

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ГРЕНЛАНДСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

Исследования по проекту РНФ 22-27-00443 направлены на получение новых научных знаний об изменчивости состояния ледяного покрова Гренландского и Баренцева морей, а также на выявление способов адаптации к значительным изменениям ледовых условий в арктическом регионе при современных изменениях климата.

В настоящей статье представлены краткие результаты исследований по программе проекта в 2022–2023 годах. Известно, что ледяной покров Гренландского и Баренцева морей имеет определяющее значение в общей дисперсии колебаний площади морских льдов Северного Ледовитого океана (СЛО). Положение кромок дрейфующих льдов и площадь ледяного покрова достаточно быстро реагируют на внешние факторы. Толщина ледяного покрова (его возрастная структура) отражает их долгопериодные изменения и в значительной степени влияет на хозяйственную деятельность в высоких широтах (судоходство, рыболовство, геологоразведка, освоение континентального шельфа и др.). Все это определяет научную и практическую значимость работы.

Анализ сезонных колебаний ледовитости показал, что, несмотря на ее большую изменчивость, удается выделить классы подобных сезонных циклов. Для их классификации использовалась методология кластерного анализа, метод К-средних. Для Гренландского и Баренцева морей выделены три кластера. В первый кластер К1 вошли годы с наибольшей площадью льдов как в зимний, так и в летний периоды. Второй кластер К2 объединил годы средней ледовитости, а в третий кластер К3 вошли годы с наименьшей ледовитостью. Из анализа лет, вошедших в кластеры К1–К3 для обеих акваторий, следует, что подобие сезонных циклов на фоне малой и большой ледовитости сохраняется от одного сезона до нескольких лет. Причем для Гренландского моря установленная закономерность справедлива для всех выделенных кластеров, а для Баренцева моря закономерность справедлива для периодов малой ледовитости.

В межгодовой изменчивости ледовитости Баренцева моря выделены два периода: 1928–1985 годы и 1986–2022 годы. Условное разделение именно на такие периоды связано с тем, что, кроме результатов визуального анализа, учитываются результаты, представленные в ранее опубликованных работах по исследованию температуры, солёности, толщины перемешанного слоя воды и других параметров, в которых были выделены схожие периоды до и после середины 1980-х годов, но для всего СЛО. Для всех районов, как для лета, так и для зимы, отчетливо выделяется период относительно стабильной изменчивости ледовитости, в этот период линейный тренд является незначимым. При рассмотрении изменчивости площади льдов 1986–2022 годов хорошо, даже визуально, выделяется отрицательный линейный тренд за летний и зимний сезоны. При сравнении величины тренда за выделяемые периоды очевидна разница в многолетней изменчивости: за 36 лет (1986–2022) ве-

личина тренда площади льда Баренцева моря превысила таковую за предшествующие 58 лет (1928–1985) в 12 и 6,5 раз, в зимний и летний сезоны соответственно, что говорит о более интенсивном изменении ледовитости за период после 1986 года. Приведенные числовые оценки подтверждают в определенной степени адекватность разделения на предлагаемые периоды для последующего анализа. Тенденция климатических изменений площади льдов в Гренландском море схожа с тенденциями в Баренцевом море: в межгодовых изменениях выделяется отрицательный линейный тренд ледовитости. Уменьшение ледовитости Гренландского моря в зимний сезон происходит несколько интенсивнее, величина тренда больше, чем в летний. Вероятно, это связано с тем, что интенсивность притока теплых атлантических вод в Баренцево море усиливается, а в Гренландское море — ослабевает.

Выполнена оценка ледообмена Гренландского и Баренцева морей с соседними акваториями, при этом оценка скорости дрейфа льда определялась двумя способами на основе метода изобарического дрейфа и с использованием данных NSIDC. В течение всего года льды Арктического бассейна СЛО поступают в акваторию Гренландского моря через пролив Фрама, а через Датский пролив — выносятся в северную часть Атлантического океана. Наибольший расход льдов через пролив Фрама приходится на март, а минимальный ледообмен через пролив Фрама наблюдается в августе. Максимум ледообмена через Датский пролив приходится на февраль–март, а наименьший расход льдов наблюдается в августе–сентябре. В Баренцевом море наибольший ледообмен через пролив Шиллинга наблюдается в январе и марте, при этом преобладает вынос морских льдов за пределы акватории моря в Арктический бассейн СЛО. Минимальный расход льдов, близкий по значениям к нулю, отмечается в октябре. Сезонный ход ледообмена Баренцева моря через пролив Макарова определяется максимумом в период с декабря по апрель (преобладает принос льдов) и минимальным выносом льдов в сентябре–октябре. Через пролив Карские Ворота в зимние месяцы преобладает вынос льдов, а в летние месяцы небольшой принос льдов из Карского моря (рис. 1).

Анализ показал, что отмечается статистическая незначимость линейных и нелинейных трендов межгодовых изменений площади выносимых льдов на створах Датского пролива (Гренландское море) и пролива Карские Ворота (Баренцево море). Статистически значимые линейные и нелинейные тренды характерны для межгодовых изменений ледообмена на створах проливов Фрама (Гренландское море) и Макарова (Баренцево море). Отмечается увеличение расхода льдов на обоих створах: величины линейных трендов составляют +9 тыс. км² за ледовый сезон (пролив Фрама) и +3 тыс. км² за ледовый сезон (пролив Макарова), нелинейных — +29 тыс. км² за ледовый сезон и +12 тыс. км² за ледовый сезон со-

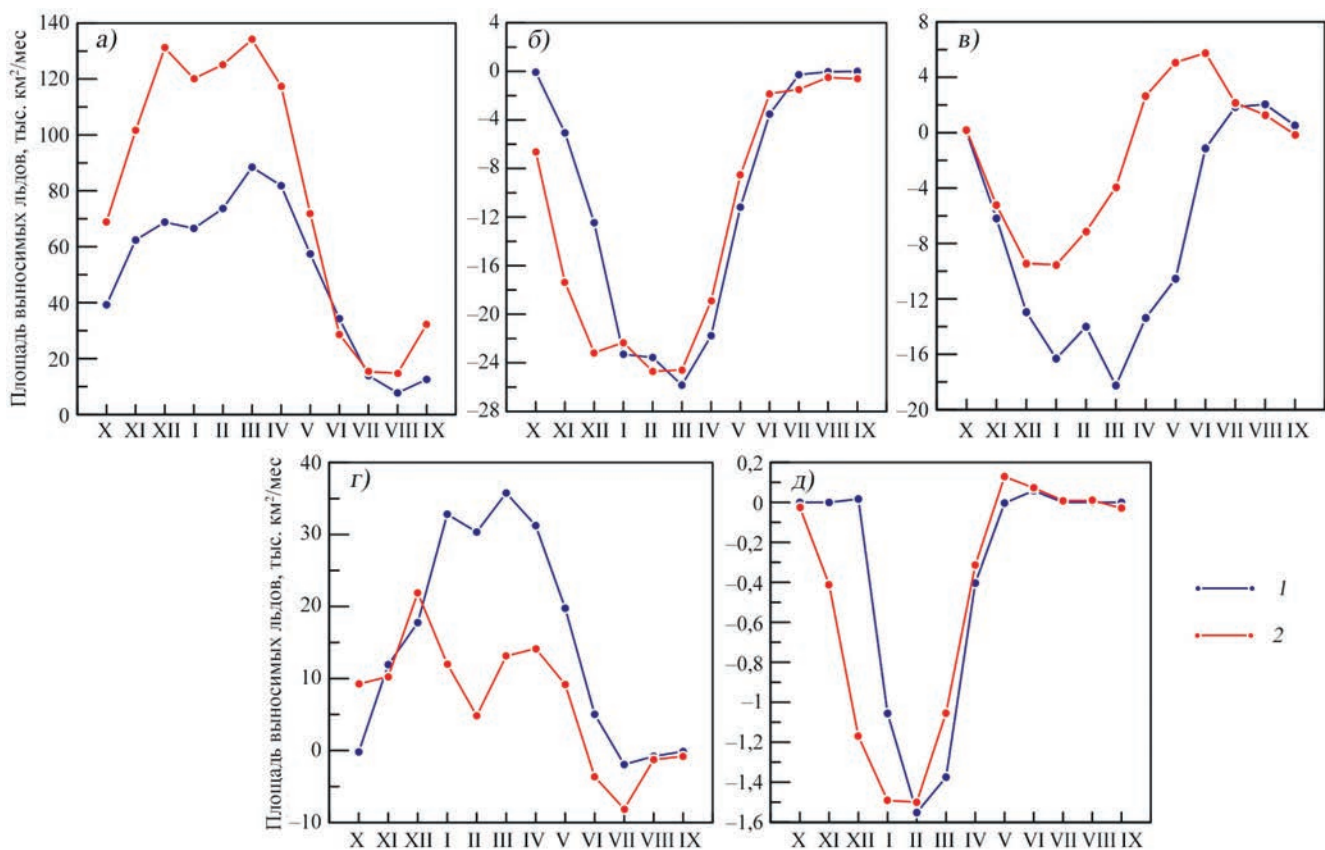


Рис. 1. Межгодовые изменения величины ледообмена по данным (1) NSDIC, (2) модели изобарического дрейфа через створы проливов: а) Фрама, б) Датского в Гренландском море и в) Шиллинга, г) Макарова, д) Карские Ворота в Баренцевом море в среднем за ледовые сезоны с 1979/80 года по 2021/22 год

ответственно. В проливе Шиллинга (Баренцево море) выделяется статистически значимый нелинейный тренд величиной -6 тыс. км² за ледовый сезон, а также статистически незначимый линейный тренд.

Впервые выполнена оценка структуры возрастного состава (толщины) ледяного покрова Гренландского и Баренцева морей в зимний период. Сезонные максимумы абсолютных значений площади распространения старых (многолетних) льдов наблюдаются в декабре и в апреле. Они соответствуют двум пикам в сезонном ходе ледообмена Гренландского моря через пролив Фрама, который и определяет количество старых льдов на акватории моря. В Гренландском море на протяжении всего зимнего периода года старые льды составляют не менее 30 % от общей площади морских льдов. Однако оценки, полученные авторами, показывают, что это значительно меньше, чем в период с 1989 по 1992 год, когда, по некоторым оценкам, старые льды занимали от 50 % до 65 % общего ледяного покрова акватории, в зависимости от месяца. Таким образом, произошло существенное сокращение относительного количества старых льдов в структуре ледяного покрова. В Баренцевом море наличие старых льдов становится редким явлением: их количество сохраняется на акватории в пределах от 1 % до 4 % от общей площади ледяного покрова района моря. Это существенно меньше, чем было в холодный период 1971–1976 годов, когда площадь старых льдов в западном районе Баренцева моря составляла в среднем 24 %.

При исследовании межгодовой изменчивости возрастного состава ледяного покрова Гренландского и Баренцева морей было установлено, что на фоне наблюдающегося сокращения общей площади ледяного покрова

на их акваториях площадь льдов различных возрастных градаций колеблется в пределах естественной изменчивости. Оценка статистической значимости линейных трендов показала, что за весь период наблюдений с 1997 по 2022 год все выделенные тренды оказались незначимыми. При этом сопоставление полученных оценок за период 1997–2022 годов с более ранними исследованиями возрастной структуры ледяного покрова исследуемых морей, 1989–1992 годы для Гренландского и 1971–1976 годы для Баренцева моря, говорит об уменьшении средней толщины ледяного покрова Гренландского и Баренцева морей.

Выявлены закономерности изменения положения границы преобладания старых льдов. В Гренландском море граница преобладания старых льдов в целом совпадает с областью распространения Восточно-Гренландского течения. Максимум распространения старых льдов приходится на апрель, минимум характеристики отмечается в октябре. В Баренцевом море в течение зимних месяцев граница преобладания старых льдов фиксируется за пределами границы моря. В пределах акватории Баренцева моря граница преобладания старых льдов располагается только при максимальном ее распределении: в ноябре фиксируется между параллелями 78° с. ш. и 80° с. ш., в то время как в феврале и апреле — между 76° с. ш. и 79° с. ш. (рис. 2).

Выявлены основные факторы, определяющие межгодовую изменчивость ледовитости Гренландского и Баренцева морей. Показано, что при ослаблении антициклона над Арктикой атлантическая воздушная масса вторгается в Европу и усиливает поток теплых и соленых вод Северной Атлантики в Северо-Европейский бассейн, что приводит к уменьшению ледовитости в Гренландском

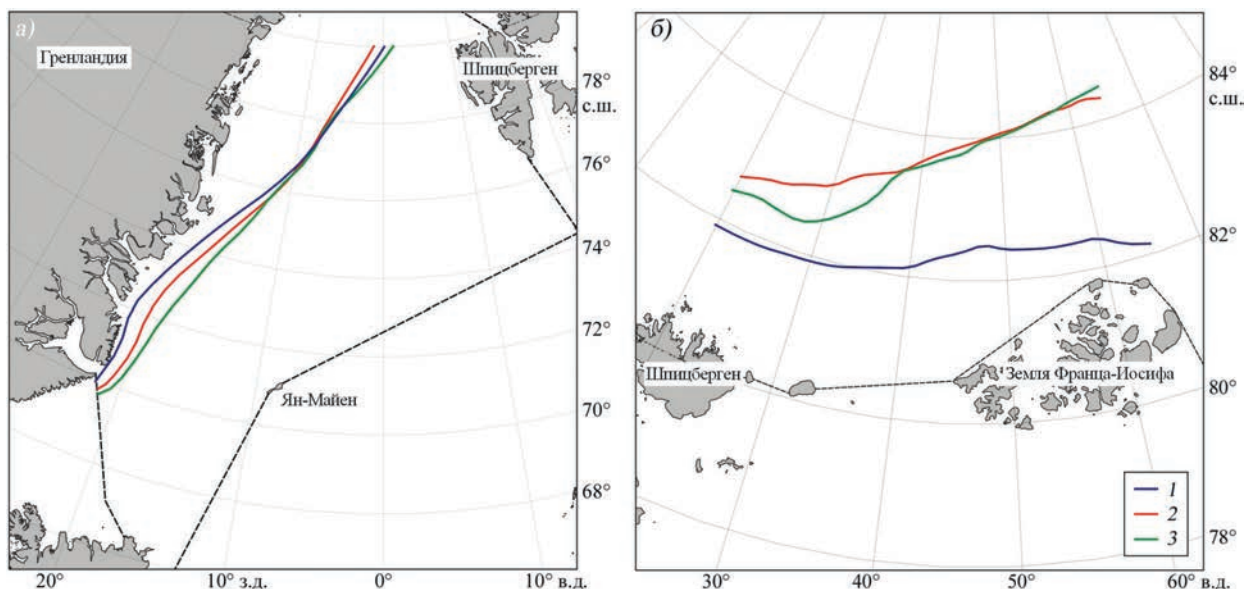


Рис. 2. Среднее положение границы преобладания старых льдов в (1) ноябре, (2) феврале и (3) апреле в: а) Гренландском море и б) Баренцевом море в среднем за ледовые сезоны с 1997/98 года по 2021/22 год. Черными пунктирными линиями обозначены границы морей

море. Обратная связь ледовитости с приповерхностной температурой атмосферы подтверждается высокими значимыми отрицательными коэффициентами корреляции с температурой воздуха, как в Гренландском, так и в Норвежском морях, которые сохраняются более года. Связь ледовитости Гренландского моря с характеристиками вод Северной Атлантики, выраженными индексом мультидекадной атлантической осцилляции АМО и поверхностным тепловым балансом в Норвежском море, также довольно тесная.

Показано, что наибольшая взаимосвязь ледовитости Баренцева моря с температурой атмосферы в Норвежском море отмечается с заблаговременностью 1 год. Подобный лаг во взаимосвязи процессов может помочь при составлении прогностических уравнений. Не менее важным является приток теплых и соленых вод из Северной Атлантики. Коэффициенты корреляции с индексом АМО значимы для всех сезонов с лагом до нескольких лет, что говорит о большем влиянии Северной Атлантики на ледовый режим Баренцева моря. Также выявлены значимые коэффициенты корреляции ледовитости с температурой поверхности океана в Норвежском море с запаздыванием в 1 год.

Кроме того, выявлены основные факторы, определяющие межгодовую изменчивость площади льдов разного возраста. В результате было установлено, что в Гренландском море протекающие атмосферные процессы на 75 % описывают межгодовые изменения возрастной структуры льдов на его акватории в период максимального развития ледяного покрова, являясь, таким образом, определяющим фактором, вне зависимости от включения в уравнение предыстории состояния ледяного покрова той или иной возрастной градации. Остальные 25 % приходятся на фактор приповерхностной температуры воздуха, от которого зависит площадь однолетних льдов в Гренландском море.

В Баренцевом море характер атмосферной циркуляции также является основным фактором, на 64 % определяющим межгодовые изменения возрастного состава ледяного покрова его акватории в апреле. Поступающие в Баренцево море воды атлантического происхождения в меньшей степени (на 27 %) воздействуют на долгопериодные колебания площади льдов различных

возрастных градаций — отмечается, что ледяной покров его западной части больше подвержен их влиянию, чем другие районы. Кроме того, в юго-восточном районе Баренцева моря площадь однолетних тонких льдов зависит от предшествующего состояния ледяного покрова.

На основе метода мультирегрессионного анализа путем перебора различных предикторов: гидрологических и метеорологических характеристик — построены статистические модели колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева моря. Основу уравнений составляют следующие факторы: предшествующее состояние ледовитости, приповерхностная температура воздуха, влияние поступления теплых атлантических вод и индексы атмосферной циркуляции. Выделена роль инсоляционной контрастности, которая влияет на изменчивость атмосферного переноса тепла в Арктику, обусловленную изменением атмосферной циркуляции в Северном полушарии. Эти изменения, в частности, являются результатом воздействия аномалий температуры поверхности океана на интенсивность атмосферной циркуляции. Полученные уравнения описывают от 76 % до 98 % от общей дисперсии ледовитости летнего сезона. Полученные статистические уравнения долгопериодных колебаний ледовитости Баренцева и Гренландского морей в зимний сезон имеют ошибки 3,5–4,5 %, что лишь незначительно выше, чем для уравнений летнего сезона, что также является высоким показателем качества уравнений.

На основе полученных результатов было опубликовано 6 статей в журналах «Проблемы Арктики и Антарктики», «Метеорология и гидрология», «Российская Арктика», «International Journal Offshore and Polar Engineering» и сделано 9 докладов на конференциях различного уровня.

Е.У. Миронов, Е.С. Егорова, Н.А. Лис (АНИИ)