 м морей Северо-Европейского бассейна за период 1999–2023 гг.

Table 1. Correlations of the old ice extent of the Greenland Sea with heat content in the 0–300 m layer in the seas of the North European basin for the period 1999–2023

Район Месяц площади льда		Южная часть Норвежского моря	Норвежское фронтальное течение	Западно- Шпицбергенское течение	Пролив Фрама	Восточно- Гренландское течение
Январь	<i>R</i>	–0.49	–0.47	–0.71	–0.66	–0.51
	Лаг, месяцы	34	12	5	4	1
Февраль	<i>R</i>	–0.5	–0.48	–0.68	–0.73	–0.62
	Лаг, месяцы	24	12	6	5	2
Март	<i>R</i>	–0.53	–0.47	–0.7	–0.74	–0.70
	Лаг, месяцы	31	12	5	6	1
Апрель	<i>R</i>	–0.54	–0.55	–0.55	–0.66	–0.70
	Лаг, месяцы	48	14	5	8	3
Скорость течений, см/с		~25–30 (Orvik, Niiler, 2002)	~10–15 (Hansen et al., 2011)	~10–12 (Morozov, Frey, 2024)	~6–11 (de Steur et al., 2014)	~7–8 (Karpouzoglou et al., 2024)
Время до Гренланд- ского моря, месяцы		~4–30 (Koszalka et al., 2013)	~7–15	~4–6	~5–10	~1–4

R – коэффициент корреляции

R – correlation coefficient

жанием в Западно-Шпицбергенском течении, проливе Фрама, Восточно-Гренландском течении и площадью старых припайных льдов (см. табл. 1), что подтверждает ключевую роль адвекции АВ. Эти связи характеризуются короткими временными лагами (1–6 месяцев), соответствующими скорости распространения тепловых аномалий вдоль основных путей переноса АВ (Hattermann et al., 2016; de Steur et al., 2023). Прямое термическое влияние Западно-Шпицбергенского течения ($R = -0.71$ в январе, лаг 5 мес.) и рециркуляция в проливе Фрама ($R = -0.74$ в марте, лаг 6 мес.) приводят к подтаиванию льда снизу. Минимальный лаг воздействия через Восточно-Гренландское течение ($R = -0.70$ в марте и $R = -0.51$ в январе, лаг 1 мес.) объясняется прямым контактом возвратных атлантических вод со льдами (Mauritzen et al., 2013; de Steur et al., 2023). Согласно исследованиям (Karpouzoglou et al., 2024; Strehl et al., 2024), процесс усилился из-за учащения появле-

ния АВ в восточной части пролива Фрама и ослабления Восточно-Гренландского течения, что способствовало более эффективному переносу тепла к ледяному покрову.

Корреляции с теплосодержанием в южной части Норвежского моря и в Норвежском фронтальном течении слабее ($R \approx -0.55$) и характеризуются большими лагами (14–48 мес.), что согласуется с временем трансформации водных масс в Норвежском море (Mauritzen et al., 2013). Механизм включает адвекцию тепла через Фареро-Шетландский пролив, его последующую потерю (более 80%) и включение трансформированных вод в Восточно-Гренландское течение через 1–2 года (Rudels et al., 2012; Walczowski, 2014).

Сокращение площади старых льдов на 50% контролируется двумя процессами: прямым воздействием АВ (лаги 4–6 месяцев) и опосре-

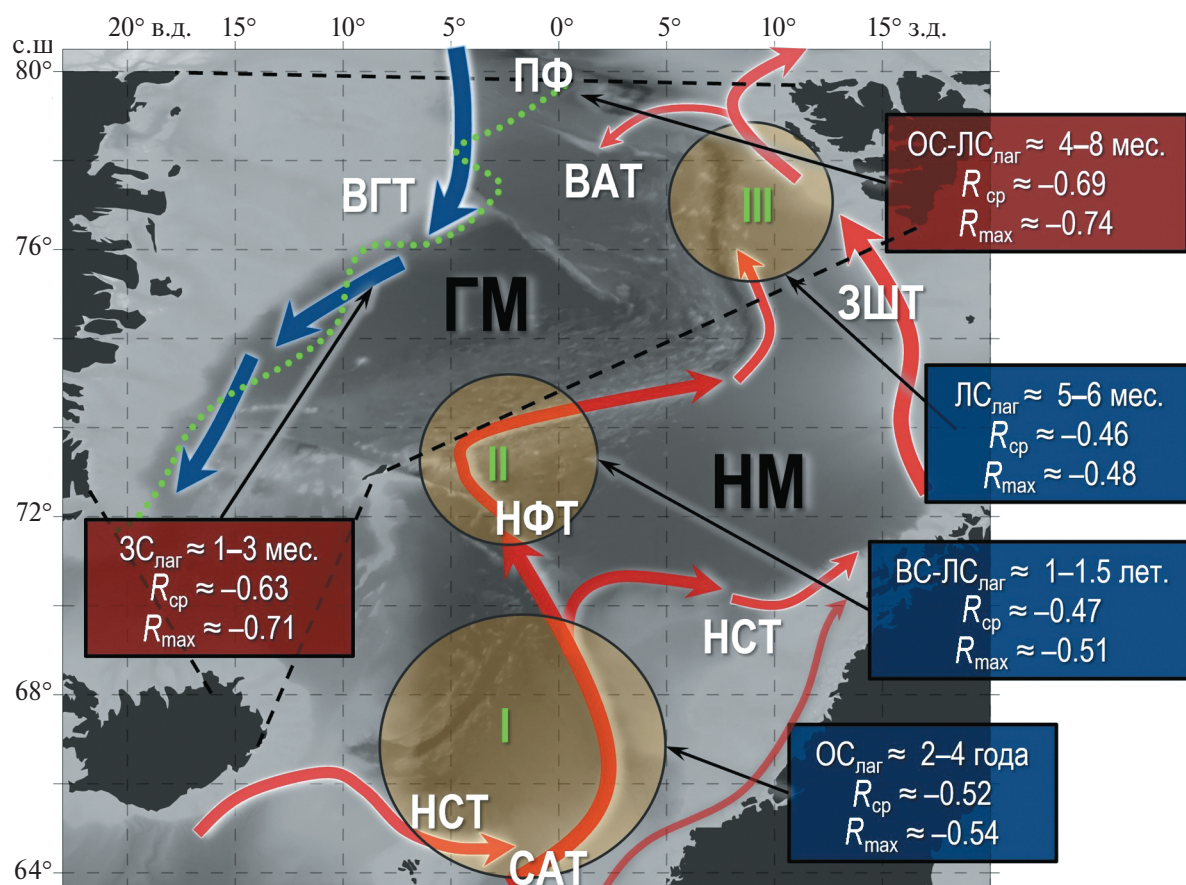


Рис. 1. Обобщенная схема переноса тепла и корреляционных связей между теплосодержанием в слое 0–300 м и площадью старых льдов Гренландского моря с учётом временных задержек

Красными стрелками обозначены тёплые течения, синими — холодные. Пунктирными чёрными линиями обозначены границы Гренландского моря; зелёной — средняя граница распространения старых льдов в Гренландском море в апреле за период 1997–2022 гг. (Миронов и Егорова, 2024). ГМ — Гренландское море; НМ — Норвежское море; ПФ — пролив Фрама; ВГТ — Восточно-Гренландское течение; ЗШТ — Западно-Шпицбергенское течение; ВАТ — возвратное Атлантическое течение; НСТ — Норвежское склоновое течение; НФТ — Норвежское фронтальное течение. Сезоны: ЛС — летний, ОС — осенний, ЗС — зимний, ВС — весенний. Коэффициенты корреляции: R_{max} — максимальный, $R_{\text{ср}}$ — средний

Fig. 1. A generalized schematic of the heat transfer and correlation links between the heat content in the 0–300 m layer and the old ice cover in the Greenland Sea, accounting for time lags
Warm and cold currents are indicated by red and blue arrows, respectively. The dotted black lines denote the sea boundaries; the green line shows the mean extent of old ice in the Greenland Sea for April over the 1997–2022 period (Mironov, Egorova, 2024). GS — Greenland Sea; NS — Norwegian sea; FS — Fram strait; EGC — East Greenland current; WSC — West Spitsbergen current; RAC — Atlantic Return current; NSC — Norwegian Slope current; NFC — Norwegian Frontal current. Seasons: SS — summer, AS — autumn, WS — winter, SpS — spring. Correlation coefficients: R_{max} — maximum, R_{m} — mean

дованным влиянием через трансформацию вод в Норвежском море (лаги 12–48 месяцев). Доминирование коротких связей отражает сдвиг режима в сторону “атлантификации”, при котором локальное потепление океана стало ключевым фактором уменьшения площади льда (Luo et al., 2025). Выявленные закономерности подтверждают причинно-следственную связь между теплосодержанием и сокращением площади старых припайных льдов.

Связь адвекции тепла и площади старых припайных льдов. При сопоставлении нормиро-

ванных аномалий площади старых припайных льдов Гренландского моря (зимний сезон) и интегральных потоков тепла через западную часть пролива Фрама (летне-осенний сезон) за период 1996–2020 гг. (рис. 2) выявлена асинхронная связь.

Аномалии потоков тепла демонстрируют резкие колебания, в то время как аномалии площади льда характеризуются более инерционными многолетними фазами (см. рис. 2). Наблюдается устойчивая временная задержка, при которой аномалии потоков тепла предшествуют

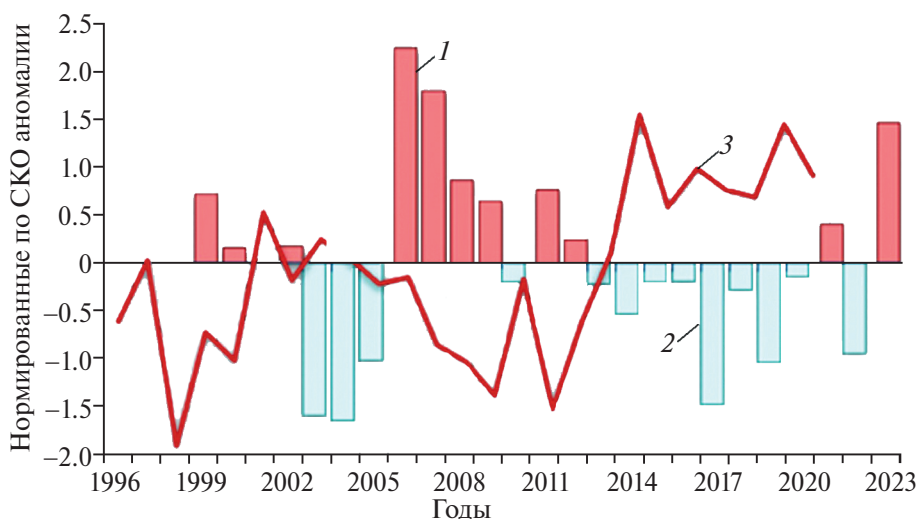


Рис. 2. Аномалии площади старых припайных льдов Гренландского моря и интегральных потоков тепла в проливе Фрама. 1 – положительные и 2 – отрицательные аномалии площади льдов за период 1999–2023 гг.; 3 – аномалии потоков тепла за период 1996–2020 гг.

Fig. 2. Anomalies of the area of the old ice of the Greenland Sea and integral heat fluxes in the Fram Strait. 1 – positive anomalies and 2 – negative anomalies of ice extend for the period 1999–2023; 3 – heat fluxes anomalies for the period 1996–2020

аномалиям площади льда на 1–3 года. Это особенно заметно в случаях резкого увеличения тепла в 2014 г., которому соответствовал минимум льда в 2017 г., и положительных аномалий тепла в 2005–2006 гг., предвещающих пик площади льда в 2006–2007 гг.

Механизм воздействия реализуется через два взаимосвязанных процесса. Тепло атлантических вод передаётся к поверхности через осенне-зимнее турбулентное перемешивание, увеличивая подлёдное таяние, а усиление притока АВ сокращает образование молодого льда (Polyakov et al., 2020). Наблюдаемая задержка в 2–3 года объясняется кумулятивным эффектом: адвективное тепло накапливается в подповерхностном слое, постепенно разрушая сезонный термоклин. Это инициирует положительную обратную связь – сокращение площади льда увеличивает поглощение солнечной радиации и дополнительно прогревает верхний слой океана.

Таким образом, усиление летне-осеннего поступления АВ через пролив Фрама увеличивает теплосодержание подповерхностного слоя, а через вертикальный теплообмен, усилившийся в середине 2010-х годов из-за ослабления стратификации (Polyakov et al., 2020), вызывает аномальное таяние многолетних льдов в течение последующих 2–3 лет. Пролив Фрама демонстрирует доминирующую роль в изменении площади морского льда Гренландского моря, дей-

ствуя через два основных режима теплопереноса с характерной сезонностью (табл. 2).

Наиболее значимые корреляции наблюдаются для августовских потоков тепла, демонстрирующих сильную отрицательную связь ($R = -0.59... -0.65$) с площадью льда в феврале–апреле с лагом 6–8 месяцев (см. табл. 2). Эта запаздывающая реакция соответствует механизму рециркуляции АВ в проливе и последующему переносу тепла в Восточно-Гренландское течение (Hattermann et al., 2016; de Steur et al., 2023), что подтверждается высокими корреляциями между теплосодержанием в Западно-Шпицбергенском течении и проливе Фрама и площадью льда при лагах 4–6 месяцев. Параллельно действует механизм с минимальным временным лагом (0–3 месяца), проявляющийся в зимние месяцы и указывающий на прямое влияние зимней адвекции тепла.

Чётко выраженная сезонность воздействия отражает два режима: летние потоки тепла влияют на зимний лёд через механизм рециркуляции (лаги 6–10 месяцев), тогда как зимние потоки оказывают непосредственное воздействие (лаги 0–3 месяца). Согласованность данных о потоках тепла и теплосодержании подчёркивает последовательность “адвекция–накопление тепла–воздействие на лёд”.

Оценка вклада теплосодержания и адвекции тепла. На основе проведённого анализа

Таблица 2. Корреляционные связи площади старых льдов Гренландского моря с интегральными потоками тепла за период 1999–2020 гг.**Table 2.** Correlations of the old ice extent of the Greenland Sea with integral heat fluxes for the period 1999–2020

Район	Месяц	Коэффициент корреляции с площадью старых льдов в зимние месяцы							
		Январь		Февраль		Март		Апрель	
		<i>R</i>	Лag, мес.	<i>R</i>	Лag, мес.	<i>R</i>	Лag, мес.	<i>R</i>	Лag, мес.
Пролив Фрама (возвратный поток)	Август	–0.49	5	–0.65	6	–0.55	7	–0.59	8
	Сентябрь	–0.52	6	–0.50	7	–0.49	8	–0.42	9
	Июль	–0.44	7	–	–	–	–	–0.41	10
Пролив Фрама (суммарный поток)	Январь	–0.50	0	–0.56	1	–0.56	2	–0.46	3
	Февраль	–	–	–0.44	0	–0.41	1	–0.40	2
	Март	–	–	–	–	–0.44	0	–0.44	1
	Апрель	–	–	–	–	–	–	–0.56	0
	Октябрь	–	–	–0.43	4	–0.43	5	–0.40	6
	Декабрь	–	–	–0.42	2	–0.41	3		
Возвратное Атлантическое течение	Сентябрь	–0.44	4	–	–	–	–	–	–

“–” данные отсутствуют

“–” no data available

корреляционных связей и физических представлений о переносе тепла АВ, для построения PLSR-модели были выбраны следующие факторы: аномалии интегральных потоков тепла через пролив Фрама (возвратная ветвь АВ); аномалии теплосодержания верхнего 300 м слоя северной части Гренландского моря; аномалии ледовитости Гренландского моря за сентябрь предшествующего года. Результаты демонстрируют высокую согласованность в оценке влияния ключевых факторов на изменение площади старых льдов. Для наглядности представлена сводная таблица (табл. 3).

PLSR-регрессия выявила одну главную латентную переменную, объясняющую основную часть взаимосвязей, что свидетельствует о высокой устойчивости модели. Все предикторы имеют VIP-оценки >1 , подтверждая их значимый вклад. Наибольший вклад ПТВ наблюдается в январе (коэффициент -0.53 ; вклад 30.7%), что отражает прямое атмосферное воздействие на ледообразование.

Выявлена сезонная смена механизмов воздействия, проявляющаяся в изменении зна-

ка коэффициента влияния теплосодержания (Q) со слабopоложительного в январе ($+0.07$) на устойчиво-отрицательный с февраля по апрель ($-0.24... -0.26$). В январе доминирует прямое воздействие ПТВ и потоков тепла (Fh , вклад $\sim 20.3\%$), в то время как океан выступает как термический буфер. Вместе с тем с февраля по апрель ключевую роль начинает играть накопленное в океане тепло, вклад которого возрастает до $24.8-26.5\%$. Этот сдвиг обусловлен ослаблением стратификации и усилением вертикального теплообмена, что направляет тепло АВ к нижней границе льда, вызывая его таяние. А превышение вклада теплосодержания с февраля по апрель (на $\sim 5-10\%$) над прямой адвекцией подчёркивает ключевую роль океана как термического буфера. Выявленный сдвиг в механизмах воздействия на ледяной покров может быть связан с процессами мезомасштабного вихревого переноса. Согласно оценкам (Bashmachnikov et al., 2023), мезомасштабные вихри в Норвежском море извлекают значительное количество тепла (70 ± 23 ТВт) из Норвежского атлантического склонового течения и перераспределяют его в центральные части бассейна, способствуя

Таблица 3. Сравнительный анализ вклада факторов в изменчивость площади старых льдов по данным PLSR за период 1999–2020 гг.

Table 3. Comparative analysis of factor contributions to old ice extent variability from PLSR for the period 1999–2020

Фактор	Месяц	PLSR- коэффициент	VIP- оценки	Стабильность (по PLSR, %)	Вклад, %
Инерционность, L	Январь Февраль Март Апрель	+0.14	1.80	70	11.9
		+0.26	2.04	100	25.0
		+0.23	1.85	100	22.3
		+0.23	1.84	100	22.6
Теплосодержание, Q		+0.07	1.89	50	6.2
		−0.25	1.98	100	25.3
		−0.26	2.07	100	26.5
		−0.24	1.90	100	24.8
Поток тепла, Fh		−0.32	1.69	100	24.9
		−0.23	1.78	100	20.3
		−0.19	1.62	100	16.9
		−0.20	1.68	100	18.0
Приповерхностная температура воздуха, ПТВ		−0.53	2.30	50	30.7
		−0.24	1.84	100	15.8
		−0.23	1.87	100	15.2
		−0.26	2.09	100	17.5
Сумма факторов ($L + Q + Fh + \text{ПТВ}$)		—	—	—	73.7
					86.3
					80.8
					82.9

L – ледовитость в сентябре прошлого года в Гренландском море; Q – теплосодержание в сентябре прошлого года верхнего 300 м слоя в северной части Гренландского моря; Fh – интегральный поток тепла через пролив Фрама (возвратная ветвь Атлантических вод); ПТВ – приповерхностная температура воздуха в Северо-Европейском бассейне за период от 1 до 4 лет

L – ice extent in September last year in the Greenland Sea; Q – heat content in september last year of the upper 300-meter layer in the northern part of the Greenland Sea; Fh – an integral heat fluxes through the Fram Strait (recirculation Atlantic water); PTV – air-surface temperature in the North European basin period from 1 to 4 years

формированию теплового резервуара. В результате формируется слой накопленного тепла, который оказывает основное воздействие на ледяной покров в конце зимнего сезона.

По итогам анализа, уменьшение площади старых льдов обусловлено комбинацией четырёх процессов: атмосферное влияние (~15–30%); накопленное тепло океана (~6–27%); инерция ле-

дяного покрова (~11–25%); прямое термическое воздействие АВ (~17–25%). Суммарный вклад факторов в январе составляет 73.7%, а в остальные месяцы – более 80%. Это указывает на наличие дополнительных факторов, влияющих на изменчивость площади старых льдов, особенно в январе. Нелинейные эффекты взаимодействия предикторов между собой требуют дополнительного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ выявил пространственно-временную структуру влияния термического состояния океана на уменьшение площади старых льдов Гренландского моря. Корреляционный анализ продемонстрировал, что наиболее сильные отрицательные связи ($R \leq -0.70$) наблюдаются между теплосодержанием верхнего 300-метрового слоя в зоне влияния Западно-Шпицбергенского течения, пролива Фрама, Восточно-Гренландского течения и площадью старых льдов. Эти связи характеризуются короткими временными лагами (1–6 месяцев), что соответствует скорости распространения тепловых аномалий вдоль основных путей переноса АВ. Особенно выражено прямое термическое воздействие Западно-Шпицбергенского течения, где тепловые аномалии достигают границы льдов за 5–8 месяцев, вызывая таяние льда снизу.

Параллельно выявлен опосредованный механизм влияния с большими временными лагами (12–48 месяцев), связанный с трансформацией водных масс в Норвежском море. Корреляции с теплосодержанием в южной части Норвежского моря и Норвежского фронтального течения оказались слабее ($R \approx -0.55$), что объясняется длительным временем переноса тепловых аномалий и значительными теплопотерями (более 80%) при охлаждении вод на пути в Арктику. Данный механизм отражает включение трансформированных вод в Восточно-Гренландское течение через 1–2 года после их поступления через Фареро-Шетландский пролив, преимущественно в фазе положительного Северо-Атлантического колебания.

Исследование адвективных процессов выявило двойственную роль пролива Фрама как важного канала теплопереноса. Летне-осенние потоки тепла (особенно в августе) демонстрируют сильную отрицательную связь ($R = -0.59 \dots -0.65$) с площадью старых припайных льдов в феврале–апреле с лагом 6–8 месяцев. Эта запаздывающая реакция объясняется механизмом рециркуляции, при котором большая часть вод Западно-Шпицбергенского течения вовлекается в Восточно-Гренландское течение. Одновременно обнаружен механизм воздействия зимних потоков тепла через пролив Фрама (лаг 0–3 месяца), реализуемый через прямое таяние льда снизу.

Количественная оценка методом PLSR-регрессии и линейной регрессии выявила сезонную

изменчивость вклада ключевых факторов. В январе доминирующее влияние оказывает ПТВ (коэффициент -0.53), что подчёркивает роль зимнего атмосферного тепла в изменении площади ледяного покрова. С февраля по апрель возрастает значимость теплосодержания в Восточно-Гренландском течении (коэффициент до -0.26) и потоков тепла через пролив Фрама (коэффициент до -0.32). Положительный вклад предшествующей ледовитости (коэффициент до $+0.26$) подтверждает инерционность ледяного покрова.

Обобщая результаты, можно констатировать, что уменьшение площади старых припайных льдов Гренландского моря контролируется комбинацией четырёх основных процессов: прямого термического воздействия АВ (~ 17 – 25%), накопленного тепла в верхнем слое океана (~ 6 – 27%), атмосферного влияния (~ 15 – 30%) и инерции ледяного покрова (~ 11 – 25%).

Учёт выявленных временных лагов (1–6 месяцев для прямого воздействия тепла и 12–48 месяцев для трансформированных атлантических вод) и сезонной специфики вклада факторов позволяет повысить точность прогнозов ледовых условий. Особое внимание следует уделять мониторингу летне-осенних потоков тепла через пролив Фрама, которые служат надёжным предиктором зимней площади старых припайных льдов с заблаговременностью 6–8 месяцев. Дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на изучении нелинейных взаимодействий между выявленными факторами, особенно в контексте усиливающейся положительной обратной связи. Полученные количественные оценки вклада различных компонент системы создают основу для разработки более точных сценариев изменений ледяного покрова в условиях продолжающегося изменения климата.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-27-00221, <https://rscf.ru/project/24-27-00221/>.

Acknowledgements. The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-27-00221, <https://rscf.ru/project/24-27-00221/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Миронов Е.У., Егорова Е.С. Сезонные и межгодовые изменения возрастной структуры ледяного покрова Гренландского моря в зимний период // Метео-

- рология и гидрология. 2024. Т. 49. № 3. С. 221–229. <https://doi.org/10.3103/S1068373924030051>
- Abdi H. Partial least squares regression and projection on latent structure regression (PLS Regression) // Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics. 2010. V. 2. № 1. P. 97–106. <https://doi.org/10.1002/wics.51>
- Bashmachnikov I.L., Raj R.P., Golubkin P., Kozlov I.E. Heat transport by mesoscale eddies in the Norwegian and Greenland seas // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2023. V. 128. № 2. <https://doi.org/10.1029/2022JC018987>
- Beszczynska-Möller A., Fahrbach E., Schauer U., Hansen E. Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic Ocean, 1997–2010 // ICES Journal of Marine Science. 2012. V. 69. № 5. P. 852–863. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss077>
- Bianco E., Aulicino G., Fusco G., Zambianchi E., Budillon G. The role of upper-ocean heat content in the regional variability of Arctic sea ice at sub-seasonal timescales // The Cryosphere. 2024. V. 18. № 5. P. 2357–2379. <https://doi.org/10.5194/tc-18-2357-2024>
- CMEMS Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis // Электронный ресурс. <https://doi.org/10.48670/moi-00024> (Дата обращения: 11.02.2025).
- de Steur L., Hansen E., Mauritzen C., Beszczynska-Möller A., Fahrbach E. Impact of recirculation on the East Greenland Current in Fram Strait: Results from moored current meter measurements between 1997 and 2009 // Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2014. V. 92. P. 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.05.018>
- de Steur L., Sumata H., Divine D.V., Granskog M.A., Pavlova O. Upper Ocean warming and sea ice reduction in the East Greenland Current from 2003 to 2019 // Communications Earth & Environment. 2023. V. 4. № 1. P. 261. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00913-3>
- Gutjahr O., Mehlmann C. Polar lows and their effects on sea ice and the upper ocean in the Iceland, Greenland, and Labrador Seas // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2024. V. 129. № 7. <https://doi.org/10.1029/2023JC020258>
- Hansen M. W., Johannessen J.A., Dagestad K.F., Collard F., Chapron B. Monitoring the surface inflow of Atlantic Water to the Norwegian Sea using Envisat ASAR // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2011. V. 116. № C12. <https://doi.org/10.1029/2011JC007375>
- Hattermann T., Isachsen P.E., von Appen W.J., Albretsen J., Sundfjord A. Eddy-driven recirculation of Atlantic water in Fram Strait // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. № 7. P. 3406–3414. <https://doi.org/10.1002/2016GL068323>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022 // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2024. V. 150. № 764. P. 4014–4048. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Ingvaldsen R.B., Assmann K.M., Primicerio R., Fosheim M., Polyakov I.V., Dolgov A.V. Physical manifestations and ecological implications of Arctic Atlantification // Nature Reviews Earth & Environment. 2021. V. 2. № 12. P. 874–889. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00228-x>
- JCOMM Expert Team on Sea Ice. Sea-Ice Nomenclature: Snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature No. 259. Geneva, Switzerland, WMO-JCOMM, 2014. 121 p.
- Karam S., de Steur L., Hansen E., Koszalka I.M., Lavergne T., Sandven S. Continued warming of deep waters in the Fram Strait // Ocean Science. 2024. V. 20. № 4. P. 917–930. <https://doi.org/10.5194/os-20-917-2024>
- Karpouzoglou T., de Steur L., Hansen E., Lundesgaard Ø., Lind S., Moholdt V.H. Three forcing mechanisms of freshwater transport in Fram Strait // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2024. V. 129. № 8. <https://doi.org/10.1029/2024JC020930>
- Koszalka I., LaCasce J.H., Mauritzen C. In pursuit of anomalies – Analyzing the poleward transport of Atlantic Water with surface drifters // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2013. V. 85. P. 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.035>
- Luo M., Zhou C., Li M. Sea ice volume variability and its influencing factors in the Greenland Sea during 1979–2022 // Acta Oceanologica Sinica. 2025. V. 44. P. 65–79. <https://doi.org/10.1007/s13131-024-2389-5>
- Mauritzen C., Rudels B., Toole J. The Arctic and Subarctic oceans/seas // International Geophysics. Academic Press, 2013. V. 103. P. 443–470. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391851-2.00018-6>
- Morozov E.G., Frey D.I. Currents and Tides in the Fram Strait and Greenland Sea // Oceanology. 2024. V. 64. № 5. P. 658–669. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700160>
- Oldenburg D., Armour K.C., Thompson L., Bitz C.M. The respective roles of ocean heat transport and surface heat fluxes in driving Arctic Ocean warming and sea ice decline // Journal of Climate. 2024. V. 37. № 4. P. 1431–1448. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0399.1>
- Orvik K.A., Niiler P. Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic // Geophysical Research Letters. 2002. V. 29. № 19. P. 2-1–2-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015002>

- Polyakov I.V., Rippeth T.P., Fer I., Baumann T.M., Carmack E.C., Ivanov V.V., Janout M., Padman L., Pnyushkov A.V., Rember R. Intensification of near-surface currents and shear in the Eastern Arctic Ocean // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. № 16. e2020GL089469 p.
<https://doi.org/10.1029/2020GL089469>
- Rudels B., Korhonen M., Budéus G., Beszczynska-Möller A., Schauer U., Nummelin A., Quadfasel D., Valdimarsson H. The East Greenland Current and its impacts on the Nordic Seas: observed trends in the past decade // *ICES Journal of Marine Science*. 2012. V. 69. № 5. P. 841–851.
<https://doi.org/10.1093/icesjms/fss077>
- Schauer U., Beszczynska-Möller A., Walczowski W., Fahrbach E., Piechura J., Hansen E. Variation of measured heat flow through the Fram Strait between 1997 and 2006 // *Arctic–subarctic ocean fluxes: Defining the role of the northern seas in climate*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. P. 65–85.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_4
- Smedsrud L.H., Halvorsen M.H., Stroeve J.C., Zhang R., Kloster K. Fram Strait sea ice export variability and September Arctic sea ice extent over the last 80 years // *The Cryosphere*. 2017. V. 11. № 1. P. 65–79.
<https://doi.org/10.5194/tc-11-65-2017>
- Strehl A.M., Latarius K., Kanzow T. A 70-year perspective on water-mass transformation in the Greenland Sea: From thermobaric to thermal convection // *Progress in Oceanography*. 2024. V. 227. 103304 p.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103304>
- Walczowski W. Atlantic water in the Nordic Seas. Properties, Variability, Climatic Importance, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences. Berlin: Springer International Publishing, 2014. V. 174.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-01279-7>
- Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S., Mogensen K., Mayer M. The ECMWF operational ensemble reanalysis—analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment // *Ocean Science*. 2019. V. 15. № 3. P. 779–808.
<https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>

Citation: Lis N.A., Cherniavskaia E.A., Lebedev N.V., Egorova E.S., Sokolov A.A., Timokhov L.A. Effect of Heat Content and Heat Advection in the Greenland Sea on the Degradation of Old Ice. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2026, 66 (2): 335–347. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376526020089

Effect of Heat Content and Heat Advection in the Greenland Sea on the Degradation of Old Ice

© 2026 N. A. Lis^{a,*}, E. A. Cherniavskaia^a, N. V. Lebedev^a, E. S. Egorova^b,
A. A. Sokolov^a, L. A. Timokhov^a

^aState Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Marine Research Center, Moscow, Russia

*e-mail: nalis@aari.ru

Received October 15, 2025; revised November 25, 2025; accepted March 23, 2026

This study analyzes the impact of upper-ocean heat content (0–300 m) and heat advection on the decline of old fast ice extent in the Greenland Sea, a key region for Arctic–Atlantic water mass interaction. Based on a comprehensive analysis of observational data and the ERA5, ORAS5, and CMEMS Global Ocean Ensemble Physics reanalyses for the period 1996–2023, a strong link is established between the thermal state of the Nordic Seas and the reduction of old fast ice. The results identify the warming of Atlantic Water as the primary driver of ice degradation, with heat advection through the Fram Strait playing a critical role. Two dominant mechanisms are identified: a direct thermal influence from Atlantic Water with short time lags (1–6 months), realized through basal ice melt, and an indirect process involving water mass transformation in the Norwegian Sea, whose effects manifest over longer time scales (12–48 months). The application of PLSR regression revealed pronounced seasonal variability in these processes. This regime shift is characterized by weakened ocean stratification, an increased mixed layer depth, and intensified vertical heat exchange, which together amplify the degradation of old ice. The study provides a quantitative assessment of the relative contributions of heat content and integral heat fluxes to the degradation of old fast ice in the Greenland Sea, which is crucial for improving predictive models of ice cover extent under the changing Arctic climate.

Keywords: North European basin, heat content, ice thickness, age ice, fast ice, heat flows, atlantification

REFERENCES

- Mironov E.U., Egorova E.S. Seasonal and interannual variations in the Greenland Sea ice age composition in the winter period. *Meteorologiya i gidrologiya*. Russian Meteorology and Hydrology. 2024, 49 (3): 221–229. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2024-3-54-65> [In Russian].
- Abdi H. Partial least squares regression and projection on latent structure regression (PLS Regression). Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics. 2010, 2 (1): 97–106. <https://doi.org/10.1002/wics.51>
- Bashmachnikov I.L., Raj R.P., Golubkin P., Kozlov I.E. Heat transport by mesoscale eddies in the Norwegian and Greenland seas. *Journ. of Geophysical Research: Oceans*. 2023, 128 (2). <https://doi.org/10.1029/2022JC018987>
- Beszczynska-Möller A., Fahrbach E., Schauer U., Hansen E. Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic Ocean, 1997–2010. *ICES Journ. of Marine Science*. 2012, 69 (5): 852–863. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss077>
- Bianco E., Aulicino G., Fusco G., Zambianchi E., Budillon G. The role of upper-ocean heat content in the regional variability of Arctic sea ice at sub-seasonal timescales. *The Cryosphere*. 2024, 18 (5): 2357–2379. <https://doi.org/10.5194/tc-18-2357-2024>
- CMEMS Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis: official site. Retrieved from: URL: <https://doi.org/10.48670/moi-00024> (Last access: November 11, 2025)
- de Steur L., Hansen E., Mauritzen C., Beszczynska-Möller A., Fahrbach E. Impact of recirculation on the East Greenland Current in Fram Strait: Results from moored current meter measurements between 1997 and 2009. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2014, 92: 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2014.05.018>
- de Steur L., Sumata H., Divine D.V., Granskog M.A., Pavlova O. Upper Ocean warming and sea ice reduction in the East Greenland Current from 2003 to 2019. *Communications Earth & Environment*. 2023, 4 (1): 261. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00913-3>
- Gutjahr O., Mehlmann C. Polar lows and their effects on sea ice and the upper ocean in the Iceland, Greenland, and Labrador Seas. *Journ. of Geophysical Research: Oceans*. 2024, 129 (7): e2023JC020258. <https://doi.org/10.1029/2023JC020258>
- Hansen M.W., Johannessen J.A., Dagestad K.F., Collard F., Chapron B. Monitoring the surface inflow of Atlantic Water to the Norwegian Sea using Envisat ASAR. *Journ. of Geophysical Research: Oceans*. 2011, 116 (C12). <https://doi.org/10.1029/2011JC007375>
- Hattermann T., Isachsen P.E., von Appen W.J., Albretsen J., Sundfjord A. Eddy-driven recirculation of Atlantic water in Fram Strait. *Geophysical Research Letters*. 2016, 43 (7): 3406–3414. <https://doi.org/10.1002/2016GL068323>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society*. 2024, 150 (764): 4014–4048. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Ingvaldsen R.B., Assmann K.M., Primicerio R., Fossheim M., Polyakov I.V., Dolgov A.V. Physical manifestations and ecological implications of Arctic Atlantification. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2021, 2 (12): 874–889. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00228-x>
- JCOMM Expert Team on Sea Ice. Sea-Ice Nomenclature: Snapshot of the WMO Sea Ice Nomenclature No. 259. Geneva, Switzerland, WMO-JCOMM, 2014: 121 p.
- Karam S., de Steur L., Hansen E., Koszalka I.M., Laverne T., Sandven S. Continued warming of deep waters in the Fram Strait. *Ocean Science*. 2024, 20 (4): 917–930. <https://doi.org/10.5194/os-20-917-2024>
- Karpouzoglou T., de Steur L., Hansen E., Lundesgaard Ø., Lind S., Moholdt V.H. Three forcing mechanisms of freshwater transport in Fram Strait. *Journ. of Geophysical Research: Oceans*. 2024, 129 (8): e2024JC020930 p. <https://doi.org/10.1029/2024JC020930>
- Koszalka I., LaCasce J.H., Mauritzen C. In pursuit of anomalies – Analyzing the poleward transport of Atlantic Water with surface drifters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2013, 85: 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.035>
- Luo M., Zhou C., Li M. Sea ice volume variability and its influencing factors in the Greenland Sea during 1979–2022. *Acta Oceanologica Sinica*. 2025, 44: 65–79. <https://doi.org/10.1007/s13131-024-2389-5>
- Mauritzen C., Rudels B., Toole J. The Arctic and Subarctic oceans/seas. *International Geophysics*. Academic Press, 2013, 103: 443–470. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391851-2.00018-6>
- Morozov E.G., Frey D.I. Currents and Tides in the Fram Strait and Greenland Sea. *Oceanology*. 2024, 64 (5): 658–669. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700160>
- Oldenburg D., Armour K.C., Thompson L., Bitz C.M. The respective roles of ocean heat transport and surface heat fluxes in driving Arctic Ocean warming and sea ice decline. *Journ. of Climate*. 2024, 37 (4): 1431–1448. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0399.1>

- Orvik K.A., Niiler P. Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic. *Geophysical Research Letters*. 2002, 29 (19): 2–1–2–4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015002>
- Polyakov I.V., Rippeth T.P., Fer I., Baumann T.M., Carmack E.C., Ivanov V.V., Janout M., Padman L., Pnyushkov A.V., Rember R. Intensification of near-surface currents and shear in the Eastern Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters*. 2020, 47 (16): e2020GL089469. <https://doi.org/10.1029/2020GL089469>
- Rudels B., Korhonen M., Budéus G., Beszczynska-Möller A., Schauer U., Nummelin A., Quadfasel D., Valdimarsson H. The East Greenland Current and its impacts on the Nordic Seas: observed trends in the past decade. *ICES Journ. of Marine Science*. 2012, 69 (5): 841–851. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss077>
- Schauer U., Beszczynska-Möller A., Walczowski W., Fahrenbach E., Piechura J., Hansen E. Variation of measured heat flow through the Fram Strait between 1997 and 2006. *Arctic–subarctic ocean fluxes: Defining the role of the northern seas in climate*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008: 65–85. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6774-7_4
- Smedsrud L.H., Halvorsen M.H., Stroeve J.C., Zhang R., Kloster K. Fram Strait sea ice export variability and September Arctic sea ice extent over the last 80 years. *The Cryosphere*. 2017, 11 (1): 65–79. <https://doi.org/10.5194/tc-11-65-2017>
- Strehl A.M., Latarius K., Kanzow T. A 70-year perspective on water-mass transformation in the Greenland Sea: From thermobaric to thermal convection. *Progress in Oceanography*. 2024, 227: 103304. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2024.103304>
- Walczowski W. Atlantic water in the Nordic Seas. Properties, Variability, Climatic Importance, *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*. Berlin: Springer International Publishing. 2014: 174. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-01279-7>
- Zuo H., Balmaseda M.A., Tietsche S., Mogenssen K., Mayer M. The ECMWF operational ensemble reanalysis–analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment. *Ocean Science*. 2019, 15 (3): 779–808. <https://doi.org/10.5194/os-15-779-2019>