
МОРСКИЕ, РЕЧНЫЕ И ОЗЁРНЫЕ ЛЬДЫ

УДК 551.46.062.7

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ И СВЯЗЬ ЕГО ПЛОЩАДИ СО СКОРОСТЬЮ ВЕТРА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И РЕАНАЛИЗА

© 2025 г. Е. В. Львова*, Е. В. Заболотских

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

**e-mail: Lvova317@gmail.com*

Поступила в редакцию 09.12.2024 г.

После доработки 19.05.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

В работе анализировалась изменчивость площади морского льда в Печорском море по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования, ветра по данным реанализа ERA5 и толщина морского льда по данным ICESat за 2002–2023 гг. Выявлена повышенная обратная корреляция между этими параметрами при использовании временного лага в 2 дня и высокой скорости ветра, дующего преимущественно в одном направлении.

Ключевые слова: морской лёд, ветер, Печорское море, статистический анализ, AMSR, ERA5, ICESat

DOI: 10.7868/S2412376525030103

ВВЕДЕНИЕ

Морской лёд — один из ключевых компонентов климатической системы Земли. В результате происходящих в последние годы изменений климата в Арктике наблюдается сокращение ледяного покрова и изменение ледового режима арктических морей (Иванов и др., 2013; Иванов и др., 2014; Шалина, Бобылев, 2017; Landrum, Holland, 2020). Основной причиной глобального потепления считается рост концентрации парниковых газов в атмосфере в результате деятельности человека (Stocker, 2013). К причинам происходящих изменений ледяного покрова исследователи относят повышение температуры океана (Dai et al., 2019), перенос тепла океаном (Beer et al., 2020), атмосферный перенос, влияние ветра и циклонов (Bintanja et al., 2011). Изучение и прогноз морского льда необходимы для обеспечения безопасности и эффективности народнохозяйственной деятельности в Арктике, включающей как добычу углеводородов в морях Северного Ледовитого океана, так и прокладку маршрутов судов. Без изучения факторов, влияющих на изменение состояния морского льда, невозможно получение краткосрочных и долгосрочных прогнозов ледяного покрова морей

Арктики с высокой оправдываемостью. Многие факторы, воздействующие на морской лёд, такие как температура поверхностного слоя океана, хорошо изучены для ряда регионов. Однако для Печорского моря таких исследований очень мало, а, например, воздействие ветра на площадь льда в этом море изучалось в очень небольшом количестве исследований (Дымов и др., 2012; Зеленько и др., 2016).

Юго-восточная часть Баренцева моря обладает уникальным набором параметров. В настоящей статье гидроним “Печорское море” применим к акватории юго-восточной части Баренцева моря согласно Постановлению ЦИК СССР от 28.11.1935. Площадь его акватории 81 263 км², наибольшая глубина 210 м. Из-за недостатка данных и повышенного внимания к Баренцеву, а не к Печорскому морю количество исследований, посвящённых изучению изменчивости ледяного покрова Печорского моря, крайне ограничено. Сведения о ледовых явлениях в Печорском море собраны в трудах, изданных Гидрометеоиздатом Ленинграда (Гидрометеорологические ..., 1990), а также в издательстве “Море” (Москва) (Печорское ..., 2003), 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 отчёте (Рябченко, 2020). Сезонная и региональная изменчивость сплочённости 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). Г.К. Зубакин (Зубакин и др., 2015) проводил исследования динамических характеристик дрейфа морского льда Печорского моря и течений на основании среднесуточных данных с буйковых автономных станций в 2001–2003 гг. В результате исследований обнаружена повышенная корреляция между течениями на горизонте 2 м, ветровым воздействием и дрейфом льда. Работа (Заболотских, Львова, 2023) описывает влияние температуры поверхности Баренцева моря на ледяной покров Печорского моря по данным AMSR2 и реанализа ERA5 за период с 2002 по 2022 г.

Пространственно-временная изменчивость морского льда определяется как термическими процессами нарастания и таяния, так и динамическими процессами, включая влияние ветра. Ветер воздействует на ледяной покров в зависимости от его скорости и направления, вызывая дрейф, разрушение, образование трещин и полыней. Особенно сильные ветры, сопровождающиеся циклонами, могут усиливать волнение, способствовать разрушению тонкого льда и ускорять процессы таяния, в том числе за счёт переноса тепла от открытых водных поверхностей и усиления теплообмена. В холодный период ветры могут, наоборот, усиливать рост льда за счёт охлаждения поверхности. Температура воды также играет ключевую роль: при положительном тепловом балансе она способствует таянию нижней части льда, особенно при наличии вертикального перемешивания и подлёдных течений. Температура воздуха влияет на термодинамику льда — отрицательные температуры способствуют его росту, тогда как тёплый воздух вызывает ускоренное таяние поверхности (Котляков, 2012).

Описание динамических процессов, влияющих на ледяной покров в Арктике, представлено во многих работах. Многие авторы подчёркивают роль атмосферных явлений в ледообразовании,

таких как циклоны (Sorteberg, Kvingedal, 2006) и ветер (Wang, 2021). В работе (Wang, 2021) рассматривается продолжительное влияние ветра на структуру морского льда в Арктике на основании численного моделирования. Авторы работы (Zhang, et al. 2008) анализируют влияние крупномасштабной циркуляции и циклонов на ледяной покров Арктики в зимний период. На основе электронной базы многолетних данных по ледовому режиму морей в работе (Жичкин, 2015) выделяются однородные периоды аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей и влияние различных параметров (в том числе и ветра) на ледяной покров. Арктические циклоны и их влияние на перенос влаги, ледяной покров рассмотрены в работе (Sorteberg, Kvingedal, 2006) по данным реанализа. Современный режим турбулентного теплообмена с атмосферой над Печорским, Баренцевым и Карским морями, а также его влияние на ледяной покров этих морей рассмотрены в работе (Суркова, Романенко, 2021). Работа (Заболотских, Балашова 2021) посвящена изучению динамики морского льда в Печорском море зимой 2019/20 г. на основе спутниковых данных по сплочённости морского льда и модельных данных по ветру. Динамика морского льда отслеживалась в зависимости от приводного ветра и других параметров. 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, явились сильные североатлантические циклоны, сопровождающиеся развитием над Печорским морем штормовых ветров и положительными аномалиями температуры воздуха.

Автор работы (Koenigk, 2009) по результатам численного эксперимента сделал вывод, что межгодовая изменчивость площади льда Баренцева моря обусловлена главным образом импортом или экспортом льда под воздействием локального ветра, а перенос тепла течениями играет заметно меньшую роль. В работе (Pavlova et al., 2014) отмечается важная роль интенсивных ветров северных или южных направлений в перемещении льда в Печорском море. С. Schwarz и J. Schröder (2021) представили численную модель дрейфа морского льда в Южном океане, использующую данные о ветре из проекта ERA-5. Модель основана на методе наименьших квадратов и учитывает нелинейные зависимости вязкости от градиентов скорости, концентрации и толщины льда. Работа (Jacobson et al., 2019) посвящена

исследованию взаимосвязи между морским льдом и скоростью ветра над Северным Ледовитым океаном за период с 1979 по 2015 г. на основе данных реанализа NCEP CFSR. Был проведён корреляционный анализ, по результатам которого обнаружена обратная корреляция в осенне-зимний период (коэффициент корреляции в зависимости от различных параметров был от -0.32 до -0.65) и в периоды, когда скорость ветра на высоте 10 м превышала 5 м/с.

В данной работе проведён анализ ветрового режима на акватории Печорского моря, в том числе связанного с развитием интенсивных циклонов, а кроме того, анализировалось влияние ветрового режима на ледяной покров в зависимости от его характеристик. Исследование основывалось на использовании данных спутниковых наблюдений за морским льдом и данных реанализа по ветру. Для анализа площади морского льда использованы данные о среднесуточной сплочённости ледяного покрова Арктики, полученные в университете Бремена с помощью алгоритма ASI, применённого к измерениям спутниковых радиометров AMSR-E и AMSR2. Анализировалась пространственно-временная изменчивость площади морского льда Печорского моря с 2002 по 2023 г. Изучение изменчивости скорости и направления ветра проведено на основании данных, полученных из реанализа ERA5. В работе рассматривались только случаи, когда среднесуточное значение скорости ветра было выше 7 м/с. Поиск циклонов проводился с помощью визуального анализа; оценивались скорость и направление ветра, количество и сезонность циклонов, а также их влияние на ледяной покров. Толщина морского льда анализировалась на основании данных ICESat, ICESat-2. Корреляционный анализ проводился по методу Пирсона.

В задачи настоящей работы входила оценка влияния скорости ветра, особенно при прохождении циклонов, на площадь морского льда Печорского моря в зависимости от его толщины. Это влияние рассматривается отдельно, без учёта влияния других гидрометеорологических параметров. Данное исследование продолжает изучение факторов, влияющих на площадь морского льда Печорского моря, — исследование взаимосвязи между температурой поверхностного слоя Баренцева моря и площадью морского льда представлено в работе (Львова, Заболотских, 2023).

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались данные о среднесуточной сплочённости морского льда Арктики, полученные в университете Бремена с использованием алгоритма ASI, применённого к измерениям спутников AMSR-E и AMSR2 (Spreen et al., 2008). Пространственное разрешение данных составляет 6.25×6.25 км. Точность алгоритма зависит от атмосферной прозрачности и яркостных температур; при сплочённости выше 65% ошибка не превышает 10%. Данные доступны с июня 2002 по декабрь 2023 г., за исключением сезона 2011/12 г. из-за отсутствия измерений. Замена на данные других радиометров (SSM/I, SSMIS) не применялась из-за их низкого пространственного разрешения, что критично для сравнительно небольшой акватории Печорского моря ($81\,263$ км²). В анализ включались данные с октября по май; летние месяцы исключались из-за отсутствия льда. Площадь льда рассчитывалась как сумма произведений площади ячеек на их сплочённость, при этом ячейки со сплочённостью менее 15% не учитывались. Данные о толщине льда Печорского моря были получены из продукта ICESat, ICESat-2 Sea Ice Thickness (архив данных ICESat, ICESat-2), доступного с пространственным разрешением 25 на 25 км за период с 2003 по 2023 г. ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite), — это серия спутников NASA, предназначенных для изучения изменений ледяного покрова и других целей. Основная цель миссии — собрать данные о толщине льдов методом лазерной альтиметрии. Были использованы данные как спутника ICESat (работал с 2003 по 2009 г.), так и ICESat-2 (работает с 2018 г. по настоящее время).

Маска 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 о. Колгуев, далее от мыса Святой Нос на восток по Тиманскому берегу континентальной России до Югорского полуострова и о. Вайгач.

Использовалась скорость ветра по данным реанализа ECMWF Reanalysis 5th Generation (ERA5), полученных в рамках проекта Copernicus (Copernicus Climate Change Service; Архив данных реанализа ERA5). Данные реанализа ERA-5 выбраны не случайно — на сегодняшний день этот реанализ считается одним из лучших благодаря своим преимуществам в сравнении

с другими. ERA-5 обладает высоким пространственным разрешением ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$, то есть примерно 31 км, тогда как, например, реанализ JRA-25 имеет пространственное разрешение $1.25^\circ \times 1.25^\circ$) и временным разрешением (данные доступны каждый час, тогда как для других реанализов характерна доступность данных каждые 3 или 6 часов). ERA5 использует модель с 137 вертикальными уровнями, включая детализированную структуру пограничного слоя, где формируются турбулентные процессы, что важно при исследовании скорости ветра. В работе использовались среднесуточные данные реанализа ERA5 с июня 2002 по декабрь 2023 г., полученные путём усреднения почасовых данных.

Регион исследования включал в себя акваторию Печорского моря и области рядом с морем ($65\text{--}72^\circ$ с.ш., $42\text{--}66^\circ$ в.д.). В работе анализировались только те дни, когда скорость ветра на площади Печорского моря была выше 7 м/с, потому что при ветрах, превышающих 7 м/с и действующих достаточно длительное время, разрушаются льды толщиной до 60 см. Более высокие скорости ветра разрушают более толстые льды, но количество случаев с продолжительными ветрами больших скоростей одного направления недостаточно для статистического анализа. Поэтому 7 м/с было выбрано в качестве порогового значения. Скорость ветра рассчитывалась по формуле:

$$W = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (1)$$

где W — скорость ветра, u и v — компоненты скорости ветра на высоте 10 м.

Влияние ветра на морской лёд в Печорском море зависит от его направления. Например, если над морем дует юго-западный или юго-восточный ветер, то он может разбивать молодые типы льда и относить его в незанятые льдом участки моря, в том числе в более тёплые воды Баренцева моря, где лёд вытаивает и исчезает (Заболотских, Балашова, 2021), в результате чего площадь льда в Печорском море уменьшается. Северо-западный и северо-восточный ветры прибивают лёд к берегу, не влияя существенно на его площадь, но зачастую изменяя свойства льда (сильные ветры ведут к сплачиванию льда и образованию торосов). Поэтому для анализа влияния ветра на площадь морского льда рассматривались только те случаи, когда различия в направлении ветра над всей областью Печорского моря были минимальными (не превышали 15°). Для расчёта направления скорости ветра использовалась формула:

$$\text{Angle} = \arctan(v/u), \quad (2)$$

где Angle — это направление скорости ветра, v и u — компоненты скорости ветра на высоте 10 м.

На рис. 1 представлены примеры среднесуточных полей ветра, когда на большей части акватории Печорского моря ветры дули преимущественно в одном направлении.

Циклоны диагностировались при помощи визуального анализа полей ветра, построенных по данным ERA5 за период с 2003 по 2023 г. Для анализа отбирались случаи, когда высокая (>7 м/с) скорость ветра сохранялась над всей областью моря в течение суток. В исследовании учитывались все циклоны, независимо от того, проходил ли их центр, часть или циклон

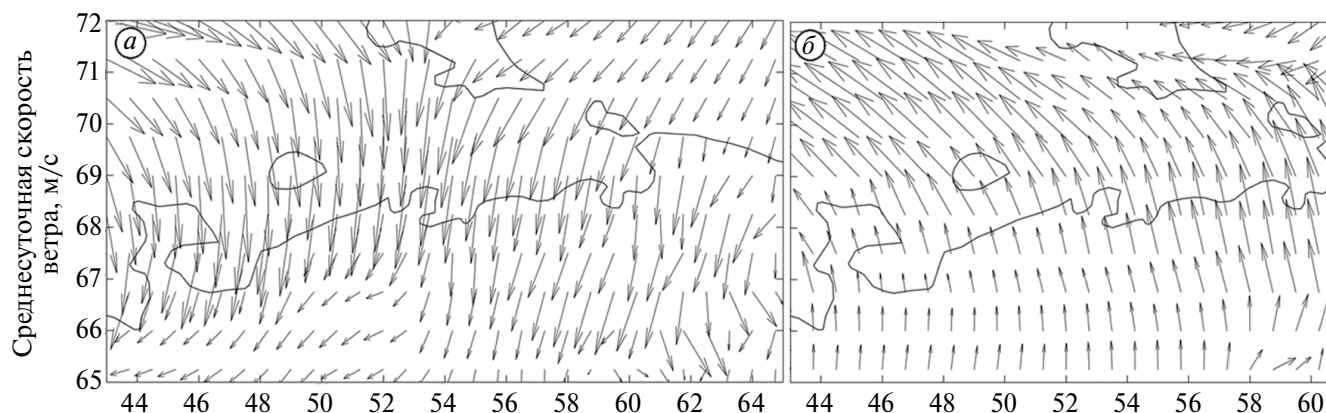


Рис. 1. Примеры полей ветра с одним направлением по всей области: 13.01.2003 (а); 26.11.2013 (б)

Fig. 1. Examples of wind fields with one direction over the entire region: January 13, 2003 (a); November 26, 2013 (b)

целиком через исследуемую область. Такой подход был выбран потому, что даже частичное прохождение циклона может существенно сказываться на ледяном покрове, особенно в период его нарастания. На рис. 2 показан пример циклона, наблюдаемого 5 и 6 января 2020 г. в районе Печорского моря.

Статистический анализ проводился для среднесуточных данных с ноября по июнь (исключая месяцы, когда морской лёд в Печорском море отсутствует). Данные были получены путём осреднения почасовых данных. Для расчёта коэффициентов корреляции между скоростью ветра 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):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}. \quad (3)$$

Для определения уровня значимости коэффициента корреляции использовалась формула.

$$SL = P(T \geq |t|) + P(T \leq -|t|) = 2P(T \geq |t|), \quad (4)$$

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

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \sim t_{n-2}. \quad (5)$$

В анализе использовалось среднее по площади района значение скорости ветра Печорского моря. Изначально рассчитывались

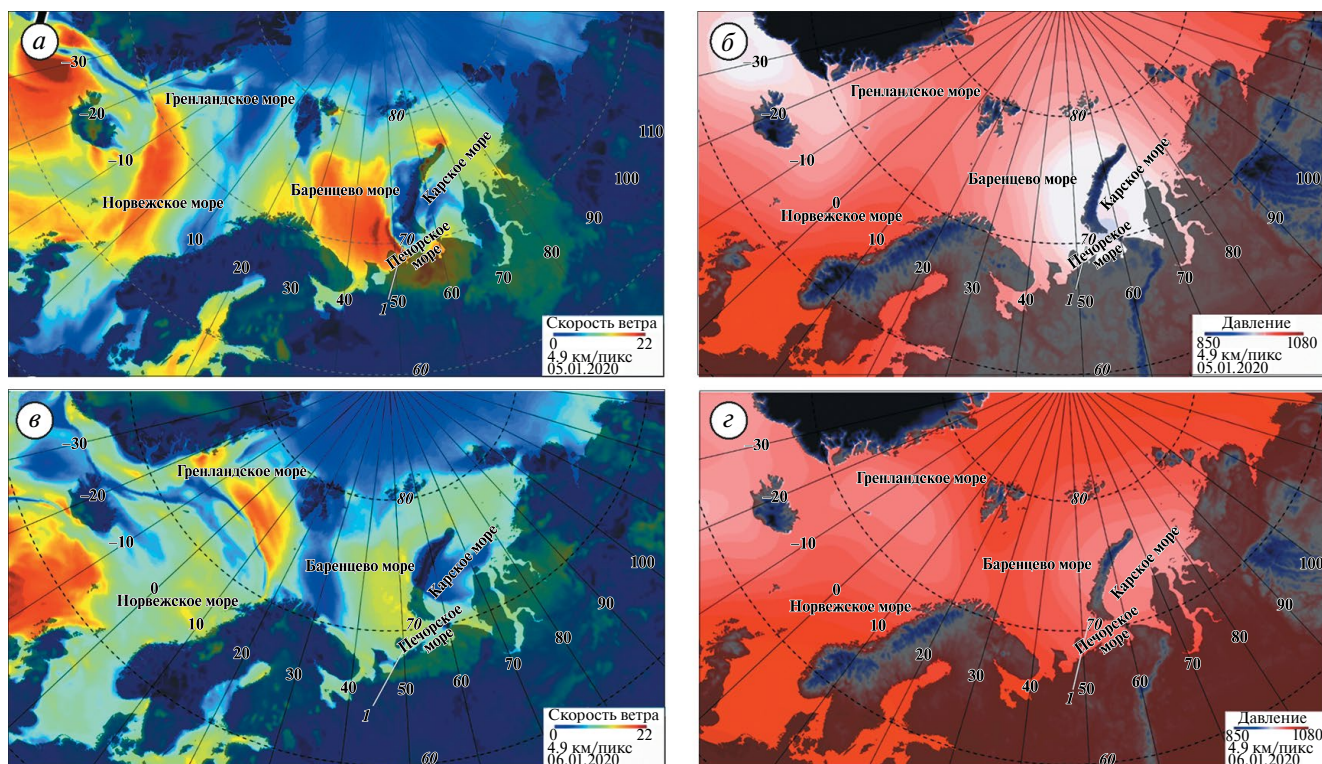


Рис. 2. Пример поиска циклонов в районе Печорского моря с помощью визуального анализа за 05.01.2020–06.01.2020 гг. при помощи полей скорости ветра и давления: поле ветра за 05.01.2020 г. (а): 1 – место обнаружения циклона; поле давления за 05.01.2020 г. (б): 1 – место обнаружения циклона; поле ветра за 06.01.2020 г. (в): 1 – место первоначального обнаружения циклона; поле давления за 06.01.2020 г. (г): 1 – место первоначального обнаружения циклона

Fig. 2. An example of searching for cyclones in the Pechora Sea area using visual analysis for 05.01.2020 – 06.01.2020 using wind speed and pressure fields: wind field for 05.01.2020 (a): 1 – location of cyclone detection; pressure field for 05.01.2020 (б): 1 – location of cyclone detection; wind field for 06.01.2020 (в): 1 – location of initial cyclone detection; pressure field for 06.01.2020 (г): 1 – location of initial cyclone detection

коэффициенты корреляции между площадью морского льда Печорского моря и скоростью ветра с разными временными лагами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Скорость ветра — один из ключевых факторов, влияющих на изменчивость ледяного покрова, особенно при наличии тонкого (молодого) льда. Замерзание в Печорском море начинается в восточной и юго-восточной частях с образования ниласов, после чего льды распространяются на север и запад, охватывая основную акваторию. Ледяной режим характеризуется высокой межгодовой и сезонной изменчивостью: формирование льда начинается в конце октября, полное очищение моря от льда происходит к концу июня, а с июля по сентябрь ледяной покров отсутствует (Львова, Заболотских, 2023).

Для оценки влияния ветра на морской лёд, помимо сплочённости, использовались данные о толщине льда по ICESat и ICESat-2 (рис. 3). Среднемесячные значения ICESat (2003–2008) доступны для февраля, марта, октября и ноября; данные ICESat-2 (с 2018 г.) — с сентября по апрель. В 2003–2009 гг. толщина льда в феврале–марте составляла 1.1–2.8 м, тогда как в 2019–2024 гг. — лишь 0.29–0.7 м. За последние годы практически исчезли толстые однолетние льды. С октября по ноябрь преобладают молодые льды, в декабре–марте их толщина увеличивается, а с конца апреля начинается таяние. Полное очищение акватории наблюдается в конце мая — начале июня.

Для анализа изменчивости скоростей ветра в области Печорского моря использовались почасовые данные реанализа ERA5, которые усреднялись за 24 часа вне зависимости от направления. Для каждого дня были построены карты полей ветра с 2002 по 2023 г. После сравнительного анализа распределения скорости ветра для четырёх сезонов выявлено, что сезонные изменения практически не влияют на распределение ветра. Чаще всего встречаются значения функции распределения в 4–5.5 м/с. В зимнее время среднемесячные скорости ветра немного выше, чаще наблюдается доля сильных ветров. Летний период отличается наиболее равномерным распределением и меньшим количеством экстремальных скоростей ветра. Осенний период занимает промежуточное положение, отражая переходный характер погодных условий. Скорости ветра выше 10 м/с обычно связаны с присутствием циклонов в районе Печорского моря. За всё время наблюдения скорость ветра до 5 м/с наблюдалась в 70%

данных, скорость ветра от 5 до 10 м/с — в 20% данных и только в 10% данных скорость ветра превышала 10 м/с. На рис. 4 изображено количество данных, когда скорость ветра превышала 10 м/с. Чаще всего сильные ветры (скорость ветра превышает 10 м/с) встречались в осенне-зимнее время и намного реже в весенне-летнее. Продолжительность сильных непрерывных ветров над областью Печорского моря невелика, в среднем один-два дня.

Одна из особенностей ветрового режима в районе Печорского моря — сезонная изменчивость направлений ветра. На рис. 5 изображено распределение значений направления ветра (розы ветров) в Печорском море по данным реанализа ERA5 за период с 2002 по 2024 г. Преимущественным направлением ветра в данной работе считается направление, наблюдающееся на 75% акватории Печорского моря.

Режим ветра над морем определяется в основном характером сезонного барического поля, складывающегося в результате атмосферной циркуляции. На акватории Печорского моря чаще всего наблюдаются ветры западного, юго-западного и юго-восточного направлений. Такие ветры способствуют разрушению тонкого молодого морского льда и его переносу в центральную часть моря, а иногда и в акваторию Баренцева моря. Зимой в соответствии с глубокой ложбиной, образованной преобладающими траекториями циклонов и простирающейся от Исландского минимума на Печорское море, преобладают ветровые потоки, направленные с юго-запада и юга. Весной и летом наблюдаются ветры восточного и северо-восточного направления, в другие сезоны ветры имеют преимущественно западное направление.

Моря Северного Ледовитого океана находятся под влиянием Полярного, Сибирского, Исландского и Алеутского центров атмосферного давления. Влияние этих центров обуславливает сезонные особенности синоптических процессов над их обширными просторами. Зимой над Печорским морем развита циклоническая деятельность, летом антициклоническая (Печорское..., 2003). На Печорское море циклоны перемещаются с Атлантического океана, с запада на восток. При этом происходит резкая смена погоды, ветер усиливается до штормового (более 15 м/с). Над Печорским морем наблюдаются различные типы циклонов: полярные циклоны (небольшие циклоны масштабом между 200 и 1000 км, со скоростью ветра в приповерхностном слое около или более 15 м/с, с небольшой

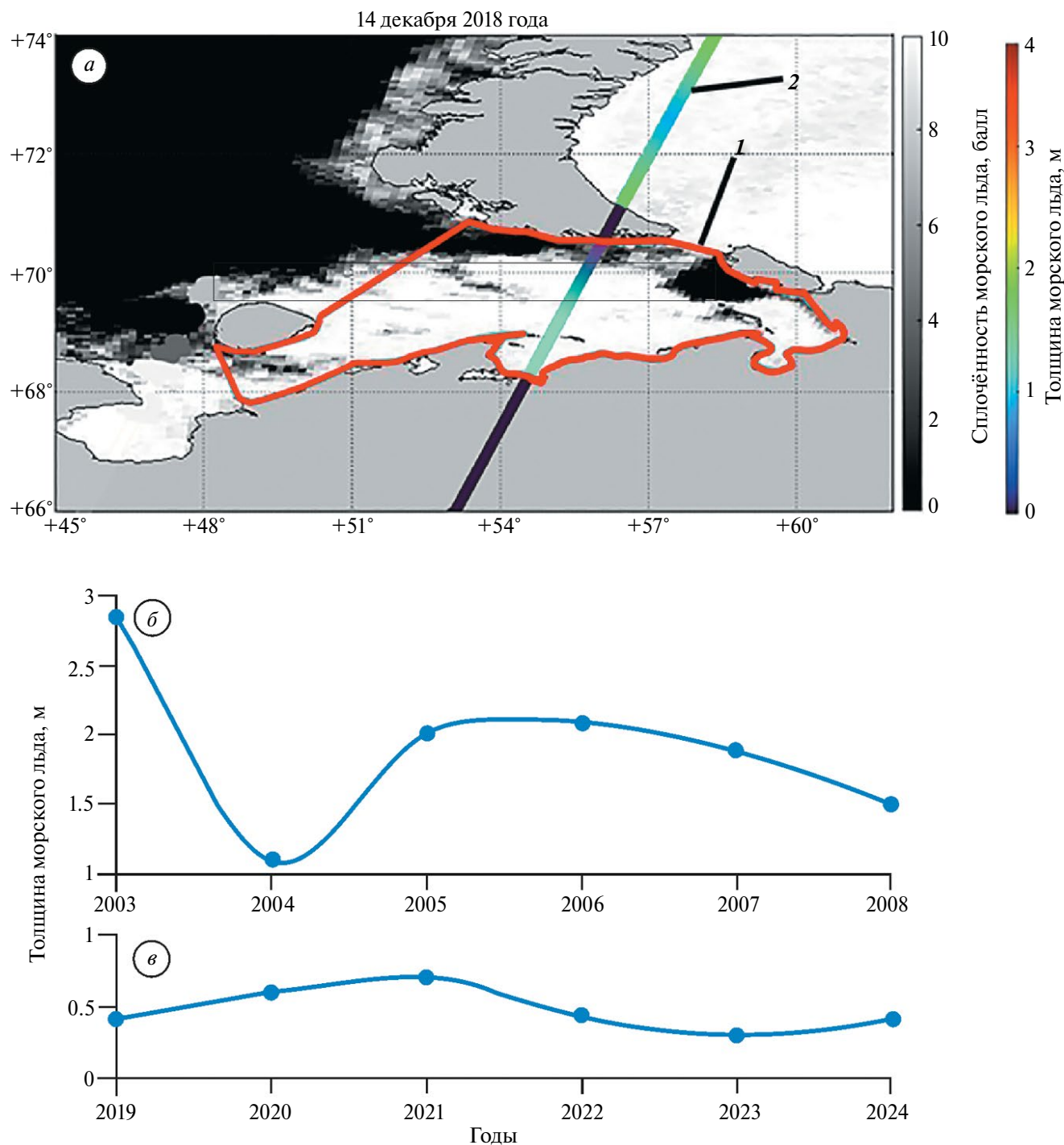


Рис. 3. Измерение толщины морского льда Печорского моря: измерение толщины морского льда по данным ICESat-2 за 14.12.2018 (а): 1 – границы Печорского моря; 2 – трек ICESat-2; средняя толщина морского льда в Печорском море по данным ICESat за 2003–2008 гг. (б); средняя толщина морского льда в Печорском море по данным ICESat-2 за 2019–2024 гг. (в)

Fig. 3. Measurement of sea ice thickness in the Pechora Sea: based on ICESat-2 data for December 14, 2018 (а): 1 – Pechora Sea boundaries; 2 – ICESat-2 track; average sea ice thickness in the Pechora Sea according to ICESat data for 2003–2008 (б); average sea ice thickness in the Pechora Sea according to ICESat-2 data for 2019–2024 (в)

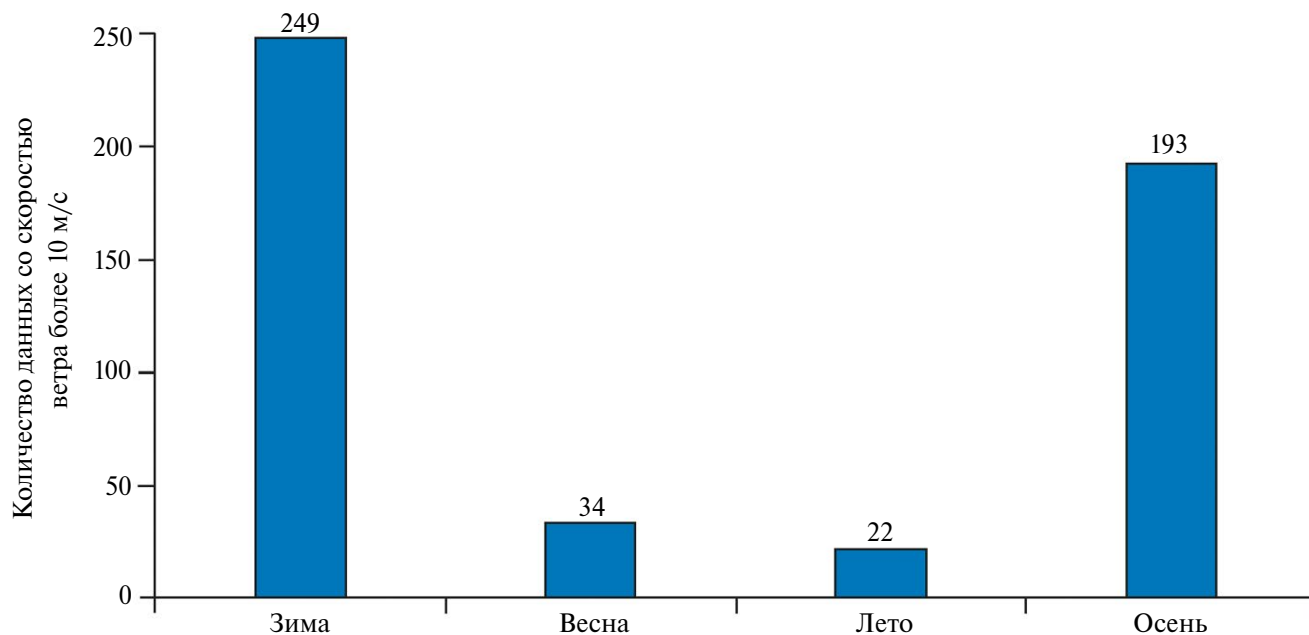


Рис. 4. Количество данных со скоростью ветра более 10 м/с в различные сезоны за период с 2002 по 2023 г. по данным реанализа ERA5

Fig. 4. Number of data with wind speeds greater than 10 m/s in different seasons for the period from 2002 to 2023 based on ERA5 reanalysis data

продолжительностью жизни в 1–2 дня), высокоширотные (внетропические) интенсивные циклоны (масштабом 2–3 тыс. км, со скоростью ветра в приповерхностном слое 17–40 м/с, продолжительностью несколько суток).

В работе для анализа влияния циклонов на площадь морского льда в области Печорского моря использовались среднесуточные поля ветра, полученные путём усреднения почасовых данных реанализа ERA5. Траектория движения циклонов отслеживалась с помощью визуального анализа по построенным полям ветра. Над Печорским морем циклоны обычно перемещаются в юго-восточном и восточном направлениях, достигая Карского моря. Циклоны, проходящие через Печорское море, оказывают значительное влияние на климат и погодные условия этого региона. Эти атмосферные явления, как правило, становятся особенно активными в осенне-зимний период, когда контраст температур между холодными воздушными массами с севера и более тёплыми массами с юга способствует их образованию. Летом и весной циклонов практически не наблюдали.

Для проведения корреляционного анализа между площадью морского льда и скоростью ветра отбирались дни, когда скорость ветра превышала 7 м/с и имела одно направление (вариации

направления ветра на 75% площади Печорского моря не превышали 15 градусов). Больше всего таких дней встречалось в осеннее и зимнее время. В конце октября – начале ноября в Печорском море начинается ледообразование. Тонкий, молодой лёд в это время подвержен влиянию сильного ветра. В январе-феврале лёд в Печорском море полностью покрывает акваторию моря, его толщина увеличивается и ветер не приводит к существенным изменениям площади льда. Толщина морского льда играет важную роль – коэффициенты корреляции становятся значительно ниже, если толщина морского льда превышает значение 1.5 м.

Для поиска высоких значений корреляции был выполнен корреляционный анализ с различным временным шагом: поиск корреляции между значениями площади морского льда и скоростью ветра в тот же день, через день, два дня, три дня и далее до конца недели (рис. 6). Оказалось, что наиболее высоких значений коэффициенты корреляции достигают с шагом в два дня (–0.39). Только при задержке в два дня была замечена статистически значимая зависимость между изучаемыми параметрами. Более короткие временные лаги не демонстрировали значимой корреляции, что свидетельствует о том, что необходимое время для проявления

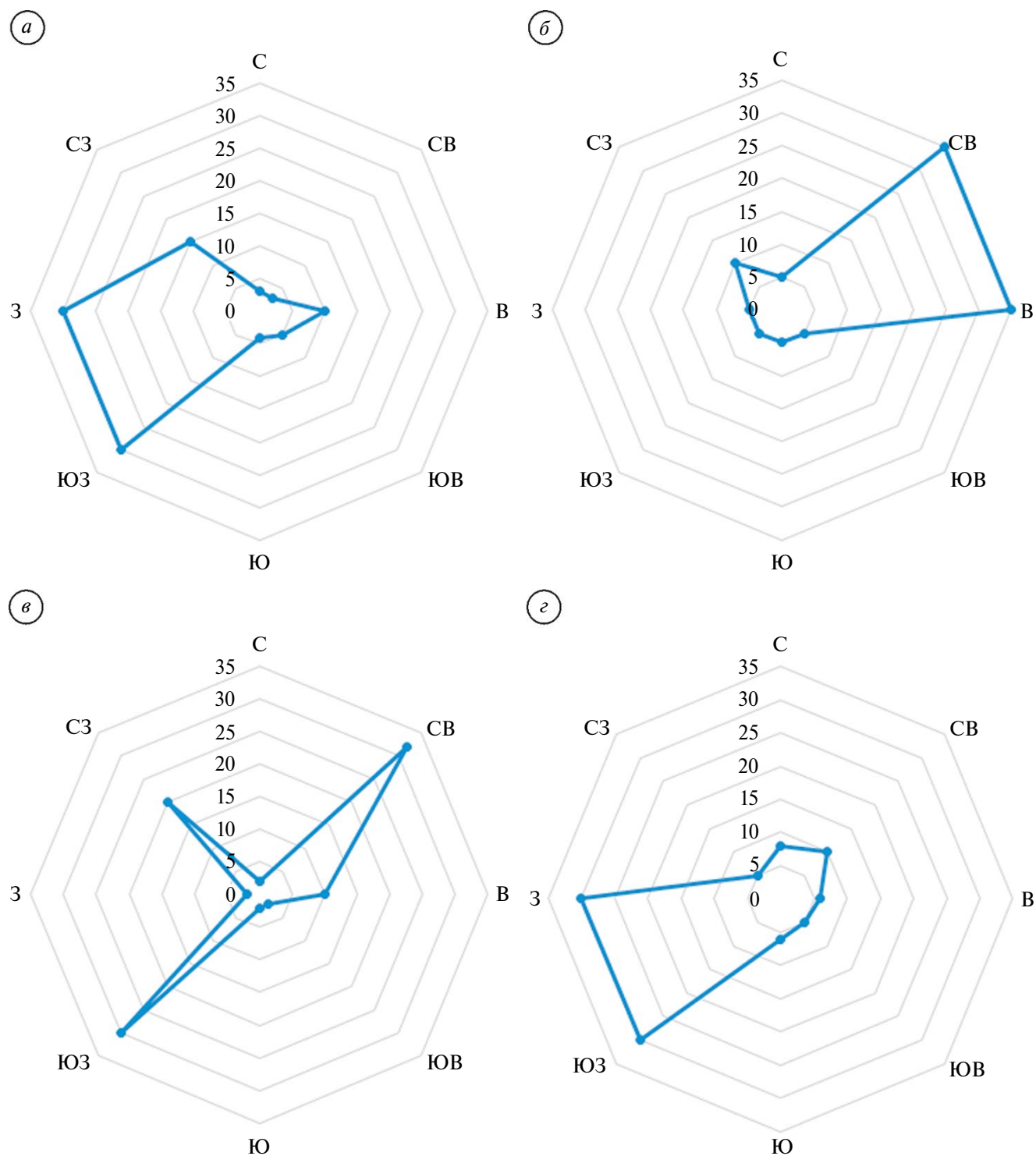


Рис. 5. Распределение направлений ветра в Печорском море за период с 2002 по 2023 г. по данным реанализа ERA5: зимой (а); весной (б); летом (в); осенью (г)

Fig. 5. Distribution of wind directions in the Pechora Sea for the period from 2002 to 2023 according to ERA5 reanalysis data: in winter (a); in spring (б); in summer (в); in autumn (г)

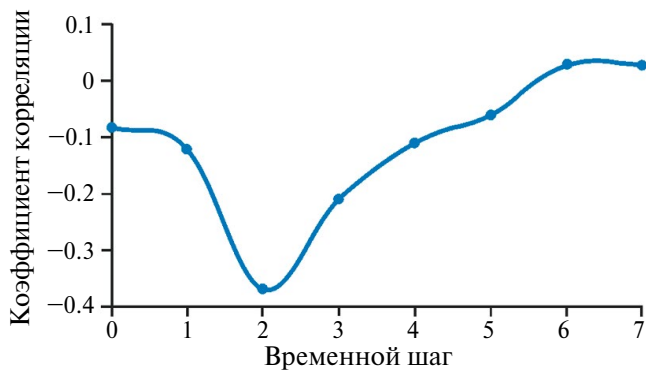


Рис. 6. Корреляция между площадью морского льда и скоростью ветра с различным временным шагом
Fig. 6. Correlation between sea ice area and wind speed with different time steps

влияния скорости ветра на площадь льда Печорского моря составляет именно двое суток. Используя такой временной шаг, далее коэффициенты корреляции рассчитывали как без учета состояния ледяного покрова (данные за все дни, когда среднесуточная скорость ветра превышала 7 м/с и имела одно направление, всего 1881 день), так и отдельно для ситуаций, когда лёд не покрывает море целиком (1046 день) и когда он занимает всю площадь Печорского моря (835 дней). Повышенные значения обратной корреляции (–0.39) были получены, когда ледяной покров полностью не покрывал акваторию Печорского моря. Для всего набора данных ($V > 7$ м/с, вариации направления в пределах 15 градусов) коэффициент корреляции составил –0.21. В случае полностью покрытого льдом моря корреляция близка к нулю (0.02).

Из дней, когда морской лёд ещё не полностью покрыл акваторию Печорского моря и скорость ветра превышала 7 м/с, были отобраны и распределены по группам дни с ветром, дующим в определённом направлении (северном, северо-восточном, восточном, юго-восточном и так далее). В таблице показано распределение коэффициентов корреляции между площадью морского льда и скоростью ветра в дни с определённым направлением ветра. Самые высокие значения обратной корреляции наблюдаются в те дни, когда дует преимущественно юго-западный (коэффициент корреляции –0.22, уровень значимости 0.08) и северо-восточный ветер (–0.15, уровень значимости 0.08), для других направлений ветра значения коэффициента корреляции оказались ниже предела значимости.

Таблица. Изменчивость направлений ветра в Печорском море и его корреляция с площадью морского льда

Направление	Количество значений	Коэффициент корреляции
С	31	–0.01
СВ	199	–0.15
В	136	–0.11
ЮВ	42	–0.07
Ю	52	–0.03
ЮЗ	314	–0.22
З	157	–0.11
СЗ	115	–0.1

Используя построенные в рамках данной работы поля скорости ветра, мы провели тщательный отбор дней, когда над акваторией Печорского моря проходили циклоны. В результате исследования установлено, что за изучаемый период таких дней насчитывалось 761. При этом наибольшее количество циклонов зафиксировано в осенне-зимний период, что соответствует общей сезонной активности циклонов в этих широтах. Отмечено, что прохождение циклона через акваторию Печорского моря продолжалось 1–2 дня и лишь в исключительных случаях циклоны оставались в этом районе на более долгий срок. С 2002 по 2023 г. среднегодовое количество циклонов составило 36. По нашим данным, скорость ветра в дни с присутствием циклонов практически всегда превышала пороговое значение 7 м/с, что подтверждает значительное влияние циклонической активности на ветровые условия в этом регионе. Эти данные получены в ходе анализа всех циклонов, проходящих над акваторией Печорского моря. Интересный результат получен при оценке корреляции между площадью морского льда и скоростью ветра в дни прохождения циклонов. Коэффициент корреляции составил –0.32, что свидетельствует о наличии умеренной обратной связи между этими двумя величинами. Это означает, что в дни с высокой скоростью ветра площадь морского льда, как правило, имеет тенденцию к снижению. Коэффициент корреляции оказался выше уровня статистической значимости, что подтверждает наличие связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с использованием спутниковых данных по сплочённости ледяного покрова, его толщине, а также данных реанализа по скорости ветра на высоте 10 м проанализирована изменчивость ледяного покрова Печорского моря и ветра над морем за период 2002–2023 гг., а также корреляция между этими параметрами. Данное исследование связано с изучением влияния ветра, особенно сильных ветров, развивающихся в циклонах, на площадь морского льда без учёта влияния других немаловажных гидрометеорологических факторов. Работа является одной из серии работ, посвящённых изучению ледяного покрова Печорского моря и факторов, определяющих его изменчивость.

Проанализирована толщина морского льда по данным ICESat/ICESat-2 за периоды 2003–2008 и 2019–2024 гг. Толщина льда более двух метров наблюдалась в начале 2000-х годов (в 2003 г. средняя толщина достигала 2.8 м). Начиная с 2019 г. средняя толщина льда не превышала 1 м даже в самые холодные годы. В конце осени – начале зимы преобладают молодые льды, в декабре-марте за счёт средних однолетних и тонких льдов средняя толщина увеличивается, в конце апреля – начале мая лёд начинает таять, средняя толщина уменьшается. В конце мая – начале июня Печорское море полностью очищается ото льда. Скорость ветра и её распределение по значениям в Печорском море практически не зависит от сезона; наиболее часто встречающиеся значения колеблются в районе 4–5.5 м/с. Сильные ветры со скоростью 10 м/с встречались намного реже и чаще всего наблюдались в осенне-зимнее время. Преимущественными направлениями ветра для Печорского моря являются западные, юго-западные и северо-восточные ветры. Осенью и зимой чаще дуют западные и юго-западные ветры, а весной и летом – восточные и северо-восточные. Над Печорским морем наблюдаются различные типы циклонов: полярные и высокоширотные интенсивные циклоны. Всего с 2002 по 2023 г. наблюдали 761 циклон, среднее их количество за год составило 36. Чаще всего они встречались в осенне-зимнее время. Корреляционный анализ проводился по методу Пирсона для дней, когда наблюдалась высокая скорость ветра (более 7 м/с) и одно направление ветра на большей части акватории (75% акватории с вариацией направления ветра в пределах 15°). Повышенные значения корреляции были достигнуты при временном лаге в два дня для осенне-зимнего периода, пока морской

лёд ещё не полностью покрыл акваторию (значение корреляции составило -0.39). Несмотря на довольно низкие значения коэффициентов корреляции (до -0.39), они являются статистически значимыми (коэффициент значимости 0.08) при рассматриваемом объёме выборки, соответствующем многолетним ежедневным данным. Устойчивое проявление обратной связи между скоростью ветра и площадью морского льда в ряде синоптических ситуаций и в определённые сезоны подтверждает физическую обоснованность наблюдаемого эффекта. Это соответствует результатам аналогичных исследований в Арктике, где влияние ветра, как правило, проявляется в виде корреляций в пределах от -0.2 до -0.65 . В тех случаях, когда морской лёд полностью покрывал область моря, значения корреляции были ниже уровня значимости. Повышенных значений корреляция достигала тогда, когда преимущественными направлениями ветра в акватории Печорского моря были юго-западное (-0.22) и северо-восточное (-0.15). Значение обратной корреляции между скоростью ветра и площадью морского льда во время прохождения через область Печорского моря циклонов составила -0.32 , что выше уровня значимости. Значимая обратная корреляция между скоростью ветра, которая наблюдалась в дни прохождения циклона над морем, и площадью морского льда была найдена только в период, когда лёд ещё не полностью покрывал акваторию моря. В те дни, когда циклоны наблюдались в зимнее время, корреляции не было обнаружено. Из 761 дней, когда над акваторией Печорского моря наблюдались циклоны, значимая корреляция между скоростью ветра и площадью морского льда наблюдалась в 70% случаев (30% случаев относились в основном к зимнему периоду). Это позволяет сделать вывод о регулярном, хотя и не универсальном влиянии циклонов на динамику ледяного покрова в Печорском море, особенно при определённых направлениях ветра и фазах сезонного развития льда.

Установленные корреляции между скоростью ветра и площадью морского льда, особенно в осенне-зимний период, демонстрируют потенциал для создания прогностических моделей ледовой обстановки в зависимости от ветровых режимов. Повышение частоты или интенсивности ветров более 7 м/с может способствовать ускоренному разрушению льда, особенно при неполном ледовом покрытии акватории. Выявленная зависимость от преобладающих направлений ветра (юго-западного и северо-восточного) позволяет уточнять региональные прогнозы динамики

льда и может быть использована для планирования навигации и оценки рисков, связанных с изменением ледовой обстановки. Наличие связи между циклонической активностью и уменьшением площади льда указывает на то, что усиление циклонической активности в условиях изменения климата может привести к более быстрому сокращению ледяного покрова. Несмотря на ограничение, связанное с анализом только одного фактора — ветра, полученные результаты представляют количественную основу для последующего комплексного моделирования, учитывающего влияние температуры воздуха, воды и атмосферной циркуляции. Это позволит повысить точность прогнозов в условиях глобального потепления.

Благодарности. Исследования, представленные в данной статье, выполнены при финансовой поддержке в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSZU-2025-0005.

Acknowledgments. This research was funded 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, С.Л. Дженюк, Г.Г. Зыкова, Ф.С. Терзиев. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 280 с.
- Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Лосев С.М. Природа нарушений сплошности морского ледяного покрова в зимнее время // Материалы гляциол. исследований. 1986. № 56. С. 131—134.
- Дымов В.И., Зубакин Г.К., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А., Скутина Е.А. Ветер и волны в Печорском море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. Т. 4 (94). С. 23—40.
- Жичкин А.П. Динамика межгодовых и сезонных аномалий ледовитости Баренцева и Карского морей // Вест. Кольского научного центра РАН. 2015. № 1 (20). С. 13—17.
- Заболотских Е.В., Балашова Е.А. Динамика морского льда в Печорском море зимой 2019/2020 // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Вып. 14 (1). С. 97—105.
<https://doi.org/10.7868/S207366732101010X>
- Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Режимные характеристики ветра и волнения в Печорском море по данным реанализа метеорологических полей и расчетов по волновой модели // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2016. Вып. 362. С. 19—36.
- 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 RAO / CIS OFFSHORE. 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. междунар. конф. памяти академика А.М. Обухова. М.: ГЕОС, 2014. С. 267—273.
- Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследование Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50—65.
<https://doi.org/10.7868/S0205961413040076>
- Котляков В.М. Морской лёд. // Большая российская энциклопедия. Т. 21. М.: Большая российская энциклопедия, 2012. С. 172.
- Львова Е.В., Заболотских Е.В. Изменчивость ледяного покрова в Печорском море и её корреляция с температурой поверхности Баренцева моря по данным спутниковых наблюдений и реанализа // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 4. С. 625—638.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423040105>
- Печорское море. Системные исследования (гидрофизика, гидрология, оптика, биология, химия, геология, экология, социальноэкономические проблемы) / Ред. Е.А. Романкевич. М.: Море, 2003. 486 с.
- Рябченко С.В., Драчкова Л.Н., Евдокимова И.О., Зарубина Л.А., Попкова С.В. Тематический отчет № 2 по ледовым условиям Печорского моря. Архангельск: САФУ, 2020. 40 с.
- Суркова Г.В., Романенко В.А. Изменение климата и теплообмен между атмосферой и океаном в Арктике на примере Баренцева и Карского морей // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Вып. 67 (3). С. 280—292.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292>
- Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 28—41.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41>
- Beer E., Eisenman I., Wagner T.J.W. Polar amplification due to enhanced heat flux across the halocline // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. № 4. P. 1—10
<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>
- Copernicus Climate Change Service // Электронный ресурс. URL: <https://climate.copernicus.eu/> (Дата обращения: 14.11.2024).

- Dai A., Luo D., Song M., Jiping L. Arctic amplification is caused by sea–ice loss under increasing CO₂ // *Nature Communications*. 2019. V. 10. 121.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>
- Jakobson L., Vihma T., Jakobson E. Relationships between Sea Ice Concentration and Wind Speed over the Arctic Ocean during 1979–2015 // *J. Clim.* 2019. V. 32. P. 7783–7796.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0271.1>
- 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>
- Lundhaug M. ERS SAR studies of sea ice signatures in the Pechora Sea and Kara Sea region // *Can. J. Remote Sen.* 2002. V. 28. № 2. P. 114–127.
<https://doi.org/10.5589/m02-022>
- Pavlova O., Pavlov V., Gerland S. The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach // *J. Mar. Sys.* 2014. V. 130. P. 248–255.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.011>
- Schwarz C., Schröder J. Simulating sea ice drift in the Southern Ocean incorporating real wind data using the LSFEM // *Proc. Appl. Math. Mech.* 2021. Iss. 1. e202100130.
<https://doi.org/10.1002/pamm.202100130>
- Sorteberg A., Kvingedal B. Atmospheric Forcing on the Barents Sea Winter Ice Extent // *Climate*. 2006. V. 19. 2006. P. 4772–4784.
<https://doi.org/10.1175/JCLI3885.1>
- Spreen G., Kaleschke L., Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR–E 89–GHz channels // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. C02S03.
<https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. / Eds. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
- Wang Q. Stronger variability in the Arctic Ocean induced by sea ice decline in a warming climate: Freshwater storage, dynamic sea level and surface circulation // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2012. V. 126. e2020JC016886.
<https://doi.org/10.1029/2020JC016886>
- Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C. Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system // *J. Geophys. Res. Letters*. 2008. V. 35. L22701.
<https://doi.org/10.1029/2008GL035607>
- Архив данных AMSR-E/AMSR2 // Электронный ресурс. URL: <https://data.seaice.uni-bremen.de/> (Дата обращения: 13.03.2025).
- Архив данных ICESat/ICESat-2 // Электронный ресурс. URL: <https://nsidc.org/data/icesat/data> (Дата обращения: 13.03.2025).
- Архив данных реанализа ERA5 // Электронный ресурс. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels> (Дата обращения 13.03.2025).

Citation: L'vova E.V., Zabolotskikh E.V. Variability of the Pechora Sea ice area and the relationship between its area and wind speed according to satellite observations and reanalysis data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (3): 487–501. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030103

Variability of the Pechora Sea Ice Area and the Relationship between Its Area and Wind Speed According to Satellite Observations and Reanalysis Data

© 2025 E. V. L'vova[#], E. V. Zabolotskikh

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

[#]*e-mail: Lvova317@gmail.com*

Received December 9, 2024; Revised May 19, 2025; Accepted June 26, 2025

Variability of the Pechora Sea ice area, wind speed at a height of 10 m and ice thickness were studied for the period from 2002 to 2023 (excluding the 2011/12 season) using satellite and reanalysis data. The influence of wind on the sea ice area was analyzed. The sea ice area values were calculated based on the product of sea ice concentration according to the AMSR2 satellite measurements. To analyze

the wind variability, the daily average ERA5 reanalysis data was obtained by averaging hourly data. To analyze the sea ice thickness, irregular ICESat track measurement data over the Pechora Sea region were used. To study the spatial and temporal variability of the sea ice area and wind, maps of daily average parameter fields were constructed. Visual analysis of the maps and quantitative analysis of the sea ice area and wind values allowed to identify patterns in ice cover changes in the Pechora Sea, wind speed variability, and to highlight the days when intense cyclones were observed over the sea. To study the effect of wind on the sea ice area, the Pearson linear correlation was used for the days when the wind speed exceeded 7 m/s and had predominantly one direction over most of the water area (more than 75%). High values of inverse correlation were found only considering a time lag of two days. With such a lag, higher values of the inverse correlation coefficients between wind speed and sea ice area were found for the autumn–winter period (up to -0.39). During the passage of cyclones through the Pechora Sea area, a correlation was observed between the wind speed and the sea ice area (-0.32).

Keywords: sea ice, wind, Pechora Sea, statistical analysis, AMSR, ERA5, ICESat

REFERENCES

- G.V. Girdjuk, S.L. Dzhenjuk, G.G. Zyкова, F.S. Terziev (Eds). *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR. T. 1. Barentsevo more*. Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas. V. 1. Barents Sea. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1977: 280 p. [In Russian].
- Gorbunov Yu.A., Karelin I.D., Losev S.M. The nature of sea ice discontinuities in winter. *Materialy glaciologicheskikh issledovanij*. Data of Glaciological Studies. 1986, 56: 131–134 [In Russian].
- Dymov V.I., Zubakin G.K., Klevancov Yu.P., Rozhkov V.A., Skutina E.A. Wind and waves in the Pechora Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2012, 4 (94): 23–40 [In Russian].
- Zhichkin A.P. Dynamics of interannual and seasonal ice cover anomalies in the Barents and Kara Seas. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2015, 1 (20): 13–17 [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. <https://doi.org/10.7868/S207366732101010X> [In Russian].
- Zelen'ko A.A., Resnyanskij Yu.D., Strukov B.S. Wind and wave regime characteristics in the Pechora Sea based on reanalysis of meteorological fields and calculations using a wave model. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*. Hydrometeorological research and forecasts. 2016, 362: 19–36 [In Russian].
- Zubakin G.K., Suhii 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 RAO / CIS OFFSHORE*. Proc. of RAO / CIS OFFSHORE, 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. Obukhova*. Turbulence, Atmospheric and Climate Dynamics: Proceedings of the International Conference in Memory of Academician A.M. Obukhov, 2014: 267–273 [In Russian].
- Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A. Is Arctic Ice Cover Becoming Seasonal? *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2013, 4: 50–65. <https://doi.org/10.7868/S0205961413040076> [In Russian].
- Kotlyakov V.M. Sea ice. *Morskoy lyod*. Great Russian Encyclopedia. 2012, 21: 172 [In Russian].
- L'vova E.V., Zabolotskikh E.V. Ice cover variability in the Pechora Sea and its correlation with the surface temperature of the Barents Sea based on satellite observations and reanalysis data. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023, 63 (4): 625–638. <https://doi.org/10.31857/S2076673423040105> [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: More, 2003: 486 p. [In Russian].
- Ryabchenko S.V., Drachkova L.N., Evdokimova I.O., Zarbina L.A., Popkova S.V. Thematic report No. 2 on the ice conditions of the Pechora Sea. *Arhangel'sk: Severnyj arkticheskij federal'nyj universitet*. Arkhangelsk: Northern Arctic Federal University, 2020: 40 p. [In Russian].
- Surkova G.V., Romanenko V.A. Climate change and heat exchange between the atmosphere and the ocean in the Arctic using the Barents and Kara Seas as an example. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2021, 67 (3): 280–292. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-280-292> [In Russian].

- Shalina E.V., Bobylev L.P.* Changing ice conditions in the Arctic according to satellite observations. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2017, 14 (6): 28–41.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-6-28-41> [In Russian].
- Beer E., Eisenman I., Wagner T.J.W.* Polar amplification due to enhanced heat flux across the halocline. *Geophys. Res. Letters*. 2020, 47 (4): 1–10.
<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>
- Copernicus Climate Change Service: Electronic data. Retrieved from: <https://climate.copernicus.eu/> (Last access: November 14, 2023).
- Dai A., Luo D., Song M., Jiping L.* Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂. *Nature Communications*. 2019, 10: 121.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>
- Jakobson L., Vihma T., Jakobson E.* Relationships between Sea Ice Concentration and Wind Speed over the Arctic Ocean during 1979–2015. *J. Clim.* 2019, 32: 7783–7796.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0271.1>
- 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>
- Lundhaug M.* ERS SAR studies of sea ice signatures in the Pechora Sea and Kara Sea region. *Can. J. Remote Sens.* 2002, 28 (2): 114–127.
<https://doi.org/10.5589/m02-022>
- Pavlova O., Pavlov V., Gerland S.* The impact of winds and sea surface temperatures on the Barents Sea ice extent, a statistical approach. *J. Mar. Sys.* 2014, 130: 248–255.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2013.02.011>
- Schwarz C., Schröder J.* Simulating sea ice drift in the Southern Ocean incorporating real wind data using the LSFEM. *Proc. Appl. Math. Mech.* 2021, 1: e202100130.
<https://doi.org/10.1002/pamm.202100130>
- 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>
- Spreen G., Kaleschke L., Heygste, G.* Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. *J. Geophys. Res.* 2008, 113: C02S03.
<https://doi.org/10.1029/2005JC003384>
- Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K.* Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.
- Wang Q.* Stronger variability in the Arctic Ocean induced by sea ice decline in a warming climate: Freshwater storage, dynamic sea level and surface circulation. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2012, 126: 231–240.
<https://doi.org/10.1029/2020JC016886>
- Zhang X., Sorteberg A., Zhang J., Gerdes R., Comiso J.C.* Recent radical shifts of atmospheric circulations and rapid changes in Arctic climate system. *J. Geophys. Res. Letters*. 2008, 35: L22701.
<https://doi.org/10.1029/2008GL035607>
- AMSR-E/AMSR2 data archive: Electronic data. Retrieved from: <https://data.seaice.uni-bremen.de/> (Last access: March 13, 2025).
- ICESat/ICESat-2 data archive: Electronic data. Retrieved from: <https://nsidc.org/data/icesat/data> (Last access: March 13, 2025).
- ERA5 reanalysis data archive: Electronic data. Retrieved from: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels> (Last access: March 13, 2025).