

УДК 551.46.062.7

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ И ЕЁ КОРРЕЛЯЦИЯ С ТЕМПЕРАТУРОЙ ПОВЕРХНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАНАЛИЗА

© 2023 г. Е. В. Львова<sup>1,\*</sup>, Е. В. Заболотских<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: Lvova317@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2023 г.

После доработки 06.09.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

В работе анализируется изменчивость площади морского льда в Печорском море по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования и температуры поверхности Баренцева моря в его разных районах по данным реанализа ERA5 за 2002–2022 гг. Выявлена значительная корреляция между этими параметрами при использовании временного лага в два месяца и температуры Баренцева моря в его юго-восточном и юго-западном районах.

**Ключевые слова:** морской лёд, температура поверхности океана, Печорское море, Баренцево море, статистический анализ, AMSR, ERA5

**DOI:** 10.31857/S2076673423040105, **EDN:** YHBFVQ

### ВВЕДЕНИЕ

Морской лёд — один из ключевых компонентов климатической системы Земли. В среднем за год он покрывает около 25 млн км<sup>2</sup> с сезонными колебаниями  $\pm 3$  млн км<sup>2</sup>, что составляет  $7.2 \pm \pm 0.8\%$  площади Мирового океана (Котляков, 2012). В глубоководных районах океана образование морского льда может инициировать глубоководную конвекцию, которая обеспечивает вертикальный обмен химическими веществами и пополнение поверхностных вод питательными веществами и кислородом (Comiso, 2016). Сокращение арктического ледяного покрова — один из самых ярких показателей продолжающегося изменения климата (Landrum, Holland, 2020). Наряду с уменьшением ледяного покрова, как по ледовитости, так и по толщине (Stroeve, Notz, 2018; Шалина, 2021), сокращается площадь многолетних льдов (Tschudi et al., 2020), а сезон таяния расширяется (Meleshko et al., 2020). К причинам происходящих изменений ледяного покрова исследователи относят повышение температуры океана (Dai et al., 2019), перенос тепла океаном (Beer et al., 2020), атмосферный перенос (Bintanja et al., 2011), инсоляционный фактор (Федоров, 2020). Региональные особенности изменений ледяного покрова имеют большое значение при планировании любой активности в Арктической зоне, так как эти изменения существенно влияют не только на водные экосистемы (Maslanik et al.,

2011), а без анализа и прогноза ледяного покрова невозможно обеспечение безопасной народнохозяйственной деятельности на морских и прибрежных территориях.

В настоящее время для наблюдения за льдом и определения его параметров используется целый комплекс технологий, позволяющих получать спутниковые снимки различного типа, строить диагностические ледовые карты, а также прогнозировать динамику льдов на основе численных моделей. Микроволновые измерения вследствие своей всепогодности и независимости от солнечного освещения позволяют восстанавливать параметры ледяного покрова круглый год практически независимо от облачности (Шалина, 2021).

Юго-восточная часть Баренцева моря обладает уникальным набором океанографических, гидробиологических и климатологических параметров. Именно поэтому она выделяется как отдельный географический регион — Печорское море, являющееся крайним морем Полярного бассейна (Гидрометеорологические..., 1990). Площадь его акватории 81263 км<sup>2</sup>, наибольшая глубина 210 м.

Из-за недостатка данных и повышенного внимания к Баренцеву, а не внутреннему Печорскому морю, количество исследований, посвящённых изучению изменчивости ледяного покрова Печорского моря, крайне ограничено (Гидрометеорологические ..., 1990; Lundhaug, 2002; Печор-

ское ..., 2003; Ogorodov et al., 2005; Зубакин и др., 2015; Рябченко и др., 2020; Заболотских и др., 2021). Сведения о ледовых явлениях в Печорском море собраны в трудах, изданных Государственным океанографическим институтом СССР (Гидрометеорологические..., 1990), где описаны различные статистические характеристики ледовых процессов, происходящих в Печорском море, по материалам авиаразведок, судовых измерений, проводимых на береговых станциях и постах за период вплоть до 1985 г. Средние характеристики состояния ледяного покрова моря в последние десятилетия в зависимости от суровости зимних условий приведены в отчете (Рябченко, 2020). По данным отчёта в XXI в. в Печорском море отсутствовали суровые зимы, 25% зим были мягкими, а 65% – умеренными.

Сезонная и региональная изменчивость сплошности морского льда Печорского моря по данным радиолокаторов с синтезированной апертурой на спутниках Earth Resources Satellite с 1994 по 1998 г. была рассмотрена в работе (Lundhaug, 2002). Динамика морского льда в Печорском море зимой 2019/20 г. изучалась на основе спутниковых и модельных данных в работе (Заболотских и др., 2021). Проведённый в работе анализ позволил сделать вывод, что главной причиной нетипично молодого состава льдов к концу зимы 2019/20 г. и разрушения ледяного покрова на месяц раньше, чем традиционно в мягкие зимы, были сильные Северо-Атлантические циклоны, сопровождавшиеся развитием над Печорским морем штормовых ветров и положительными аномалиями температуры воздуха.

Г.К. Зубакин в своей работе (Зубакин и др., 2015) проводил исследования динамических характеристик дрейфа морского льда Печорского моря и течений на основании среднесуточных данных с притопленных буйковых автономных станций за период 2001–2003 гг. В результате исследований обнаружена корреляционная связь между течениями на горизонте 2 м, ветровым воздействием и дрейфом льда. Работа (Ogorodov et al., 2005) посвящена изучению воздействия арктических льдов на морское дно и прибрежные территории на примере Печорского моря по данным гидроакустической системы SONIC-2 и измерений, проводившихся на берегу моря. До настоящего времени многие аспекты динамических характеристик морских льдов в данном районе оставались неисследованными, либо базировались на редких данных натурных наблюдений ледовитости моря или данных ледовых наблюдений авиаразведок, которые проводились с 1914 г. С 1966 г. при составлении ледовых карт стали активно использоваться спутниковые данные (Фролов, Гудкович, 2007). Из последних опубликованных работ можно выделить (Lundhaug, 2002; Заболотских и др., 2021), в которых были

использованы данные об изменчивости сплошности морского льда Печорского моря, полученные с помощью спутникового зондирования (радиолокации и радиометрии). Однако Lundhaug анализирует данные с 1994 по 1998 г., а Заболотских рассматривает данные за сезон 2019/20 г., что не даёт представления о многолетней изменчивости ледяного покрова в акватории.

Поскольку Баренцево море является переходной областью между Северной Атлантикой и Арктическим бассейном, оно играет важную роль в водообмене между ними. Иногда при анализе гидрометеорологических условий Баренцева моря на основании анализа распределения различных океанографических и гидрометеорологических параметров выделяются отдельные районы с похожими условиями. Такой подход, например, был применён в работах (Шелкова, 2003; Skjoldal et al., 2019; Skagseth et al., 2020). В работе (Skagseth et al., 2020) описано разделение акватории Баренцева моря на районы с различными температурными режимами на глубинах 0–30 и 100–200 м. В монографии (Шелкова, 2003) описано разделение Баренцева моря на пять районов для анализа ветро-волнового режима Баренцева моря, а в каждом районе для последующего статистического анализа выделено несколько областей, представляющих особый интерес. В работе (Skjoldal et al., 2019) Баренцево море разделяли на 15 районов на основании различий в топографии дна.

В нашей работе акватория Баренцева моря для анализа была разделена на 4 района, существенно различающиеся по температуре поверхности: первый – северо-западный (средняя температура в июле 6°C, в сентябре 3°C); второй – северо-восточный (средняя температура в июле 3°C, в сентябре 0–1°C); третий – юго-западный (средняя температура в июле 8°C, в сентябре 4°C); четвёртый – юго-восточный (средняя температура в июле 5°C, в сентябре 3°C).

Для первого, северо-западного района, характерно поступление водных масс из северо-западной части Норвежского моря. Там поток вод разделяется на Западно-Шпицбергенское течение, втекающее в Арктический бассейн через пролив Фрама, и Нордкапское течение, втекающее в Баренцево море между о. Медвежий и Скандинавским полуостровом. В прикромочных ледовых зонах к северу и северо-востоку от Шпицбергена верхняя часть атлантических вод охлаждается и распресняется в процессе взаимодействия с атмосферой и ледяным покровом (Иванов и др., 2014). В итоге часть атлантических вод трансформируется в поверхностную Арктическую водную массу с низкими температурами и пониженной солёностью. Глубинная часть вод с положительной температурой и высокой солёностью, которую принято называть фрамовской ветвью атлантической

воды, вместе с трансформированным верхним слоем переносятся пограничным течением в генеральном направлении на восток вдоль континентального склона Евразии.

Второй район характеризуется холодными арктическими водными массами. Часть этих водных масс поступает в Баренцево море с севера, через желоба Виктория и Франц-Виктория, расположенные между архипелагами Шпицберген и Землёй Франца-Иосифа, а также с северо-востока через желоб Святой Анны в северной части Карского моря и проливом между Землей Франца-Иосифа и Новой Землей (Lind, Ingvaldsen, 2012).

Третий и четвёртый районы характеризуются постоянным притоком тёплых атлантических вод. Атлантическая вода, поступающая с Нордкапским течением в Баренцево море, так называемая баренцевоморская атлантическая вода, оказывает сильное отепляющее влияние на водные массы Баренцева моря (Arthun et al., 2012). В течение всего года максимальная температура воды наблюдается именно в юго-западной части моря. С июля по октябрь область максимальной температуры распространяется также и на юго-восточную часть моря. Распространяясь с помощью системы течений в восточном направлении, тёплые атлантические воды разветвляются в районе Новой Земли на две ветви: на север, к проливу между Землёй Франца-Иосифа и Новой Землёй и далее в восточном направлении, проникая через пролив Карские ворота в Карское море. Четвёртый район отличается от третьего района более низкими средними температурами, меньшими глубинами и дополнительным источником тепла в виде речного стока реки Печоры. Меньшие глубины приводят к более интенсивному летнему прогреву.

Существует большое количество исследований, посвящённых изучению изменений ледяного покрова Арктики за последние десятилетия под влиянием глобального потепления климата (Dai et al., 2019; Landrum, Holland, 2020). Однако работ, посвящённых анализу связи изменений ледовитости Печорского моря за последние десятилетия с изменениями температуры Баренцева моря, никто не проводил. Целью данной работы, кроме анализа ледовитости Печорского моря и температуры поверхностного слоя четырёх районов Баренцева моря, было выявление корреляции между этими двумя параметрами. Подобные исследования по поиску статистически значимых корреляций гидрометеорологических параметров и морского льда проводились в работах (Sorteberg, Kvingedal, 2006; Schlichtholz, Houssais, 2011; Arthun et al., 2012; Pavlova et al., 2014; Herbaut et al., 2015; Федоров, 2020).

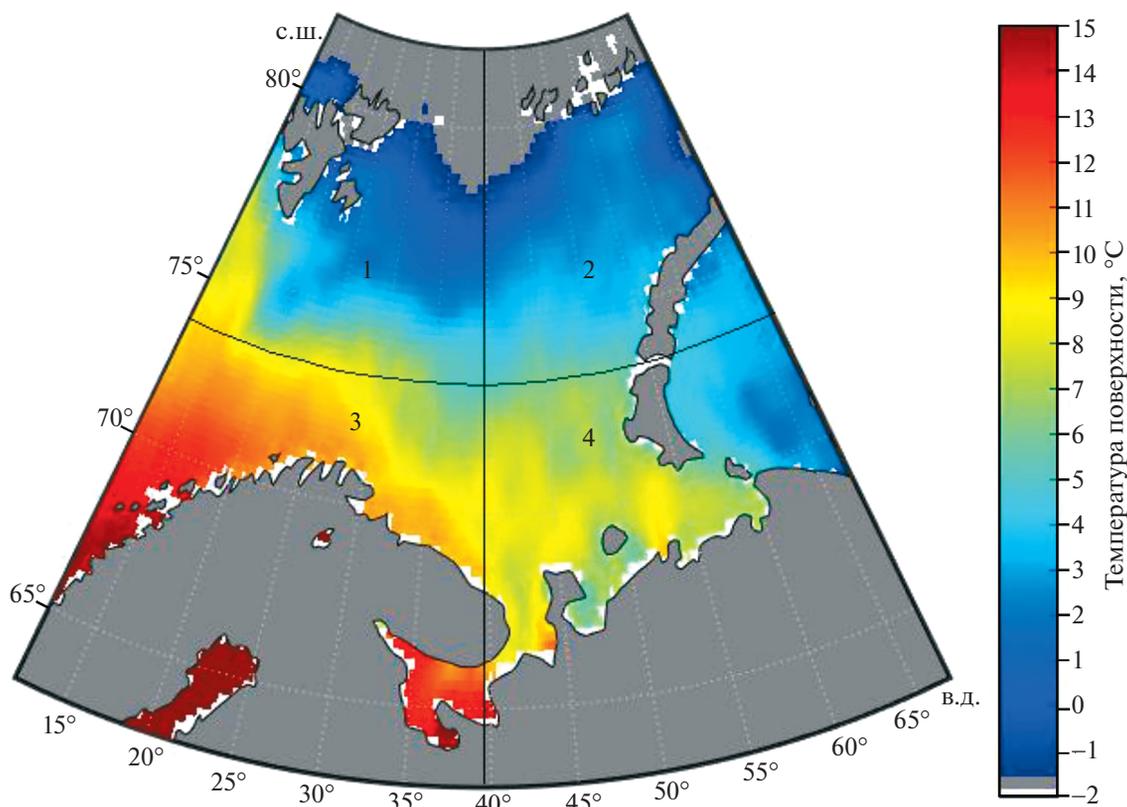
В работе (Pavlova et al., 2014) проведён корреляционный и регрессионный анализы ледовитости Баренцева моря, температуры поверхности Баренцева моря и градиентов атмосферного давления. Высокие значения корреляции между ледовитостью Баренцева моря и температурой Баренцева моря, а также атмосферным давлением и ледовитостью Баренцева моря за период 1979–2010 гг. обнаружены в апреле, низкие – в сентябре. При поиске корреляционных связей между параметрами, полученными в одно и то же время, часто не наблюдается значимых коэффициентов корреляции. В таких случаях в работах выдвигается гипотеза о том, что один из параметров может влиять на другой с определённой задержкой, и корреляционный анализ проводится для параметров с временным сдвигом (так называемым “временным лагом”).

Корреляционный анализ между площадью морского льда и температурой поверхности Баренцева моря с лагом в один год был рассчитан в работе (Schlichtholz, Houssais, 2011). Оптимальный временной лаг в один год определён и в работе (Arthun et al. 2012), где рассчитывались коэффициенты корреляции между притоком тёплых атлантических вод и изменчивостью ледовитости морского льда Баренцева моря. На основе анализа модельных значений притока тёплых вод из Атлантического океана в Баренцево море в работе установлено, что перенос тепла в западную часть Баренцева моря влияет на площадь моря, свободную ото льда. Работа (Sorteberg, Kvingedal, 2006) посвящена влиянию ветра на ледяной покров на протяжении недели и более на основании корреляционного анализа. Схожее исследование проведено в работе (Herbaut et al., 2015). В работе (Федоров, 2020) на основе корреляционного и регрессионного анализов получена оценка роли инсоляционного фактора в изменении площади морского льда в Российской Арктике, а также учёт сдвига инсоляции по фазе, которые влияли на межгодовую изменчивость площади льдов.

В задачи настоящей работы входит выявление влияния температуры Баренцева моря на ледовитость Печорского моря без учёта вклада других гидрометеорологических параметров, так как температура является одним из важнейших факторов формирования морского льда.

## ДАнные И МЕТОды

В работе использованы данные по среднесуточной сплочённости ледяного покрова Арктики, полученные в университете Бремена с помощью алгоритма ASI, применённого к измерениям спутниковых радиометров AMSR-E и AMSR2 (Spreen et al., 2008), доступным с пространственным разрешением 6.25 на 6.25 км. Точность алгоритма ASI зависит от ошибки яркостных темпе-



**Рис. 1.** Территориальное разделение акватории Баренцева моря на четыре сектора: 1 – Северо-западный район; 2 – Северо-восточный район; 3 – Юго-западный район; 4 – Юго-восточный.

**Fig. 1.** Territorial division of the Barents Sea into four sectors: 1 – Northwestern region; 2 – Northeast region; 3 – Southwestern region; 4 – Southeast.

ратур, от изменчивости связующих точек и непрозрачности атмосферы. Абсолютная ошибка при 0% сплочённости морского льда составляет 25% и уменьшается с увеличением сплочённости: при сплочённости 100% она составляет 5.7%. При сплочённости льда выше 65% ошибка составляет менее 10% (Sprreen et al., 2008).

Данные доступны, начиная с августа 2002 г. по настоящее время. С октября 2011 г. по август 2012 г. ни один из радиометров не работал, поэтому среднесуточные поля сплочённости морского льда анализировали с июня 2002 г. по декабрь 2022 г., исключая осень, зиму и весну сезона 2011/12 г. Площадь морского льда в ячейке рассчитана путём умножения площади каждой ячейки сетки на сплочённость морского льда в этой ячейке. Результирующую площадь льда в Печорском море рассчитывали как сумму ячеек площадей морского льда для области моря. Ячейки со сплочённостью морского льда меньше 15% не входили в учёт общей площади Печорского моря.

Масса Печорского моря составлена на основании географического описания гидронима (Постановление ЦИК от 28.11.1935). Границы Печорского моря проходят по линии от мыса Костин

Нос (архипелаг Новая Земля) по восточному побережью острова Колгуев, далее от мыса Святой Нос на восток по Тиманскому берегу континентальной России до Югорского полуострова и острова Вайгач.

Температура поверхностного слоя океана получена из базы данных реанализа ECMWF Reanalysis 5th Generation (ERA5) (Hersbach, 2020), полученных в рамках проекта Copernicus (Copernicus Climate Change Service). В работе применены среднесуточные данные реанализа ERA5 с июня 2002 по декабрь 2022 г., полученные путём осреднения почасовых данных. Акватория Баренцева моря была поделена на четыре сектора для корреляционного анализа между температурой поверхности Баренцева моря и площадью морского льда Печорского моря (рис. 1): первый – Северо-западный район; второй – Северо-восточный район; третий – Юго-западный район; четвёртый – Юго-восточный район.

Лёд в Печорском море формируется в осенний период (конец октября – начало ноября) и полностью вытает в конце весны – начале лета (конец мая – начало июня), поэтому ледяной покров в Печорском море имеет сезонный характер,

многолетнего льда в регионе нет. Под ледовым сезоном Печорского моря в данной работе понимается промежуток времени от начала образования льда до его полного вытаявания. Существует несколько подходов, использующихся при характеристике сезона как “тёплый” или “холодный” в зависимости от изменчивости ледяного покрова в данном сезоне. В настоящей работе тёплый и холодный сезоны определялись по значению средней площади ледяного покрова за весь сезон и отклонений его от среднего значения за весь рассматриваемый период.

Статистический анализ проводился для среднемесячных и сезонных данных (средних за сезон), с ноября по июнь (исключая месяцы, когда морской лёд в Печорском море отсутствует). Среднемесячные данные получены путём осреднения за месяц среднесуточных данных. Для расчёта коэффициентов корреляции между температурой поверхности Баренцева моря и площадью морского льда Печорского моря была использована формула для линейной корреляции Пирсона, где коэффициенты корреляции колеблются от  $-1.00$  до  $+1.00$  ( $-1.00$  означает строгую обратную корреляцию,  $+1.00$  — строгую положительную корреляцию,  $0.00$  говорит об отсутствии корреляции):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

Для определения уровня значимости коэффициента корреляции использовалась формула:

$$SL = P(T \geq |t|) + P(T \leq -|t|) = 2P(T \geq |t|),$$

где  $T$  подчиняется распределению Стьюдента с  $n-2$  степенями свободы, а значение величины  $t$  вычисляется в соответствии с формулой:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \sim t_{n-2} \quad (2)$$

В анализе использовалось среднее по площади района значение температуры поверхности Баренцева моря. Изначально рассчитывались коэффициенты корреляции между площадью морского льда Печорского моря и температурой поверхности четырёх районов Баренцева моря с разными временными лагами. Обнаружено, что без временного лага коэффициенты корреляции близки к нулю или ниже уровня значимости: температура поверхности океана влияет на ледовитость моря не мгновенно, а по прошествии определённого промежутка времени. Значения коэффициентов корреляции с лагом в два месяца были выше уровня значимости и такое запаздывание было определено как оптимальный временной

лаг. Значения корреляции с другими лагами были ниже уровня значимости, поэтому в дальнейшем анализе не рассматривались.

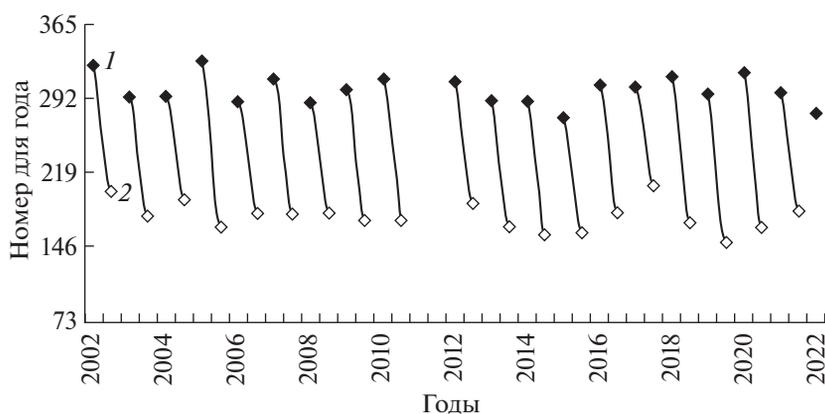
## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа изменчивости ледяного покрова Печорского моря построены карты сплочённости морского льда на акватории моря с июня 2002 по декабрь 2022 г. (за исключением сезона 2011/12 г.). Изменчивость ледяного покрова анализировалась визуально с использованием построенных карт. Методика определения дат очищения акватории от морского льда и начала процесса ледообразования методом визуального анализа заключалась в анализе временного ряда построенных карт сплочённости, позволяющем на основе наблюдаемой динамики сплочённости морского льда сделать соответствующие выводы.

В течение зимнего периода льды в море распространяются с юга на север и с востока на запад, пока не охватывают большую часть акватории. Замерзание в Печорском море обычно начинается в виде ниласовых льдов в восточной и юго-восточной частях моря — наиболее распределённых и мелководных, а именно в районах Печорской, Хайпудырской, Кузнецкой или Паханческой губ. В это же время наблюдается поступление льда через Новоземельский пролив из Карского моря. Устойчивый припай ежегодно устанавливается в бухтах на Новой Земле, вдоль материковых и островных берегов, у побережья о. Колгуев, а также в некоторых заливах побережья (Печорская губа, Хайпудырская губа).

Одна из характерных особенностей ледяного режима Печорского моря — большая межгодовая и сезонная изменчивость его ледовитости. В среднем, ледообразование в акватории моря начинается в конце октября — начале ноября, но сроки появления льда и образования сплошного ледяного покрова из года в год сильно колеблются. В декабре—январе в море наблюдаются полыньи размером до 200 км. В тёплые сезоны (2004/05, 2007/08, 2008/09, 2014/15 и 2018/19 гг.) размер полыней в несколько раз больше. По результатам визуального анализа карт сплочённости морского льда за рассматриваемый период полное очищение акватории ото льда наблюдается в конце июня (рис. 2), в среднем 24 июня. Процесс ледообразования начинается в конце октября — начале ноября (см. рис. 2), в среднем 5 ноября.

Наибольшая ледовитость Печорского моря наблюдается в конце зимнего — начале весеннего периодов. В начале июня лёд ещё присутствует на некоторых участках акватории, однако к концу месяца море полностью очищается ото льда, и с июля по сентябрь ледяной покров отсутствует. В аномально тёплые и холодные годы ледовитость



**Рис. 2.** Даты начала и конца ледообразования за 2002–2022 гг., за исключением сезона 2011–2012 гг. (в номерах дней от начала года): 1 – дата начала ледообразования в Печорском море, 2 – дата полного очищения акватории ото льда.

**Fig. 2.** Ice formation start and end dates for 2002–2022, except for the 2011–2012 season (in numbers of days from the beginning of the year): 1 – the date of the beginning of ice formation in the Pechora Sea, 2 – the date of the complete clearing of the water area from ice.

Печорского моря сильно отличается. В холодные сезоны (2002/03, 2003/04, 2006/07, 2009/10, 2013/14 и 2016/17 гг.) акватория моря была полностью покрыта льдом в среднем около 80 дней (например, в сезон 2003/04 г. – на протяжении 85 дней). В аномально тёплые годы это значение сокращается примерно вдвое и составляет всего 40 дней (например, в сезон 2008/09 г. лишь 43 дня).

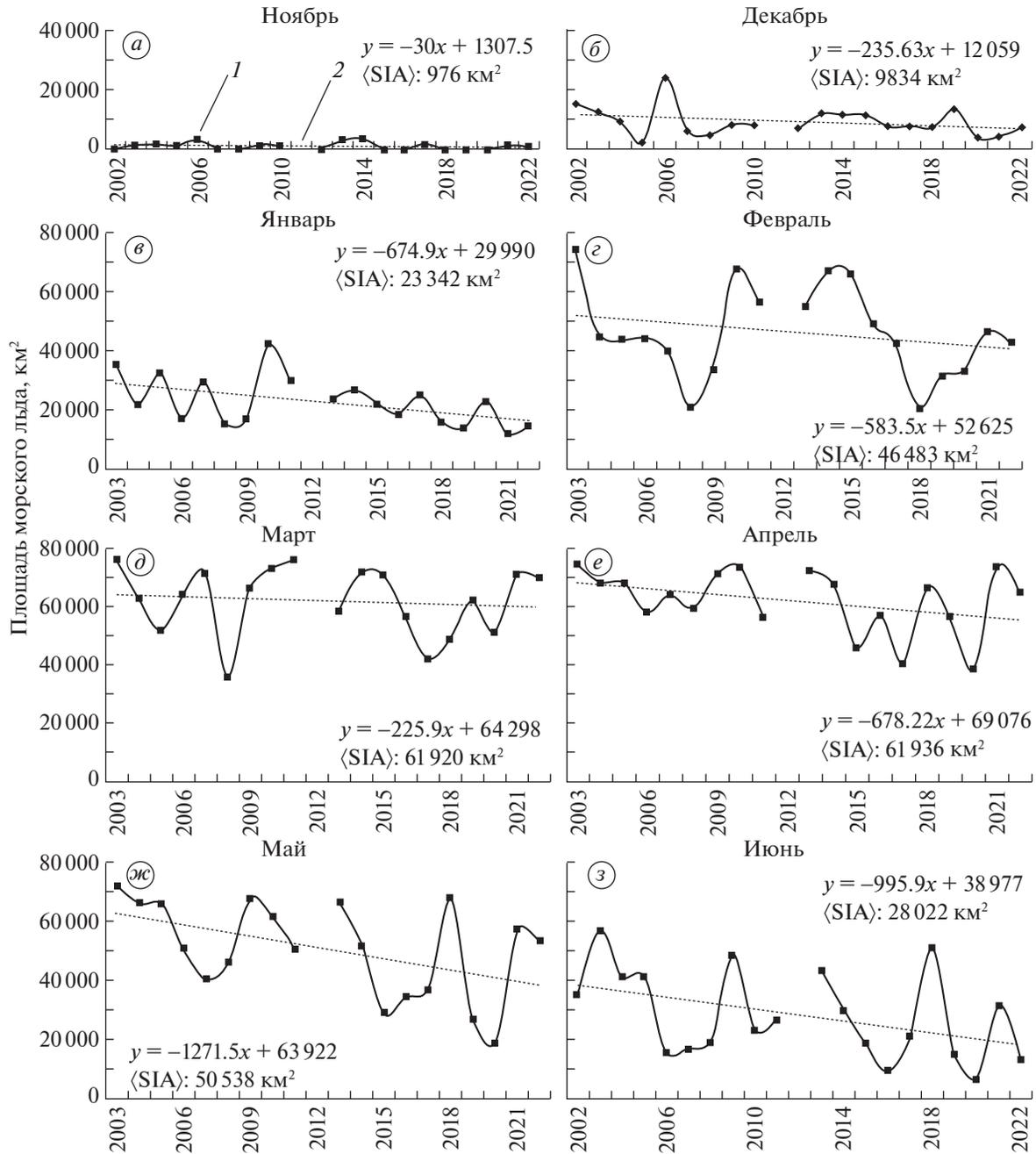
На рис. 3 показаны среднемесячные значения площади морского льда в Печорском море (далее – ПМЛ) с 2002 по 2022 г. с ноября до июня (с июля по сентябрь в Печорском море ледяной покров отсутствует). Они дают представление об изменчивости ледяного покрова Печорского моря за последние 20 лет.

Ноябрьские значения ПМЛ за рассматриваемый период 2002–2022 гг. составляют около 1% от общей площади акватории (рис. 4). В тёплые сезоны 2004/05, 2007/08, 2008/09, 2014/15 и 2018/19 гг. в ноябре лёд в Печорском море отсутствует. В декабре и январе морской лёд уже образуется на значительной площади моря (до 60%), но из-за большого количества полыней море полностью не покрывается льдом даже в холодные зимние сезоны (2002/03, 2003/04, 2006/07, 2009/10, 2013/14 и 2016/17 гг.). В годы с малыми значениями ПМЛ в декабре наблюдаются малые значения этого параметра и в другие месяцы (например, в 2007/08 и 2014/15 гг.). В феврале в большинстве рассмотренных сезонов море практически всегда покрыто льдом, за исключением тёплых сезонов 2007/08, 2018/2019 г., когда ПМЛ составляла около 25% от общей площади акватории Печорского моря. Низкие значения ПМЛ в феврале наблюдаются в 2018 г. (30% площади моря покрыто льдом). Анализ ПМЛ свидетельствует

о том, что площадь ледяного покрова Печорского моря наиболее изменчива в январе и феврале (стандартное отклонение составляет около 8 тыс. для января и около 15 тыс. для февраля).

Высокие значения изменчивости связаны с тем, что несмотря на то, что к этому времени лёд обыкновенно уже полностью покрывает акваторию Печорского моря, в тёплые годы появлялись протяжённые полыньи (до 400 км), уменьшающие общее значение ПМЛ. В феврале 2014 г. значения ПМЛ были выше среднего на 50%. Это связано с тем, что несмотря на то, что зимний сезон этого года был тёплым, в Печорском море не наблюдалось ни сильных ветров, ни полыней большего размера (более 50 км<sup>2</sup>). Полыньи влияют на изменчивость ПМЛ и в другие месяцы, например, в тёплые 2007/08 и 2018/19 гг. в феврале и марте появлялось много обширных полыней, уменьшающих ПМЛ. Март и апрель – месяцы с наибольшей ледовитостью, когда море полностью покрыто льдом, за исключением тёплых лет. В мае в море начинается процесс таяния (значение ПМЛ составляет около 35%) и к середине – концу июня море полностью очищается ото льда. Минимальные значения ПМЛ в марте, апреле и мае были отмечены в сезон 2020/21 г. На протяжении всех месяцев рассматриваемого периода в ПМЛ наблюдается отрицательный тренд, который соответствует общему потеплению и уменьшению ледяного покрова Арктики (Dai et al., 2019; Landrum, Holland, 2020).

По результатам анализа данных аномально низкая ледовитость Печорского моря отмечалась в зимние сезоны 2004/05, 2007/08, 2008/09, 2014/15 и 2018/19 гг., а высокая ледовитость была отмечена в зимние сезоны 2002/03, 2003/04, 2006/07, 2009/10, 2013/14 и 2016/17 гг.



**Рис. 3.** Значения площади морского льда за период 2002–2022 гг. с ноября по июнь: 1 – значения площади морского льда; 2 – линейный тренд площади морского льда; <SIA> – средняя площадь морского льда.

**Fig. 3.** Sea ice area values for the period 2002–2022 from November to June: 1 – sea ice area values; 2 – linear trend of sea ice area; <SIA> is the mean of the sea ice area.

Для анализа изменчивости температуры поверхности Баренцева моря (далее – ТПО) построены карты полей температуры Баренцева моря с июня 2002 по декабрь 2022 г. Максимальная температура воды наблюдается в юго-западной части моря в районе BSO (Barents Sea Opening), южнее архипелага Шпицберген, где тёплые атлантические воды приносятся в Баренцево море. Осенью

и зимой температура колеблется от 0 до +6°C, летом в этом районе наблюдаются температуры +10...+13°C, в аномально тёплые годы температура достигает +15°C. С июля по октябрь язык тепла распространяется также и на акваторию Печорского моря. Относительная мелководность Печорского моря способствует более интенсивному летнему прогреву. Дополнительным источником

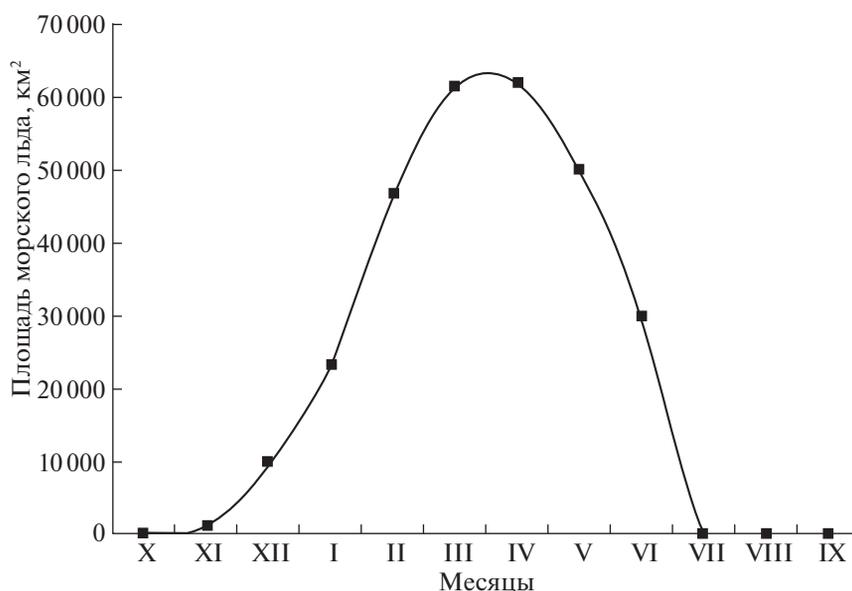


Рис. 4. Среднемесячные значения площади морского льда в Печорском море за период 2002–2022 гг.  
 Fig. 4. Monthly averages of Pechora Sea ice area for the period 2002–2022.

повышения температуры служит речной сток р. Печоры, влияние которого заметно в июле–августе в районе Печорской губы.

Корреляционный анализ между ПМЛ Печорского моря и ТПО Баренцева моря был проведён по методу Пирсона (формула 1). На графиках распределения корреляции (рис. 5) выделяются несколько секторов с высокой значимостью коэффициентов корреляции: юго-западный, северо-западный и юго-восточный. Критическое значение значимости корреляции составило 0.24.

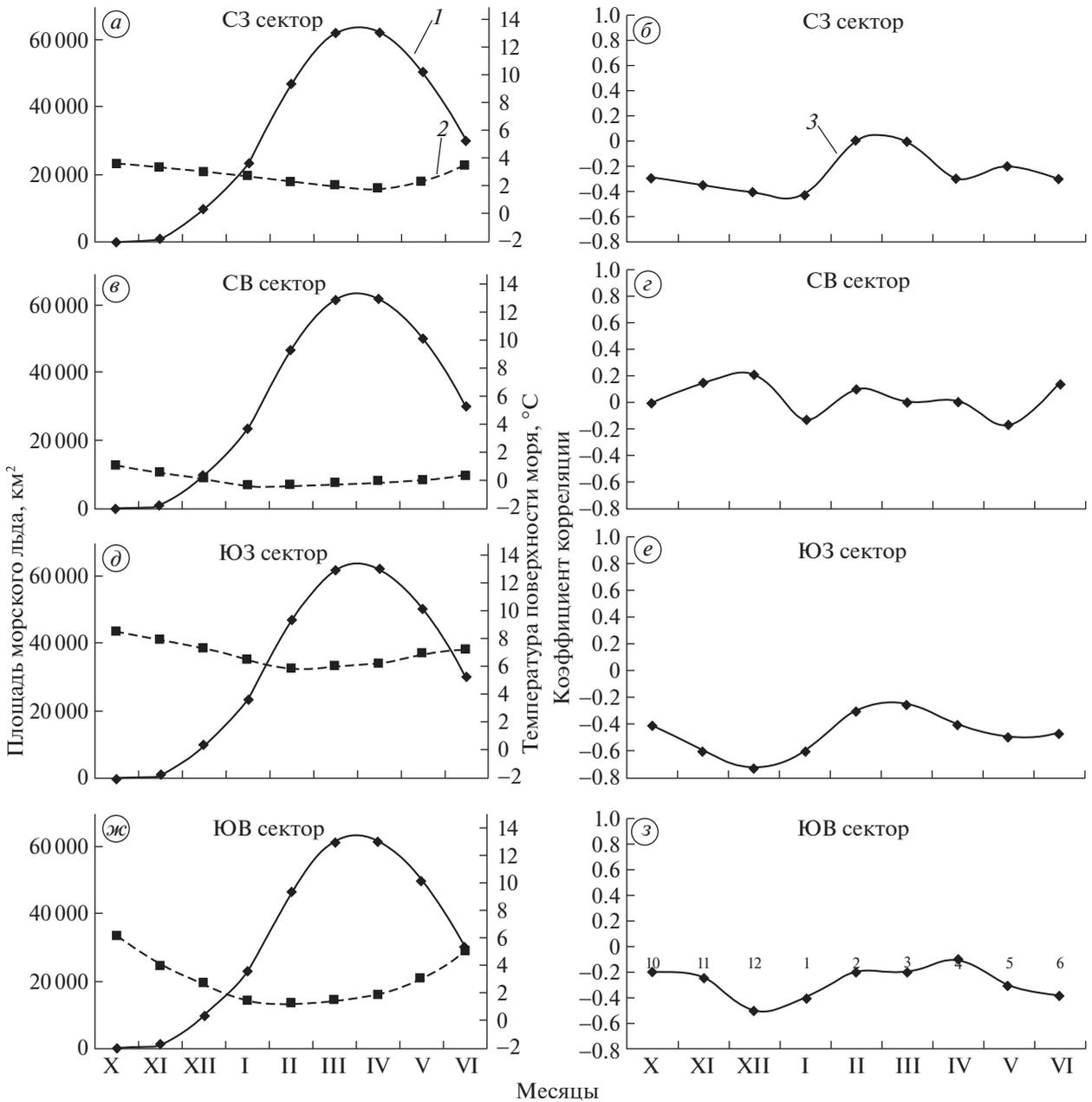
Для ТПО северных секторов Баренцева моря и ПМЛ Печорского моря за девять месяцев с 2002 по 2022 г. не наблюдалось высоких значений коэффициентов обратной корреляции. Для северо-западного сектора в январе отмечается корреляция ( $k$ ) в  $-0.47$ , что можно объяснить периодическим расширением притока тёплых вод в северную часть моря, в район о. Медвежий. В остальное время значения коэффициентов корреляции близки к нулю и не являются значимыми. Корреляция между ПМЛ Печорского моря и ТПО Баренцева моря в южных секторах существенно выше. Высокие значения коэффициентов обратной корреляции между ТПО юго-западного сектора Баренцева моря и ПМЛ Печорского моря наблюдаются с ноября по февраль:  $k = -0.6 \dots -0.73$ . В феврале–марте эти значения близки к нулю; это объясняется тем, что к этому моменту практически всегда (за исключением тёплых сезонов 2007/08 и 2014/15 гг.) акватория Печорского моря уже полностью покрыта льдом. С апреля между ПМЛ и ТПО вновь обнаруживается высокая об-

ратная корреляция. Для юго-восточного сектора высокие значения коэффициентов обратной корреляции отмечаются в зимний период — в декабре и составляют  $-0.51$ , в январе–марте они близки к нулю, а затем  $k = -0.4$ .

Высокая обратная корреляция между ТПО Баренцева моря и ПМЛ Печорского моря также наблюдается в северо-западном и юго-западном секторах при анализе сезонной изменчивости (рис. 6). Высокая обратная корреляция отмечается для 2006/07 и 2017/18 гг. в северо-западном ( $-0.6$  и  $-0.69$  соответственно) и юго-западном секторах ( $-0.81$  и  $-0.8$  соответственно). В юго-восточном и северо-восточном секторах значения корреляции не превышают коэффициентов значимости. Коэффициенты обратной корреляции для северо-восточного сектора колеблются от  $-0.17$  в 2003 г. до  $-0.22$  в 2007 г. В целом значения обратной корреляции для разных секторов Баренцева моря хорошо коррелируют с областями распространения тёплых вод и их средней температурой. В годы с высокой средней температурой Баренцева моря в юго-западном и северо-западном секторах (2007/08, 2014/15 и 2018/19 гг.) наблюдались низкие значения ПМЛ Печорского моря.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с использованием спутниковых данных по сплочённости ледяного покрова и данных реанализа по температуре поверхности океана проанализирована изменчивость ледяного покрова Печорского моря и температуры поверхно-

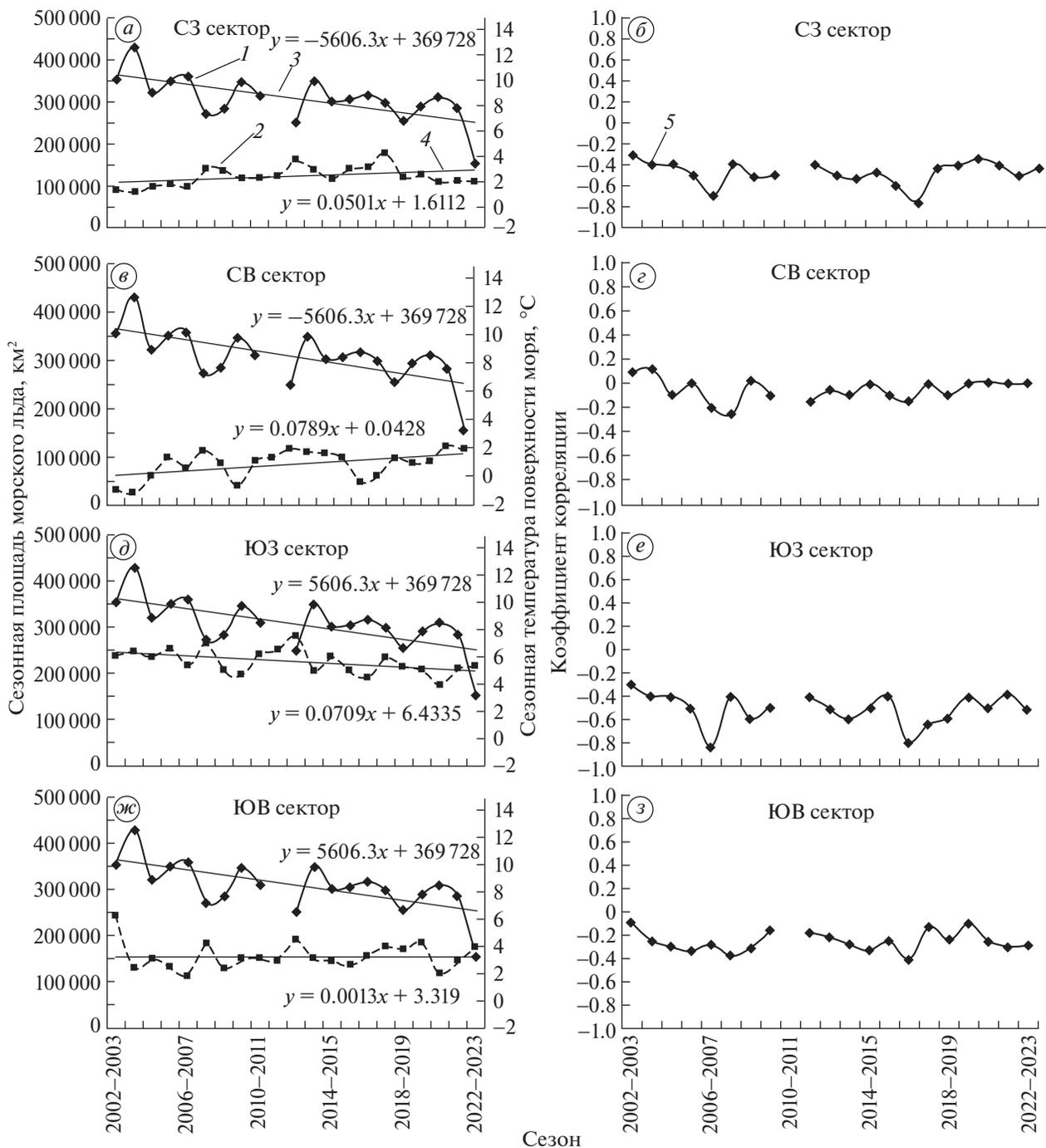


**Рис. 5.** Среднемесячные значения температуры поверхности Баренцева моря, площади ледяного покрова в Печорском море и коэффициента корреляции для разных секторов Баренцева моря с временным лагом в два месяца: 1 – площадь морского льда; 2 – температура поверхности океана; 3 – коэффициент корреляции между площадью морского льда Печорского моря и температурой поверхности сектора Баренцева моря.

**Fig. 5.** Monthly mean values of the Barents Sea surface temperature, Pechora sea ice area and the correlation coefficients for different sectors of the Barents Sea with a time lag of two months: 1 – sea ice area; 2 – sea surface temperature; 3 – correlation coefficient between the Pechora sea ice area and the surface temperature of the Barents Sea sector.

сти Баренцева моря за период 2002–2022 гг., а также корреляция между этими двумя параметрами. Замерзание Печорского моря происходит с юга на север, с востока на запад в конце октября–начале ноября. В аномально тёплые годы в море есть полынь размером до 400 км. Наибольшая ледовитость моря характерна для конца зимне-

го – начала весеннего сезона, к июню море полностью очищается ото льда. Низкая ледовитость Печорского моря отмечалась в зимние сезоны 2004/05, 2007/08, 2008/09, 2014/15 и 2018/19 гг.; высокая ледовитость отмечена в зимние сезоны 2002/03, 2003/04, 2006/07, 2009/10, 2013/14 и 2016/17 гг. На протяжении всего рассматриваемо-



**Рис. 6.** Сезонные значения температуры поверхности Баренцева моря, площади морского льда Печорского моря и коэффициенты корреляции в разных секторах с временным лагом в два месяца: 1 – площадь морского льда; 2 – температура поверхности океана; 3 – линейный тренд площади морского льда; 4 – линейный тренд температуры поверхности моря; 5 – коэффициент корреляции между площадью морского льда Печорского моря и температуры поверхности сектора Баренцева моря.

**Fig. 6.** Season values of Barents Sea surface temperature, Pechora Sea ice area and correlation coefficients in different sectors with a time lag of two months: 1 – sea ice area; 2 – sea surface temperature; 3 – linear trend of sea ice area; 4 – linear trend of sea surface temperature; 5 – correlation coefficient between the Pechora Sea ice area and the surface temperature of the Barents Sea sector.

го периода наблюдается отрицательный тренд площади морского льда. Температура Баренцева моря за рассматриваемый период осенью и зимой колеблется от 0 до +6°C, летом средняя темпера-

тура в разных частях акватории составляет +10...+13°C, причём юго-западная часть имеет более высокую температуру по сравнению с северной и северо-восточной.

Коэффициенты корреляции были рассчитаны с временным лагом в два месяца, обусловленным временем достижения тёплыми водами акватории Печорского моря. Анализ значений коэффициентов корреляции между ТПО Баренцева моря и ПМЛ Печорского моря показал, что высокие значения коэффициентов обратной корреляции наблюдаются между значениями ТПО северо-западного и юго-западного секторов и ПМЛ (до  $-0.8$ ), корреляция между северо-восточным и юго-восточным секторами выражена намного слабее. В октябре наиболее высокая обратная корреляция наблюдается для северо-западного и юго-западного секторов (до  $-0.4$ ). До декабря корреляция нарастает и достигает максимального значения для юго-западного сектора (до  $-0.73$ ), после чего уменьшается и до марта имеет значения, близкие к нулю. В апреле значения обратной корреляции ( $-0.39$  для юго-западного сектора) вновь растут вплоть до июня.

При анализе сезонной изменчивости высокая обратная корреляция также между ТПО Баренцева моря и ПМЛ Печорского моря также наблюдается в северо-западном и юго-западном секторах. Высокие значения отмечаются для северо-западного (до  $-0.69$ ) и юго-западного (до  $-0.81$ ) секторов в 2006/07 и 2017/18 гг. Коэффициенты корреляции для северо-восточного и юго-восточного секторов не превышали коэффициентов значимости. Значения обратной корреляции для разных секторов Баренцева моря коррелируют с областями распространения тёплых вод и средней температурой. Так, в 2007/08 и 2018/19 гг. с высокой средней температурой Баренцева моря наблюдались низкие значения ПМЛ Печорского моря.

**Благодарности.** Исследования, представленные в данной статье, выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-17-00236. Работа серверного оборудования для расчётов с использованием спутниковых данных финансировалась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 0763-2020-0005.

**Acknowledgments.** This research was funded by Russian Science Foundation, grant number 19-17-00236. Satellite data processing with powerful server facilities was supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russia through the State assignment 0763-2020-0005.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море / Ред. Г.В. Гирдюк. Л.: Гидрометеоздат. 1990. 280 с.
- Заболотских Е.В., Балашова Е.А. Динамика морского льда в Печорском море зимой 2019/2020 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14.

№ 1. С. 97–105.

<https://doi.org/10.7868/S207366732101010X>

- Зубакин Г.К., Сухих Н.А., Иванов Н.Е., Нестеров А.В., Гудошников Ю.П. Изменчивость и сопряженность скорости течения, дрейфа льда и ветра в Печорском море в 2001–2003 гг. // Труды Международной конференции и выставки по освоению нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа RAO/CIS Offshore. Санкт-Петербург, 2015. С. 610–615.
- Иванов В.В., Алексеев В.А., Репина И.А. Возрастание воздействия атлантических вод на ледяной покров Северного Ледовитого океана // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: Тр. между. конф. памяти академика А.М. Обухова. М.: ГЕОС, 2014. С. 267–273.
- Котляков В.М. Морской лёд. // Большая российская энциклопедия. Т. 21. М.: БРЭ, 2012, с. 172.
- Печорское море. Системные исследования (гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социальноэкономические проблемы) / Ред. Е.А. Романкевич. М.: "Море". 2003. 486 с.
- Рябенко С.В., Драчкова Л.Н., Евдокимова И.О., Зарубина Л.А., Попкова С.В. Тематический отчёт № 2 по ледовым условиям Печорского моря. Архангельск: САФУ, 2020. 40 с.
- Федоров В.М., Гребенников П.Б., Фролов Д.М. Оценка роли инсоляционного фактора в изменениях площади морских льдов в российской Арктике // Криосфера Земли. 2020. Т. 14. № 3. С. 38–50. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(38-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50))
- Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалёв Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике / Ред. И.Е. Фролова, В.П. Карклина. СПб.: Наука, 2007. 135 с.
- Шалина Е.В. Региональные особенности изменения ледовой обстановки в морях российской Арктики и на трассе Северного морского пути по данным спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 201–213.
- Arthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat // Journ. of Climate. 2012. V. 25. № 13. P. 4736–4743. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00466.1>
- Beer E., Eisenman I., Wagner T.J.W. Polar amplification due to enhanced heat flux across the halocline // Geophys. Research Letters. 2020. V. 47. № 4. <https://doi.org/10.1029/2019GL086706>
- Bintanja R., Graverson R., Hazeleger W. Arctic winter warming amplified by the thermal inversion and consequent low infrared cooling to space // Nature Geoscience. 2011. V. 4. P. 758–761. <https://doi.org/10.1038/ngeo1285>
- Comiso J.C. Global Surface Temperature Trends and Arctic Amplification // AGU Fall Meeting Abstracts. 2016.
- Copernicus Climate Change Service // Электронный ресурс. <https://climate.copernicus.eu/> (Дата обращения: 15.07.2023)

- Dai A., Luo D., Song M., Jiping L. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO<sub>2</sub>. // *Nature Communications*. 2019. V. 10. № 121. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>
- Herbaut C., Houssais M., Close S., Blaizot A. Two wind-driven modes of winter sea ice variability in the Barents Sea // *Deep Sea Research*. 2015. V. 106. P. 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.10.005>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Landrum L., Holland M.M. Extremes become routine in an emerging new Arctic // *Nature Climatology Change*. 2020. V. 10. P. 1108–1115. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0892-z>
- Lind S., Ingvaldsen R.B. Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north // *Deep Sea Research*. 2012. V. 62. P. 70–88. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.12.007>
- Lundhaug M. ERS SAR studies of sea ice signatures in the Pechora Sea and Kara Sea region. // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2002. V. 28. № 2. P. 114–127. <https://doi.org/10.5589/m02-022>
- Maslanik J., Stroeve J., Fowler C., Emery W. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011 // *Geophys. Research Letters*. 2011. V. 38. <https://doi.org/10.1029/2011GL047735>
- Meleshko V.P., Pavlova T., Bobylev L.P., Golubkin P. Current and Projected Sea Ice in the Arctic in the Twenty-First Century. *Sea Ice in the Arctic: Past, Present and Future* // Springer Nature. 2020. P. 399–463.
- Ogorodov S.A., Kamalov A.M., Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P. The role of sea ice in coastal and bottom dynamics in the Pechora Sea // *Geo-Marine Letters*. 2005. V. 25. № 2. P. 146–152. <https://doi.org/10.1007/s00367-004-0196-8>
- Pavlova O., Pavlov V., Gerland S. The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach // *Journ. of Marine Systems*. 2014. V. 130. P. 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.011>
- Schlichtholz P., Houssais M.-N. Forcing of oceanic heat anomalies by air-sea interactions in the Nordic Seas area // *Journ. of Geophys. Research*. 2011. V. 116. <https://doi.org/10.1029/2009JC005944>
- Skagseth Ø., Eldevik T., Arthun M. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine // *Nature Climate Change*. 2020. V. 10. P. 661–666. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0772-6>
- Skjoldal H.R., Fuglestad J.L., Benestad R., Ivanov V., Jørgensen L.L., Kovacs K.M., Nilssen F., Tchernova J. Ecosystems of the Barents Sea Region. *Governing Arctic Seas: Regional Lessons from the Bering Strait and Barents Sea*. Switzerland: Springer Nature. 2019. P. 119–142. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25674-6>
- Sorteberg A., Kvingedal B. Atmospheric Forcing on the Barents Sea Winter Ice Extent // *Climate*. 2006. V. 19. P. 4772–4784.
- Stroeve J., Notz D. Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environmental Research Letters*. 2018. V. 13. № 10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tschudi M.A., Meier W.N., Stewart J.S. An enhancement to sea ice motion and age products at the National Snow and Ice Data Center (NSIDC). // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. № 5. P. 1519–1536. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1519-2020>

**Citation:** Lvova E.V., Zabolotskikh E.V. Variability of the Pechora Sea ice area and its correlation with the Barents Sea surface temperature according to satellite observations and reanalysis. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2023, 63 (4): 625–638 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423040105

## Variability of the Pechora Sea Ice Area and Its Correlation With the Barents Sea Surface Temperature According to Satellite Observations and Reanalysis

E. V. Lvova<sup>a,#</sup> and E. V. Zabolotskikh<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

<sup>#</sup>e-mail: Lvova317@gmail.com

Received June 28, 2023; revised September 6, 2023; accepted October 2, 2023

Variability of the Pechora Sea ice cover and the Barents Sea surface temperature during the season from October to June in 2002–2022 (except the season of 2011/2012) was studied on the basis of satellite observations and reanalysis ERA5. Influence of the sea surface temperature on the ice cover was also analyzed but without considering the other hydrometeorological parameters. Areas of the sea ice cover characteristics were calculated using data on the sea ice closeness obtained from the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 measurements. To analyze the variability of sea surface temperature, we used the average daily data of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA5 reanalysis obtained by averaging hourly data. To

study the spatial and temporal variability of sea ice cover and sea surface temperature, fields of daily averaged parameters were mapped. These maps and values of areas of the sea ice cover were analyzed. This made possible to reveal regularities of development of the sea ice processes in the Pechora Sea, to calculate the general trend of the sea ice area change over the considered period of time, and to divide the Barents Sea into four sectors with significantly different average values of the sea surface temperature: southwestern, northwestern, southeastern, northeastern ones. The seasonal and interannual variabilities of the Pechora Sea ice cover and the Barents Sea surface temperature were analyzed. To study the effect of sea surface temperature in different sectors of the Barents Sea on the sea ice area, the method of statistical analysis (Pearson's linear correlation) was used for the monthly average data and the data, averaged over the sea ice season (from October to June) with different time lags. Significant correlation coefficients were obtained only for a two-month lag. With such a lag, high values of the inverse correlation coefficients were revealed between the sea surface temperature in the southwestern (up to  $-0.8$ ) and northwestern (up to  $-0.6$ ) sectors of the Barents Sea and sea ice area of the Pechora Sea, while in other sectors the correlation was significantly smaller or even below the significance level.

**Keywords:** Sea ice, sea surface temperature, Pechora Sea, Barents Sea, statistical analysis, AMSR, ERA5

## REFERENCES

- Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR. T. 1. Barentsevo more. Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas. V. 1. Barents Sea. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 280 p. [In Russian].
- Zabolotskikh E.V., Balashova E.A. Sea Ice Dynamics in the Pechora Sea in Winter 2019/2020. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. Fundamental and applied hydrophysics. 2021, 14 (1): 97–105 [In Russian]. <https://doi.org/10.7868/S207366732101010X>
- Zubakin G.K., Suhih N.A., Ivanov N.E., Nesterov A.V., Gudoshnikov Yu.P. Variability and conjugation of current velocity, drift of ice and wind in the Pechora Sea in 2001–2003. Trudy Mezhdunarodnoj konferencii i vystavki po osvoeniyu nefi i gaza Rossijskoj Arktiki i kontinental'nogo shel'fa RAO/CIS Offsho. Proceedings of the International Conference and Exhibition on Oil and Gas Development of the Russian Arctic and the Continental Shelf RAO/CIS Offshore. Saint-Petersburg, 2015: 610–615 [In Russian].
- Ivanov V.V., Alekseev V.A., Repina I.A. Increasing impact of Atlantic waters on the ice cover of the Arctic Ocean. Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata: Trudy mezhdunarodnoj konferencii pamyati akademika A.M. Obuhova. Turbulence, Atmospheric and Climate Dynamics: Proceedings of the International Conference in Memory of Academician A.M. Obukhov, 2014: 267–273 [In Russian].
- Kotlyakov V.M. Sea ice. Morskoj lyod. Bol'shaya rossijskaya enciklopediya. Great Russian Encyclopedia. 2012, 21: 172 [In Russian].
- Pechorskoe more. Sistemnye issledovaniya (gidrofizika, gidrologiya, optika, biologiya, himiya, geologiya, ekologiya, socioekonomicheskie problemy). Pechora Sea. System research (hydrophysics, hydrology, optics, biology, chemistry, geology, ecology, socio-economic problems). Moscow: "Sea", 2003: 486 p. [In Russian].
- Ryabchenko S.V., Drachkova L.N., Evdokimova I.O., Zurbina L.A., Popkova S.V. Tematicheskij otchyot № 2 po ledovym usloviyam Pechorskogo morya. Thematic report No. 2 on the ice conditions of the Pechora Sea. Arkhangelsk: Northern Arctic Federal University, 2020: 40 p. [In Russian].
- Fedorov V.M., Grebennikov P.B., Frolov D.M. Assessment of the role of the insolation factor in changes in the area of sea ice in the Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*. 2020, 14 (3): 38–50 [In Russian]. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3\(38-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-3(38-50))
- Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Kovalyov E.G., Smolyanickij V.M. Nauchnye issledovaniya v Arktike. Scientific research in the Arctic. Saint Petersburg: "Science", 2007: 135 p. [In Russian].
- Shalina E.V. Regional features of changes in the ice situation in the seas of the Russian Arctic and along the Northern Sea Route according to satellite observations. Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2021, 18 (5): 201–213 [In Russian].
- Arthun M., Eldevik T., Smedsrud L. H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B. Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat. *Journ. of Climate*. 2012, 25 (13): 4736–4743. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00466.1>
- Beer E., Eisenman I., Wagner T.J.W. Polar amplification due to enhanced heat flux across the halocline. *Geophys. Research Letters*. 2020, 47 (4). <https://doi.org/10.1029/2019GL086706>
- Bintanja R., Graverson R., Hazeleger W. Arctic winter warming amplified by the thermal inversion and consequent low infrared cooling to space. *Nature Geoscience*. 2011, 4: 758–761. <https://doi.org/10.1038/ngeo1285>
- Comiso J.C. Global Surface Temperature Trends and Arctic Amplification. AGU Fall Meeting Abstracts. 2016. *Copernicus Climate Change Service*. Retrieved from: <https://climate.copernicus.eu/> (Last access: 15 July 2023)
- Dai A., Luo D., Song M., Jiping L. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO<sub>2</sub>. *Nature Communications*. 2019, 10 (121). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>
- Herbaut C., Houssais M., Close S., Blairot A. Two wind-driven modes of winter sea ice variability in the Barents Sea. *Deep Sea Research*. 2015, 106: 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.10.005>

- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N.* ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2023. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- Landrum L., Holland M.M.* Extremes become routine in an emerging new Arctic. *Nature Climatology Change*. 2020, 10: 1108–1115. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0892-z>
- Lind S., Ingvaldsen R.B.* Variability and impacts of Atlantic Water entering the Barents Sea from the north. *Deep Sea Research*. 2012, 62: 70–88. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.12.007>
- Lundhaug M.* ERS SAR studies of sea ice signatures in the Pechora Sea and Kara Sea region. *Canadian Journ. of Remote Sensing*. 2002, 28 (2): 114–127. <https://doi.org/10.5589/m02-022>
- Maslanik J., Stroeve J., Fowler C., Emery W.* Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011. *Geophys. Research Letters*. 2011: 38. <https://doi.org/10.1029/2011GL047735>
- Meleshko V.P., Pavlova T., Bobylev L.P., Golubkin P.* Current and Projected Sea Ice in the Arctic in the Twenty-First Century. *Sea Ice in the Arctic: Past, Present and Future*. Springer Nature. 2020: 399–463. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-21301-5>
- Ogorodov S.A., Kamalov A.M., Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P.* The role of sea ice in coastal and bottom dynamics in the Pechora Sea. *Geo-Marine Letters*. 2005, 25 (2): 146–152. <https://doi.org/10.1007/s00367-004-0196-8>
- Pavlova O., Pavlov V., Gerland S.* The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach. *Journ. of Marine Systems*. 2014, 130: 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.011>
- Schlichtholz P., Houssais M.-N.* Forcing of oceanic heat anomalies by air-sea interactions in the Nordic Seas area. *Geophys. Research*. 2011, 116. <https://doi.org/10.1029/2009JC005944>
- Skagseth Ø., Eldevik T., Arthun M.* Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine. *Nature Climate Change*. 2020, 10: 661–666. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0772-6>
- Skjoldal H.R., Fuglestad J.L., Benestad R., Ivanov V., Jørgensen L.L., Kovacs K.M., Nilssen F., Tchernova J.* Ecosystems of the Barents Sea Region. *Governing Arctic Seas: Regional Lessons from the Bering Strait and Barents Sea*. Switzerland: Springer Nature. 2019: 119–142. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-25674-66>
- Sorteberg A., Kvingedal B.* Atmospheric Forcing on the Barents Sea Winter Ice Extent. *Climate*. 2006, 19: 4772–4784. <https://doi.org/10.1175/JCLI3885.1>
- Stroeve J., Notz D.* Changing state of Arctic sea ice across all seasons // *Environmental Research Letters*. 2018, 13 (10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade56>
- Tschudi M.A., Meier W.N., Stewart J.S.* An enhancement to sea ice motion and age products at the National Snow and Ice Data Center (NSIDC). *The Cryosphere*. 2020, 14 (5): 1519–1536. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1519-2020>, 2020