
МОРСКИЕ, РЕЧНЫЕ И ОЗЁРНЫЕ ЛЬДЫ

УДК 502/504 551.326.1

ИЗМЕНЕНИЕ ЛЕДОВИТОСТИ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В XXI ВЕКЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЕКТА CMIP6

© 2025 г. С. В. Щедрик^{1,2,*}, Р. И. Май^{2,3}

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

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³Крыловский научный центр, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: sofikotse@gmail.com

Поступила в редакцию 19.03.2025 г.

После доработки 17.06.2025 г.

Принята к публикации 26.06.2025 г.

Проводится расчёт приведённой ледовитости морей Российской Арктики на основе спутниковых данных, а также результатов моделей проекта CMIP6 MPI-ESM1-2-HR и AWI-CM-1-1-MR. На основании сопоставления основных статистических характеристик полученных рядов за 2015–2023 годы оцениваются различия между данными моделирования и дистанционного зондирования, предлагается выбор оптимального сценария для исследования возможных изменений ледовитости.

Ключевые слова: приведённая ледовитость, MPI-ESM1-2-HR, AWI-CM-1-1-MR, CMIP6

DOI: 10.7868/S2412376525030092

ВВЕДЕНИЕ

Динамика состояния морского льда в настоящее время вызывает существенный научный интерес, особенно на фоне отмечающихся в последние десятилетия отрицательных трендов для целого ряда параметров, характеризующих состояние ледяного покрова, таких как площадь, толщина, объём морского льда и др. (см., например, Шапкин и др., 2021).

Кроме того, понимание возможных сценариев изменения состояния ледяного покрова на протяжении XXI века критически важно для определения траектории развития транспортного и ледокольного судостроения и навигации по Северному морскому пути. Данные о сплошности и толщине льда, служащие основой для исследования возможности прохода, навигационных окон и скорости судов при заданных условиях, могут быть получены с использованием аппроксимации эволюции ледяного покрова линейным или полиномиальным трендом либо стохастическим генератором. Однако в настоящее время, при широком развитии климатических моделей,

их ресурсы могут быть применены для получения более подробных данных о ледяном покрове за большие временные отрезки, вплоть до конца XXI века, что представляет значительный интерес для долгосрочного планирования.

Создаваемые климатические модели – общепланетарные, поэтому оценке их соответствия реальным данным в полярных областях должно быть уделено особое внимание. Данные и результаты моделирования определяются как характеристиками модели, так и сценарием – начальными данными и форсингом, поэтому представляется рациональным сфокусироваться на выборе их оптимальной комбинации.

Одним из показателей, позволяющих оценить состояние и изменчивость ледяного покрова в целом, является ледовитость, которая определяется как отношение занятой льдом площади к общей площади акватории. Простота расчёта показателя и возможность оценить его с использованием данных из различных источников обусловливает активное использование ледовитости в исследовательской работе.

В статье (Холопцев, Кононова, 2017) рассматривается соотношение изменений ледовитости и вариаций атмосферного давления в Арктике с выявлением районов, где повышение или снижение ледовитости статистически значимо связано с перемещением элементарных циркуляционных механизмов и соответствующим изменением преобладающих направлений ветра и дрейфа льда. Аналогичная работа проведена в статье (Moël et al., 2021) с использованием данных серии микроволновых радиометров (Nimbus 7 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR), Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) (F8, F11, F13, F15 Special Sensor Microwave Imagers (SSM/I), F17 Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMI/S)) и применением гармонического анализа, где изучена связь атмосферного давления с колебаниями ледовитости и выявлена обратная связь. В статье (Chen et al., 2021) это сделано для различных метеорологических и океанологических параметров. Влияние атмосферного давления и температуры на ледовитость исследовано с применением корреляционного анализа в работе (Sorteberg, Kvingedal, 2006).

В исследованиях ледовитости применяются спутниковые данные, что решает ряд имеющихся проблем: охват данными значительных территорий, равномерный временной охват, высокая точность привязки местоположения, возможность оперативного использования. Однако дистанционное зондирование Земли (далее – ДЗЗ) связано с появлением новых типов ошибок. В работе (Wernecke et al., 2024) оценены неопределённости спутникового пакета ESA Sea Ice Climate Change Initiative Sea Ice Concentration Climate Data, основанного на данных AMSR-E и AMSR-2 с разрешением 50 км (версия 2.1). В статье (Романюк, Журавлёв, 2013) проводятся аналогичные работы для Охотского и Японского морей. Для оценки точности значений ледовитости, полученных по неконтактным измерениям, составляется единый ряд данных ледовых авиаразведок и зондирования спутниками серий NOAA, “Метеор”, “Космос” за период совместного выполнения (1970–1992).

Отмечено, что спутниковые данные имеют значительные отличия от данных авиаразведок, особенно в сезоны сильных штормов. Корреляционный анализ показал, что ряды ледовитости, рассчитанные по двум источникам данных, слабо скоррелированы в Японском море и хорошо – в Охотском. Выяснено, что при использовании продолжительных рядов наблюдений,

выполненных разными методами, для корректного анализа необходимо рассчитать и ввести поправочные коэффициенты. Исследование с применением ДЗЗ также проведено в работе (Шапкин и др., 2021), где использовались данные многоканальных микроволновых радиометров SSMR-SSM/I-SSM/I-SSMI/S Национального центра данных по льду и снегу США. Авторы подтверждают общий отрицательный тренд ледовитости в Арктике, выделяют циклические колебания ледовитости с периодом в несколько лет и отмечают значительное усиление межгодовых колебаний с 2004 по 2006 г. Аналогичные данные использовались в статье (Lopes et al., 2023), где с применением преобразования Фурье и SSA-анализа определяется связь ледовитости с астрономическими параметрами и индексом AMO (Atlantic multidecadal oscillation, Североатлантическая осцилляция). В работе (Вязигина и др., 2021) с помощью расчёта спектральной плотности и кросскорреляционных матриц оценивается вклад различных предикторов в изменение ледовитости, а в (Лис и др., 2023) аналогичная работа выполняется с помощью построения линейной регрессии.

Ещё один источник данных о ледовитости различных регионов – разные климатические модели, в частности модели пятой и шестой фаз проекта CMIP. Работа (Крашенинников, Крашенинникова, 2019) посвящена корреляционному сравнению расчётов ледовитости по данным моделей GFDL-CM3, IPSL-CM5B-LR, MPI-ESM-MR, INMCM4, IPSL-CM5A-LR, MPI-ESM-LR и HadGEM2-AO CMIP5 с данными контактных наблюдений за период с 1900 по 2014 г., а также сравнению их полиномиальных трендов пятого порядка. Выяснено, что смоделированные значения значительно отличаются от реальных данных. Например, по модельным данным, в начале 2000-х годов наблюдалось увеличение ледовитости Баренцева моря, в то время как в реальности происходило её сокращение. Модели GFDL-CM3, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR оказались наиболее точными и могут быть применены для дальнейших исследований.

Дополнительно оценены связи температуры поверхности и ледовитости Баренцева моря с AMO. В статье (Song, 2016) исследуется сентябрьская ледовитость по данным 30 моделей проекта CMIP5 и соотношение её вариативности с изменчивостью объёма морского льда. Один из основных результатов – выявление отрицательного тренда, интенсифицирующегося в последние двадцать лет.

Отмечено, что в некоторых публикациях понятие “ледовитость” используется не в строгом соответствии с терминологией, а как синоним к площади ледяного покрова или ледовым условиям, как, например, в (Матвеева и др., 2020), где проанализирована связь площади арктических льдов с рядами температур на полярных станциях.

Основная задача работы – верификация данных моделей проекта CMIP6 (MPI-ESM1-2-HR и AWI-CM-1-1-MR) по спутниковым данным, выбор оптимальных реализаций для заданных регионов и оценка возможных изменений ледовитости в течение XXI века.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для расчёта ледовитости выбраны модели из шестой фазы проекта CMIP, спутниковые данные NSIDC и OSISAF.

Проект CMIP6. Международный проект для сравнения объединённых моделей атмосферы, океана и морского льда CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) был создан в 1995 г. рабочей группой по моделированию WGCM (Working Group on Coupled Modelling) Всемирной программы климатических исследований WCRP (World Climate Research Programme) для калибровки, сравнения и усовершенствования создаваемых моделей. Возможность сравнения обеспечивается созданием реализаций моделей в соответствии с обязательными экспериментами с фиксированными граничными условиями. В настоящее время самая современная (шестая) фаза проекта объединяет более 60 моделей, включая разные версии одной модели, и продолжает развиваться. Данные моделирования, как отдельно для каждого источника, так и в составе ансамблей, активно используются в климатологии, гидрологии, океанологии, экологии и социальной географии.

Основной набор данных по ледовым условиям, предоставляемый большинством моделей проекта CMIP, составляют сплошность и толщина льда, толщина снега на льду и составляющие скорости дрейфа. Однако только две модели, MPI-ESM1-2-HR и AWI-CM-1-1-MR, дают суточные данные с пространственным разрешением не хуже 50×50 км. Выбор ограничений для временной и пространственной дискретности основан на характерном времени изменения характеристик ледяного покрова порядка трёх дней и необходимостью использовать данные

с максимально подробной пространственной сеткой для разрешения отдельных участков судоходных трасс, в частности проливов.

Модель MPI-ESM1-2-HR (далее – MPI) предоставляет данные по 135 вертикальным горизонтам – 95 атмосферным и 40 океаническим, представляя собой объединение атмосферной модели ECHAM6.3 и модели океана и морского льда MPIOM. Модель создана в 2013 г. институтом Макса Планка (Германия) с разрешением для ледовых данных 50 км.

AWI-CM-1-1MR (далее – AWI) выпущена в 2018 г. немецким институтом Альфреда Вегенера. Модель включает 141 горизонт (95 океанических и 46 атмосферных), объединяя атмосферную модель ECHAM6.3.04p1 и модель океана и морского льда FESOM1.4. Разрешение для ледовых данных составляет 25 км.

Реализация моделей происходит по некоторым основным траекториям SSP (Shared Socioeconomic Pathways), которые представляют собой прогноз социально-экономических трансформаций общества к 2100 г. Они варьируются от перехода к малой энерго- и ресурсоёмкости (SSP1) до стремительного экономического роста, основанного на эксплуатации богатых, прежде всего топливных, месторождений (SSP5) (Riahi et al., 2017). Их основная идея – прогнозирование концентрации парниковых газов и климатических изменений, вызванных трансформациями в экономике и социуме. В наименовании отдельных сценариев применяется значение радиационного форсинга, показывающее, насколько увеличится количество энергии на единицу земной площади при соответствующих условиях. Для реализации большинства моделей применяются четыре сценария: SSP1-2.6, в котором предполагается изменение технологий производства для перехода к меньшему потреблению энергии и ресурсов (к 2100 г. радиационный форсинг составит $2.6 \text{ Вт}/\text{м}^2$); SSP2-4.5 – характеризуется стремлением к достижению целей устойчивого развития, однако менее удачным, чем в предыдущем сценарии; SSP3-7.0 – отличается усилением регионального неравенства и проблемами с экологической ситуацией в отдельных регионах; SSP5-8.5 – предполагает переход к экономическому благосостоянию за счёт разработки богатых сырьевых, в основном топливных, месторождений. Радиационный форсинг, достигаемый в этих сценариях к концу XXI века, составляет 4.5, 7.0 и $8.5 \text{ Вт}/\text{м}^2$. В дальнейшем сценарии пронумерованы как 126, 245, 370 и 585 соответственно.

Спутниковые данные. NSIDC. Архив Национального центра данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center, далее NSIDC) содержит пакеты данных по различным ледовым характеристикам – сплочённости, возрасту и дрейфу льда. Самые ранние из предоставляемых данных датируются 1978 г.

Применяемый пакет данных содержит информацию о сплочённости льда за период с 26.10.1978 по 31.06.2023 г. Пространственная дискретность – 25×25 км, временная – 1 сутки. Данные собраны сенсорами SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer), SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager), SSMI/S (Special Sensor Microwave Imager/Sounder) на спутниках программы DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), а также на спутнике Nimbus-7.

Спутниковые данные. OSISAF. Этот архив Системы спутникового наблюдения за океаном и морским льдом Европейского метеорологического агентства (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility, далее OSISAF) содержит пакеты данных по сплочённости, возрасту и дрейфу льда, положению ледовой кромки, по такому комплексному параметру, как ледовый индекс, начиная с 1978 г.

Используемый пакет данных (код продукта OSI-401-d) предоставляет информацию о сплочённости льда за период с 1 марта 2005 г. по настоящее время. Пространственная дискретность – 10×10 км, временная – 1 сутки. Данные собраны сенсором SSMI/S на спутниках программы DMSP.

Методика расчёта ледовитости. На основе имеющегося массива данных рассчитывались ряды ледовитости (учитывалась площадь льда, сплочённого до 10 баллов, т.е. суммарная площадь всех льдин без водного пространства между ними) для морей российской Арктики. Для задания полигонов, оконтуривающих исследуемый район, использовались границы соответствующих морей, принятые Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом. Западный сектор включает Баренцево и Карское моря, восточный – море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря. Таким образом, получено десять рядов ледовитости – спутниковые ряды NSIDC (26.10.1978–31.06.2023), OSISAF (19.09.2016–19.10.2023) и модельные ряды AWI и MPI (01.01.2015–31.12.2021) по каждому сценарию для каждого из морей. Промежуток времени с совместным представлением данных всех источников – 19.09.2016–31.06.2023.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведение сравнения путём линейного корреляционного анализа представляется неинформативным в связи с возможным формированием ложной корреляции, обусловленной сезонным ходом. Поэтому для сравнения рядов данных применялись основные статистические характеристики (среднее, среднеквадратическое отклонение (СКО), размах) и автокорреляционный анализ. Дополнительно рассчитывалась среднеквадратическая ошибка модельных рядов относительно ряда NSIDC, выбранного как более близкий по пространственному разрешению к модельным данным.

В целом, климатические модели воспроизводят сезонный ход ледовитости и ежемесячные средние значения, наибольшее расхождение рядов наблюдается в зимний период и составляет не более 10%. Модели завышают значения среднеквадратического отклонения, в особенности в периоды таяния и нарастания льда, месяцы максимального отклонения для спутниковых и модельных рядов не совпадают между собой (рис. 1). Остальные рассчитанные характеристики представлены в табл. 1 и 2.

Отмечено, что коэффициенты тренда большей частью невелики и не являются статистически значимыми (см. табл. 2, значимые коэффициенты отмечены звёздочкой). Таким образом, выбор сценариев по коэффициентам тренда затруднён. При расчётах близкие сценарии определялись как сценарии с минимальной взвешенной суммой отклонений коэффициентов трендов от соответствующих им по натурным данным, причём разности коэффициентов в случае совпадения значимый/значимый или незначимый/незначимый коэффициент тренда имели больший вес. Для всей Российской Арктики наиболее предпочтительным выбраны сценарии AWI126, AWI585 и MPI585 как более близкие по значениям коэффициентов. Однако и они имеют серьёзные отличия, в частности статистически значимые тренды, не зафиксированные по спутниковым данным.

Для оценки близости средних значений и дисперсий дополнительно использовалась проверка гипотез с помощью t -критерия Стьюдента и f -критерия Фишера соответственно, показывающих, являются ли статистически значимыми различия между характеристиками для сравниваемых рядов. В обоих случаях в качестве нулевой гипотезы устанавливалось утверждение о статистической незначимости различий между

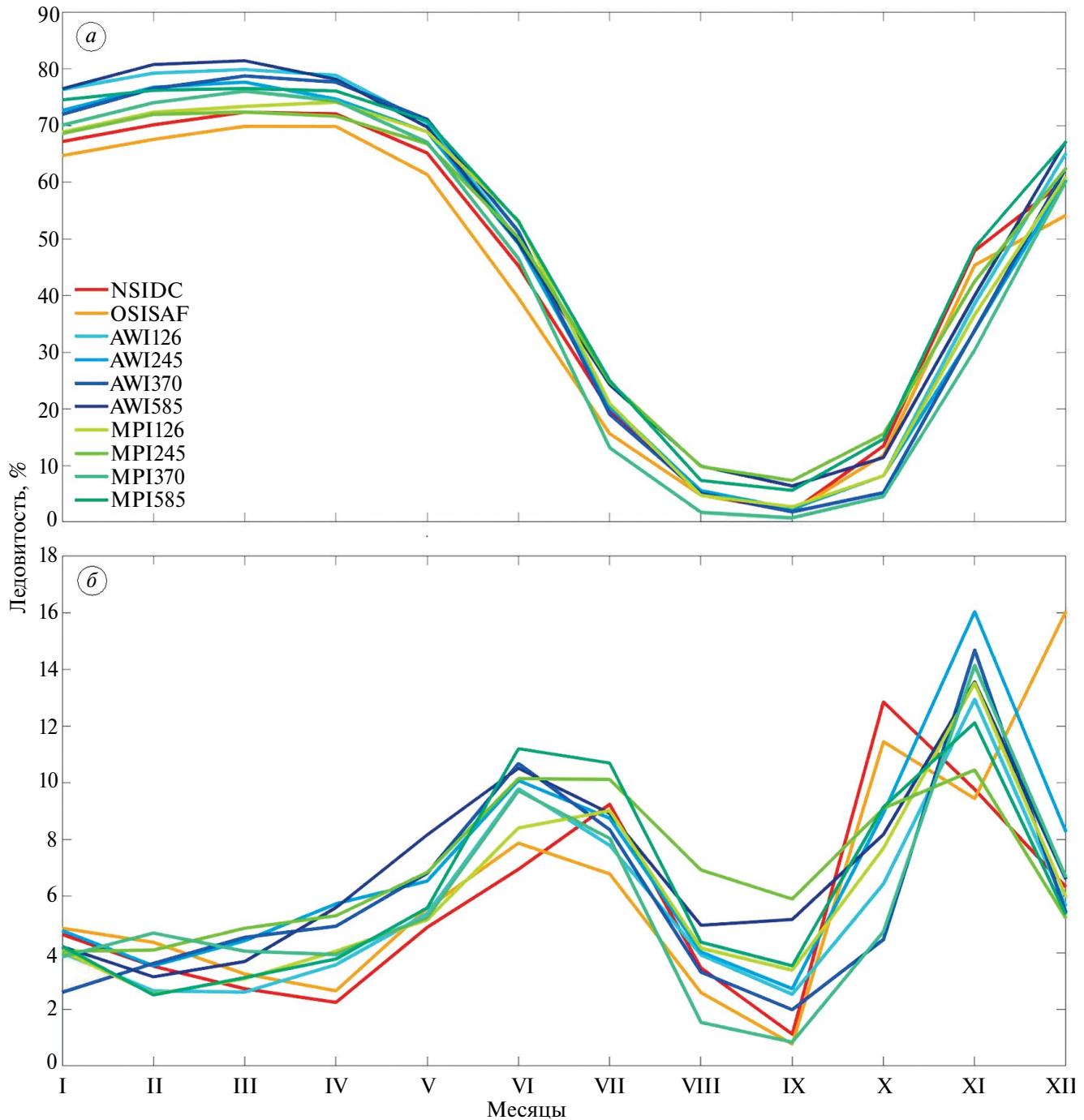


Рис. 1. Среднее (*a*) и среднеквадратическое отклонение (*б*) приведённой ледовитости по спутниковым и модельным данным по различным сценариям

Fig. 1. Mean (*a*) and standard deviation (*б*) of the reduced iciness according to satellite and model data for various scenarios

исследуемой характеристикой ряда NSIDC (выбранного для оценки за счёт близости пространственного разрешения к моделям) и модельного ряда, уровень значимости 0.95. Отобранные сценарии для этого и остальных способов оценки указаны в табл. 3. Расчёты, описанные для общей

акватории Российской Арктики, выполнены для каждого из морей в отдельности и для западного, и восточного секторов. Значительный объём полученных таблиц не позволяет привести их полностью, поэтому в статье вынесены исключительно выбранные сценарии (см. табл. 3).

Таблица 1. Рассчитанные статистические характеристики ледовитости за период пересечения данных

| Показатели | NSIDC | OSI SAF | AWI 126 | AWI 245 | AWI 370 | AWI 585 | MPI 126 | MPI 245 | MPI 370 | MPI 585 |
|--------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Минимум, % | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Максимум, % | 78 | 77 | 87 | 85 | 86 | 90 | 84 | 82 | 83 | 82 |
| Среднее, % | 46 | 43 | 49 | 47 | 47 | 50 | 46 | 48 | 44 | 51 |
| СКО, % | 27 | 26 | 30 | 30 | 30 | 29 | 28 | 26 | 30 | 28 |
| Интервал корреляции, сут. | 40 | 39 | 42 | 43 | 42 | 41 | 41 | 41 | 42 | 40 |
| Среднеквадратическая ошибка, % | — | — | 9.1 | 10.0 | 9.9 | 10.7 | 8.3 | 8.4 | 9.8 | 9.1 |

Таблица 2. Коэффициенты тренда по всей российской Арктике, %/год

| Месяцы | NSIDC | OSI SAF | AWI126 | AWI245 | AWI370 | AWI585 | MPI126 | MPI245 | MPI370 | MPI585 |
|----------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Январь | 0.8* | 0.9* | 0.8* | -1.7 | 0.4 | 0.6 | -1.6 | -1.6 | -1.4 | 1.3 |
| Февраль | 0.4 | 0.6 | 0.9* | -1.5 | 0.8* | -0.2 | -0.6 | -1.8 | -1.7 | 0.9* |
| Март | 0.1 | 0.4 | 0.8* | -1.7 | 1.4 | -0.8* | -0.9* | -1.8 | -1.1 | 1.3 |
| Апрель | 0 | 0 | 1.2 | -1.9 | 1.5 | -1.5 | -1.5 | -2.0 | -1.2 | 1.0 |
| Май | -0.1 | -0.4 | 0.9* | -1.2 | 2.0 | -1.9 | -1.8 | -2.6 | -1.2 | 1.7 |
| Июнь | -0.3 | -0.3 | 0.8* | -1.0 | 1.6 | -2.1 | -0.3 | -3.2 | -0.4 | 0.6 |
| Июль | -2.3 | -1.7 | -2.6 | -2.4 | -2.1 | -3.1 | -2.5 | -4.4 | -1.4 | -2.8 |
| Август | -0.4 | -0.4 | -1.5 | -0.3 | -0.8* | -1.2 | -0.3 | -2.3 | -0.1 | -1.3 |
| Сентябрь | 0 | 0 | -1.1 | -0.4 | -0.5 | 0.3 | 0.3 | -1.5 | -0.1 | -0.6 |
| Октябрь | 0.6 | 0.6 | -1.5 | -2.0 | -1.0 | 0.4 | 0.3 | -2.3 | -0.5 | -1.0 |
| Ноябрь | 1.9 | 1.6 | -0.4 | -4.2 | -2.2 | 0.2 | -2.4 | -2.0 | -2.3 | 0.3 |
| Декабрь | 1.2 | 4.1 | 0.2 | -2.7 | -0.1 | 0.4 | -1.9 | -1.4 | -1.5 | 1.7 |

С использованием подборки сценариев (см. табл. 3) обобщены полученные результаты. Отмечено более качественное отображение и меньший разброс характеристик, в особенности среднеквадратического отклонения, для морей восточного сектора, менее подверженных синоптической изменчивости. В целом, за исключением отдельных сценариев, климатические модели достаточно точно отображают изменения ледовитости. Наиболее сложными в воспроизведении для моделей являются тренды, большей частью малые по абсолютной величине и незначимые. Они практически не воспроизводятся в расчётах; более того, моделирование по отдельным сценариям даёт дополнительные значимые тренды там, где они не прослеживаются по спутниковым данным. Это, однако, может быть связано с короткой длиной сравниваемых рядов.

Обе модели, особенно модель AWI, имеют тенденцию к завышению интервала корреляции (временного лага, при котором значение автокорреляционной функции равно 0.7), что указывает на менее выраженную изменчивость ледовитости по сравнению со спутниковыми данными. Средние значения и дисперсия отражены моделями достаточно точно, однако в ряде сценариев различия со спутниками данными статистически значимы.

Подборка сценариев также указывает, что значительной разницы между качеством обеих моделей нет. На основании частоты встречаемости сценариев (см. табл. 3) были выбраны сценарии, представляющие наибольшую предпочтительность для каждой из рассматриваемых акваторий. Эти сценарии приводятся в табл. 4.

Таблица 3. Выбранные сценарии климатических моделей проекта CMIP-6 для разных акваторий

| Акватории | Основные статистические характеристики рядов | Интервал корреляции | Тест Стьюдента | Тест Фишера | Тренд | Ошибки |
|-------------------------|--|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Все моря | MPI126 MPI245 | AWI585 MPI126 MPI245 MPI585 | AWI126 MPI370 | AWI126 AWI370 AWI585 MPI | AWI126 AWI585 MPI585 | MPI126 MPI245 |
| Западный сектор | MPI370 | | AWI370 | AWI245 | AWI126 MPI370 | AWI370 MPI126 |
| Восточный сектор | MPI585 | | AWI126 | AWI370 MPI126 | AWI370 | MPI245 |
| Море Лаптевых | AWI126 MPI585 | | MPI126 MPI245 | AWI126 AWI370 AWI585 MPI370 | AWI126 AWI370 MPI585 | MPI585 |
| Восточно-Сибирское море | MPI245 MPI370 MPI585 | | MPI585 | AWI370 MPI585 | AWI126 AWI245 AWI370 MPI126 MPI245 MPI370 | AWI370 MPI126 MPI585 |
| Чукотское море | MPI126 MPI245 | | MPI245 | AWI126 AWI585 | MPI126 MPI370 | AWI370 MPI126 MPI370 MPI585 |

Таблица 4. Выбранные сценарии для различных акваторий

| | |
|-------------------------|----------------------|
| Все моря | MPI26 MPI245 |
| Западный сектор | AWI370 MPI370 |
| Восточный сектор | AWI370 MPI126 |
| Баренцево море | MPI370 |
| Карское море | AWI126 MPI245 |
| Море Лаптевых | AWI126 AWI370 MPI585 |
| Восточно-Сибирское море | MPI585 |
| Чукотское море | MPI126 MPI245 MPI585 |

В ходе работы выполнен прогноз изменения ледовитости на протяжении XXI века по различным сценариям, представленный на рис. 2.

Выполненный прогноз показывает, что практически по всем сценариям наблюдается сокращение ледовитости к концу XXI века с различными темпами, большими у сценариев модели AWI, нежели у соответствующих им сценариев MPI, вплоть до падения ледовитости более чем

в два раза. Существенное сокращение прослеживается для сценариев 370 и 585 обеих моделей, для сценариев 245 и 126 разница между состояниями на начало и конец века составила порядка 10% и первых процентов соответственно. Различия между сценариями модели AWI невелики до 2050-х годов, размах сценариев не превышает 10% и накапливается во второй половине века. В модели MPI наблюдаются большие колебания ледовитости внутри одного сценария и, соответственно, больший размах между сценариями уже в начале века. Выбранные наиболее оптимальными сценарии демонстрируют относительно небольшое уменьшение ледовитости арктических морей и существенный размах межгодовых колебаний ледовитости, уменьшающийся к концу века. В марте по обоим сценариям ледовитость будет не ниже 60% до конца XXI века, но в то же время не превысит 90%. В сентябре, в период минимального развития ледяного покрова, по модели AWI по всем сценариям нулевая ледовитость устойчиво достигается уже к 2040-м годам, исключение в отдельные периоды составляет реализация AWI126. По данным модели MPI нулевая ледовитость устойчиво достигается в сентябре

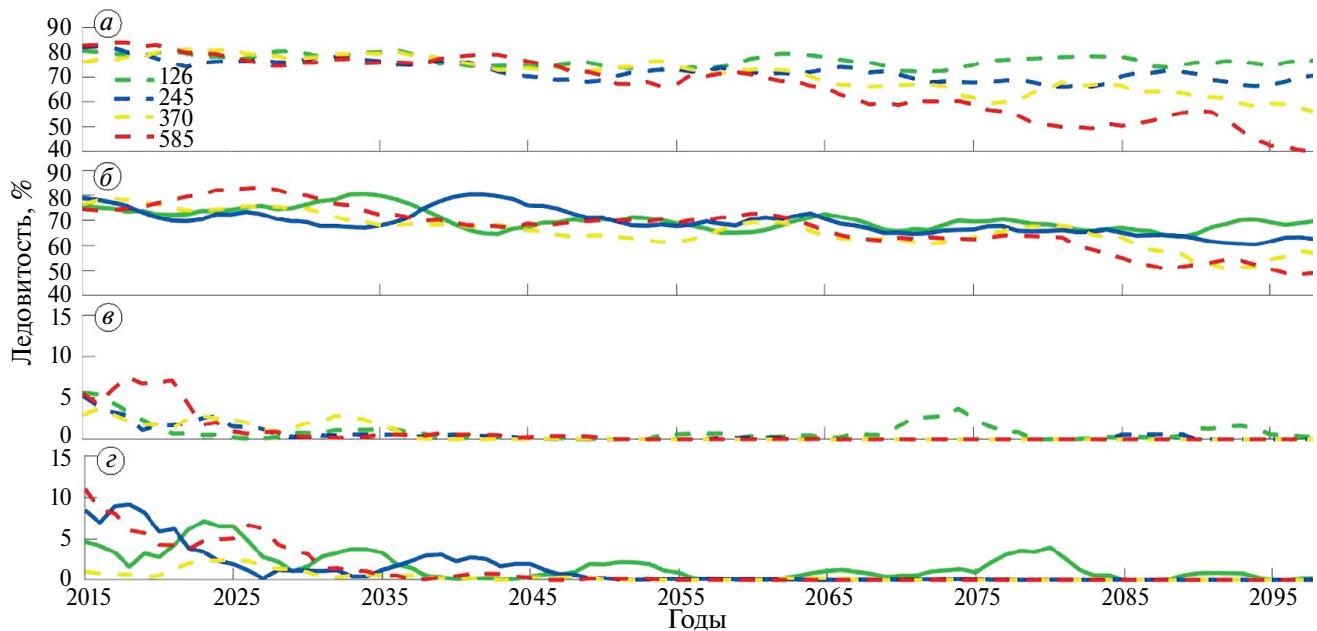


Рис. 2. Прогноз средней ледовитости в российской Арктике в марте (*а, б*) и сентябре (*в, г*) по различным сценариям моделей AWI (*а, в*) и MPI (*б, г*) (выбранные сценарии выделены сплошной линией)

Fig. 2. Forecast of average ice cover in the Russian Arctic in March (*a, b*) and September (*c, d*) according to various scenarios of the AWI (*a, c*) and MPI (*b, d*) models (selected scenarios are highlighted with a solid line)

по сценариям 370 и 585, по одному из выбранных сценариев (245) нулевая ледовитость устойчиво достигается к 2050-м годам, по сценарию 126 нулевая ледовитость достигается только на промежутках в несколько лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие на данный момент статистические закономерности изменения ледовитости, основанные, например, на полиномиальной аппроксимации диагностических данных (Макаров и др., 2022), не могут удовлетворительно применяться для моделирования климатических изменений. Для таких задач наиболее подходящими оказываются результаты численного математического моделирования климата при заданных сценариях изменения естественных и антропогенных факторов. Результаты таких моделей представлены в рамках международного проекта CMIP6, которые часто используются при изучении климатической изменчивости различных метеорологических параметров (Lattonin et al., 2024). При этом ледяной покров, воспроизведённый климатическими моделями, как правило, выпадает из круга интересов исследователей.

В статье восполнен пробел в оценке качества воспроизведения состояния ледяного покрова на основе сравнения перекрывающихся спутниковых и модельных рядов ледовитости. Из проекта CMIP6 выбраны две модели – MPI-ESM1-2-HR и AWI-CM-1-1-MR, предоставляющие ежесуточные данные с пространственным разрешением не хуже 50×50 км, что позволит впоследствии использовать данные при исследовании проходимости морских путей. Получены статистические оценки натурных и модельных рядов ледовитости, позволяющие выявить реализации моделей, наиболее точно воспроизводящие определённое свойство ряда натуральных данных.

Результаты показали, что степень соответствия с данными наблюдений влияет не только сценарий (траектория SSP), но и особенности реализации климатической модели. В частности, на начало века выбранные реализации MPI26, MPI245 имеют значения ледовитости на 3–7% ниже, а сокращение относительно начального положения примерно в два раза большее, чем в соответствующих им сценариях модели AWI. Это свидетельствует о том, что для каждой прикладной задачи оценки изменчивости навигационных условий следует выбирать не сценарий, а конкретную реализацию климатической модели.

На основании совместной оценки рассчитанных статистических характеристик выявлены реализации, в целом наиболее точно отображающие спутниковые данные: реализации MPI26 и MPI245 для всех морей Российской Арктики.

По этим реализациям, выбранным как наиболее близкие к натурным данным, значения ледовитости испытывают колебания с размахом до 10% в первые несколько десятилетий, после чего выравниваются. Ледовитость в период наибольшего развития ледяного покрова сократится на 5% по реализации MPI26 и на 16% по реализации MPI245. В сентябре, согласно одной из выбранных реализаций, можно предполагать очищение морей Российской Арктики ото льда к середине века (MPI245), согласно другой – освобождение ото льда в отдельные годы.

Физически обоснованные и верифицированные результаты климатического моделирования характеристик ледяного покрова необходимы для различных прикладных задач, в том числе для стратегического планирования развития транспортных систем на трассах Северного морского пути. Например, при моделировании методом Монте-Карло изменения окон навигации между Обь-Енисейским районом и незамерзающей частью Баренцева моря в работе (Май и др., 2022) применялся стохастический генератор ледяного покрова с типами условий, основанными на параметрах ледовитости. Выбранные в рамках этой работы комбинации климатической модели и сценария позволяют выполнить подобные расчёты до конца XXI века, спрогнозировать климатические изменения, риски для навигации и интенсивность судоходства в Арктике.

Благодарности. Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-19-00039.

Acknowledgments. This research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation as part of the scientific project No. 23-19-00039.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вязигина Н.А., Тимохов Л.А., Егоров Е.С., Юлин А.В. Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 431–444. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030099>

Крашенинникова С.Б., Крашенинникова М.А. Причины и особенности многолетней изменчивости ледовитости Баренцева моря // Лёд и Снег. 2019. Т. 59 № 1. С. 112–122.

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-112-122>

Лис Н.А., Черняевская Е.А., Миронов Е.У., Тимохов Л.А., Егорова Е.С. Информативность факторов, формирующих долгопериодные колебания ледовитости отдельных районов Баренцева моря // Российская Арктика. 2023. Т. 5. № 2. С. 17–32.

Май Р.И., Гузенко Р.Б., Таровик О.В., Топаж А.Г., Юлин А.В. Стохастическое моделирование полей сплошённости ледяного покрова для оценки условий плавания по трассе Северного морского пути // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 125–140.

Макаров А.С., Миронов Е.У., Иванов В.В., Юлин А.В. Ледовые условия морей Российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 году // Океанология. 2022. Т. 62. № 6. С. 845–856.

<https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>

Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьевая Е.С. Ледовитость арктических морей и её связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 1. С. 134–148.

<https://doi.org/10.31857/S2076673421010029>

Романюк В.А., Журавлев Г.Г. Сравнительная оценка и сопоставимость спутниковых и авиационных данных по ледовитости Охотского моря // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 4. С. 113–118.

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-4-113-118>

Холопцев А.В., Кононова Н.К. Изменение ледовитости зимой и вариации поля атмосферного давления в Арктике // Сложные системы. 2017. Т. 22. № 1. С. 15–35.

Шапкин Б.С., Рубченя А.В., Иванов Б.В., Ревина А.Д., Богрянцев М.В. Многолетние изменения ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 1. С. 128–136.

<https://doi.org/10.31857/S2076673421010076>

Chen R., Dai G., Liu R., Wang L. Seasonal influence of the atmosphere and ocean on the fall sea ice extent in the Barents-Kara Seas // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2021. № 126. e2021JD035144. <https://doi.org/10.1029/2021JD035144>

Latonin M., Bashmachnikov I., Radchenko I., Gnatiuk N., Bobylev L., Pettersson L. Meridional Oceanic and Atmospheric Heat Fluxes at the Entrance to the Atlantic Sector of the Arctic: Verification of CMIP6 Models and Climate Projections Based on the Selected Sub-Ensembles // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. № 24. ES4007. <https://doi.org/10.2205/2024es000917>

Lopes F., Courtillot V., Gibert D., Mouël J. On the annual and semi-annual components of variations in extent

- of Arctic and Antarctic sea-ice // Geosciences. 2023. V. 13. № 1. 21.
<https://doi.org/10.3390/geosciences13010021>
- Mouël J., Lopes F., Courtillot V.* A strong link between variations in sea-ice extent and global atmospheric pressure? // The Cryosphere Discussions. 2021. P. 1–28.
- Riahi K., Vuuren D., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B.C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Delink R., Fricko O., Lutza W., Popp A., Cuaresma J.C., Samir K.C., Leimbach M., Jiang L., Kramb T., Rao S., Emmerling S., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenöder F., Da Silva L.A., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaat D., Masuif T., Rogel J., Strefler J., Drouet L., Kreya V., Luderer G., Harmsen M., Takahashif K., Baumstark L., Doelman J.C., Kainuma M., Klimont Z., Marangoz G., Lotze-Campen H., Obersteiner M., Tabeau A.,*
- Tavoni M.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // Global Environmental Change. 2017. V. 42. P. 153–168.
- Song M.* Change of Arctic sea-ice volume and its relationship with sea-ice extent in CMIP5 simulations // Atmospheric and Oceanic Science Letters. 2016. V. 9. № 1. P. 22–30.
<https://doi.org/10.1080/16742834.2015.1126153>
- Sorteberg A., Kvandal B.* Atmospheric Forcing on the Barents Sea Winter Ice Extent // Journal of Climate. 2006. V. 19. P. 4772–4784.
- Wernecke A., Notz D., Kern S., Lavergne T.* Estimating the uncertainty of sea-ice area and sea-ice extent from satellite retrievals // The Cryosphere. 2024. № 18. P. 2473–2486.
<https://doi.org/10.5194/tc-18-2473-2024>

Citation: *Tsedrik S.V., May R.I.* Changes in the ice cover of the Russian Arctic seas in the 21st century based on the results of climate models of the CMIP6 project. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (3): 476–486. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525030092

Changes in the Ice Cover of the Russian Arctic Seas in the 21st Century Based on the Results of Climate Models of the CMIP6 Project

© 2025 S. V. Tsedrik^{a,b,‡}, R. I. May^{b,c}

^a*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia*

^b*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

^c*Krylov Scientific Center, Saint Petersburg, Russia*

[‡]*e-mail: sofikotse@gmail.com*

Received March 19, 2025; Revised June 17, 2025; Accepted June 26, 2025

Ice cover is one of the main parameters describing the state of the ice cover of various water areas. The simplicity of calculation determines the frequency of using the indicator in research work both for reading the seasonal course and interannual changes in the state of the ice cover, and for verifying model data or reanalysis data. In this paper, ice cover is calculated based on five data sources. The comparison is based on satellite data from the NSIDC DAAC archives October 26, 1978 – March 31, 2023; spatial resolution is 25×25 km, temporal resolution is 1 day; the data were collected by the SMMR, SSM/I, SSMI/S sensors on the DMSP program satellites, as well as the Nimbus-7 satellite) and OSISAF (product code OSI-401-d; March 1, 2005 – present; spatial resolution is 10×10 km, temporal resolution is 1 day; the data were collected by the SSMI/S sensor on the DMSP program satellites). Model data from the international CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) project are used for comparison and verification. Of the more than 40 models of the sixth phase of the project, two were selected that provided the necessary data and were suitable in terms of spatial and temporal resolution – MPI-ESM1-2-HR and AWI-CM-1-1-MR of the Max Planck Institute and the Alfred Wegener Institute, respectively. For all obtained ice coverage series, the mean, standard deviation, range, correlation intervals, trend coefficients and standard error were estimated relative to the NSIDC series for the data intersection period of 19.09.2016–31.06.2023 in each of the Russian Arctic seas, as well as for the water area as a whole. Using the calculated statistical characteristics, satellite data on ice cover were compared with the results of modeling in accordance with different socioeconomic trajectories (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) for both models, the quality of ice cover modeling was assessed, and scenarios were

selected that most closely matched the satellite data for both the entire Russian Arctic water area and for individual seas. Based on the assumed optimal scenarios, possible changes in ice content were predicted.

Keywords: reduced sea ice cover, MPI-ESM1-2-HR, AWI-CM-1-1-MR, CMIP6

REFERENCES

- Vyazigina N.A., Timokhov L.A., Egorov E.S., Yulin A.V. The informativeness of hydrometeorological and astrogeophysical factors in the task of describing interannual fluctuations in the arctic of the Greenland Sea. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021; 61, 3: 431–444. <https://doi.org/10.31857/S2076673421030099> [In Russian].
- Krasheninnikova S.B., Krasheninnikova M.A. Causes and features of the long-term variability of the Barents Sea ice cover. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2019; 59, 1: 112–122. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-112-122> [In Russian].
- Lis N.A., Chernyavskaya E.A., Mironov E.U., Timokhov L.A., Egorova E.S. Informativeness of factors forming long-period fluctuations in the arctic cover of certain areas of the Barents Sea. *Rossiyskaya Arktika. The Russian Arctic.* 2023; 5 (2): 17–32 [In Russian].
- May R.I., Guzenko R.B., Tarovik O.V., Topazh A.G., Yulin A.V. Stochastic modeling of ice cover cohesion fields for assessing navigation conditions along the Northern Sea Route. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2022; 62 (1): 125–140 [In Russian].
- Makarov A.S., Mironov E.U., Ivanov V.V., Yulin A.V. Ice conditions of the seas of the Russian Arctic in connection with the ongoing climatic changes and features of the evolution of the ice cover in 2021. *Okeanologiya. Oceanology.* 2022, 62 (6): 845–856. <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124> [In Russian].
- Matveeva T.A., Semenov V.A., Astafieva E.S. The iciness of the Arctic seas and its relation to surface air temperature in the Northern hemisphere. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2020; 60 (1): 134–148. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010029> [In Russian].
- Romanyuk V.A., Zhuravlev G.G. Comparative assessment and comparability of satellite and aviation data on the arctic Sea of Okhotsk. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2013; 53 (4): 113–118. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-4-113-118> [In Russian].
- Khlopstsev A.V., Kononova N.K. Changes in ice cover in winter and variations in the atmospheric pressure field in the Arctic. *Slozhnye sistemy. Complex systems.* 2017; 22 (1): 15–35 [In Russian].
- Shapkin B.S., Rubchenya A.V., Ivanov B.V., Revina A.D., Bogryantsev M.V. Long-term changes in the ice cover in the area of the archipelagos of Svalbard and Franz Josef Land. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2021, 61 (1): 128–136. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010076> [In Russian].
- Chen R., Dai G., Liu R., Wang L. Seasonal influence of the atmosphere and ocean on the fall sea ice extent in the Barents-Kara Seas. *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 2021, 126: e2021JD035144. <https://doi.org/10.1029/2021JD035144>
- Latonin M., Bashmachnikov I., Radchenko I., Gnatiuk N., Bobylev L., Pettersson L. Meridional Oceanic and Atmospheric Heat Fluxes at the Entrance to the Atlantic Sector of the Arctic: Verification of CMIP6 Models and Climate Projections Based on the Selected Sub-Ensembles. *Russian Journal of Earth Sciences.* 2024, 24: ES4007. <https://doi.org/10.2205/2024es000917>
- Lopes F., Courtillot V., Gibert D., Mouël J. On the annual and semi-annual components of variations in extent of Arctic and Antarctic sea-ice. *Geosciences.* 2023, 13: 21. <https://doi.org/10.3390/geosciences13010021>
- Mouël J., Lopes F., Courtillot V. A strong link between variations in sea-ice extent and global atmospheric pressure? *The Cryosphere Discussions.* 2021: 1–28.
- Riahi K., Vuuren D., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B.C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Delink R., Fricko O., Lutza W., Popp A., Cuaresma J.C., Samir K.C., Leimbach M., Jiang L., Kramb T., Rao S., Emmerling S., Ebi K., Hasegawa T., Havlik P., Humpenöder F., Da Silva L.A., Smith S., Stehfest E., Bosetti V., Eom J., Gernaath D., Masui T., Rogel J., Strefler J., Drouet L., Kreya V., Luderer G., Harmsen M., Takahashi K., Baumstark L., Doelman J.C., Kainuma M., Klimont Z., Marangoni G., Lotze-Campen H., Obersteiner M., Tabeau A., Tavoni M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change.* 2017, 42: 153–168.
- Song M. Change of Arctic sea-ice volume and its relationship with sea-ice extent in CMIP5 simulations. *Atmospheric and Oceanic Science Letters.* 2016, 9 (1): 22–30. <https://doi.org/10.1080/16742834.2015.1126153>
- Sorteberg A., Kvingedal B. Atmospheric Forcing on the Barents Sea Winter Ice Extent. *Journal of Climate.* 2006, 19: 4772–4784.
- Wernecke A., Notz D., Kern S., Lavergne T. Estimating the uncertainty of sea-ice area and sea-ice extent from satellite retrievals. *The Cryosphere.* 2024, 18: 2473–2486. <https://doi.org/10.5194/tc-18-2473-2024>