

УДК 551.467.3 (268.4)

СОВРЕМЕННЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЗОННОГО ХОДА ЛЕДОВОГО ПОКРОВА В МОРЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

© 2023 г. Академик РАН В. А. Семенов^{1,2}, Е. А. Черенкова^{1,2,*}, Т. А. Алдонина^{1,2}

Поступило 29.03.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принято к публикации 04.04.2023 г.

Исследованы характеристики ледовой обстановки в морях Российской Арктики в период спутниковых измерений и выполнены количественные оценки их изменений во второй половине XXI века по данным ансамбля климатических моделей проекта CMIP6 для агрессивного и умеренного сценариев антропогенного воздействия, SSP585 и SSP245. Установлено, что даты установления (ДУ) ледяного покрова и продолжительность периода открытой воды (ППОВ) в целом успешно воспроизводятся ансамблем моделей. Показано, что ДУ в период 2061–2080 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. в среднем по акватории морей будут наблюдаться на один месяц и декаду позже по сценарию SSP245 и на два месяца позже по SSP585. В то же время рост ППОВ может составить более двух с половиной месяцев по сценарию SSP245 и почти четыре месяца по SSP585. Наиболее существенные изменения ДУ на 2–2.5 мес для сценария SSP245 и на 2.5–3 мес для сценария SSP585 ожидаются на севере Баренцева и Карского морей, а также на северо-западе моря Лаптевых.

Ключевые слова: даты установления ледового покрова, продолжительность периода открытой воды, модели климата, спутниковые данные, моря Российской Арктики

DOI: 10.31857/S2686739723600649, **EDN:** RZWGHG

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление в последние десятилетия сопровождается быстрым сокращением площади арктических морских льдов. Для сентября, когда наблюдается сезонный минимум площади морских льдов (ПМЛ), темпы уменьшения площади составляют около 11% в десятилетие за последние 40 лет [10]. При этом сокращение ПМЛ ускорилось в начале XXI века, что может быть связано с рядом положительных радиационных и динамических обратных связей в системе “атмосфера–морской лед–океан” [5]. Происходящие изменения оказывают значительное влияние на окружающую среду, биоразнообразие, экономическую деятельность, в частности, содействуя развитию морских грузоперевозок и облегчая добычу полезных ископаемых в шельфовой зоне морей Российской Арктики [1, 3].

Важными характеристиками происходящей трансформации морских льдов Арктики являются даты установления, схода ледяного покрова и

связанной с этими датами продолжительности периода открытой воды. Данные по концентрации морских льдов, непрерывно получаемые с помощью спутникового микроволнового зондирования с 1979 г. по настоящее время, позволили выполнить оценки ключевых дат (см. методы) сезонного хода ледяного покрова и их изменений в последние десятилетия [14]. В целом в последние сорок лет отмечается увеличение продолжительности периода открытой воды (ППОВ) примерно на десять дней/десятилетие (с разбросом от 4 до 14 дней/десятилетие) [7].

Значительный интерес представляют прогностические оценки будущих изменений ППОВ при продолжающемся глобальном потеплении. Такие оценки важны, в том числе, для обеспечения операционной деятельности и стратегического планирования в нефтегазовой отрасли, развития навигации по Севморпути [3]. Одним из ключевых регионов является Карское море, где расположен ряд перспективных лицензионных участков по добыче нефти и газа, что обуславливает актуальность исследований предсказуемости ледовой обстановки на разных временных масштабах [6].

Глобальные модели климата в численных экспериментах с заданным антропогенным воздействием в среднем для ансамбля моделей воспро-

¹ Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

² Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: cherenkova@igras.ru

изводят общее сокращение площади морских льдов в Арктике в период спутниковых наблюдений с 1979 г. При этом для ансамблей моделей различного поколения отмечается существенный разброс в темпах изменений ПМЛ, особенно ярко выраженный на региональном масштабе [4]. Следует отметить улучшение способности моделей климата в целом воспроизводить наблюдаемые изменения в сентябре в последние 40 лет в каждом последующем поколении моделей [4, 9, 12].

В работе [8] приведены оценки сроков и значений изменений глобальной температуры при достижении определенных значений ППОВ, а также ее эволюции для морей Арктики согласно данным последнего поколения моделей CMIP6 при различных сценариях антропогенного воздействия. В целом для Арктики ППОВ может увеличиться примерно на 70 и 110 дней в конце XXI в. при умеренном (SSP245) и агрессивном (SSP585) сценарии антропогенного воздействия на климат соответственно [8].

В данной работе проводится анализ пространственного распределения дат установления ледяного покрова и продолжительности периода открытой воды для морей Российской Арктики по данным дистанционного зондирования в период 1981–2020 гг., оценка их воспроизведения по сравнению со спутниковыми данными и изменений в период 2061–2080 гг. по данным ансамбля моделей CMIP6. Также представлены изменения этих характеристик для юго-западной части Карского моря, где расположен ряд крупных месторождений природного газа.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Существует несколько ключевых дат в сезонном ходе морских льдов, характеризующих процессы установления и схода ледового покрова (в т.ч. начало и окончание схода и установления, продолжительность периодов таяния, образования, открытой воды), определения которых зависят от целей исследования и используемых данных (см., напр., [2, 6, 14]). В данной работе анализировались ДУ и ППОВ, которые рассчитывались следующим образом. Из всех периодов с суточной концентрацией более 85% в каждом году выбирался период наибольшей длительности. Дата его начала считалась датой установления ледового покрова. Под продолжительностью периода открытой воды понималось количество суток без льда, рассчитанное с учетом дней с суточной концентрацией льда менее 15% в течение календарного года. Верхняя граница дат установления ледового покрова в некоторых узлах спутниковой и модельной сетки в отдельные годы превышала 365 (366) сут, так как начало ледообразования может происходить в начале следующего года, а не в конце текущего года.

Использовались суточные данные о сплошности морского льда за период 1981–2020 гг. из архива Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC) Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) [11] с пространственным разрешением 25×25 км. Эти данные получены с помощью измерений радиояркостной температуры в пассивном микроволновом диапазоне со спутника Nimbus-7 и серии спутников DMSP, использующих микроволновые радиометры SMMR и SSM/I-SSMIS.

Для оценки возможных будущих изменений использовались данные международного проекта по сравнению глобальных моделей климата CMIP6 [13]. Анализировались данные 14 моделей, для которых предоставляются суточные данные концентрации льда в исторических и сценарных экспериментах SSP245 и SSP585 (сценарии умеренного и агрессивного антропогенного воздействия на климат соответственно). Для анализа были использованы десять моделей: CESM2-WACCM, CNRM-CM6-1, EC-Earth3-CC, GFDL-CM4, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, NESM3 и NorESM2-MM. Выбор моделей основывался на оценке среднеквадратической ошибки воспроизведения сезонного хода площади морского льда для всех морей Российской Арктики и позволил исключить модели, показывающие значительное расхождение с данными наблюдений в современный период.

Для устранения проблемы множественных переходов концентрации льда в периоды начала образования и разрушения ледового покрова, к данным суточной концентрации льда использовалась фильтрация исходных данных скользящими средними значениями. Сравнение результатов при различном окне скользящего осреднения показало, что оптимальные результаты достигаются при выборе 20-дневного окна, использованного в данной работе.

ДУ и ППОВ были рассчитаны за каждый год в период 1981–2020 гг. по спутниковым данным и данным каждой отобранной модели по всем узлам спутниковой и модельной сетки, а также в период 2061–2080 гг. по модельным данным. После вычисления характеристик льда по каждой модели они усреднялись по ансамблю 10 моделей. Исследовались ожидаемые изменения рассмотренных характеристик в период 2061–2080 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. Обнаружено, что, согласно критерию Стьюдента, они статистически значимы на уровне 0.05 во всех узлах сетки ансамбля моделей на территории исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Даты установления ледового покрова и продолжительность периода открытой воды пред-

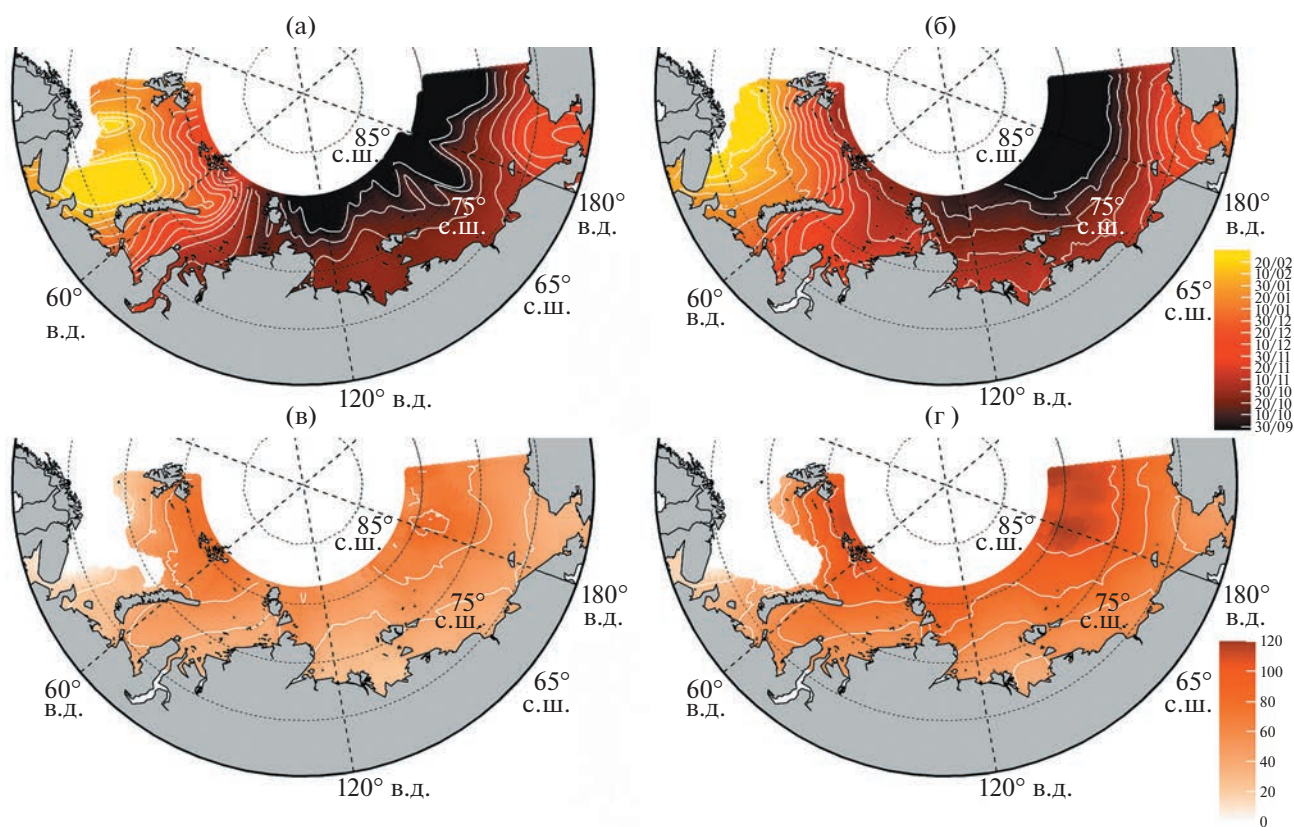


Рис. 1. Даты установления ледового покрова (декады) в морях Российской Арктики в среднем за период 1981–2020 гг. по спутниковым данным (а) и данным ансамбля климатических моделей (б), а также их изменения (дни) в период 2061–2080 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. согласно сценариям SSP 245 (в) и SSP 585 (г).

ставлены на рис. 1. Наиболее поздние ДУ в январе и первой половине февраля в период спутниковых наблюдений отмечаются в Баренцевом море (рис. 1 а). Восточнее Новой Земли, в Карском море, отмечается меридиональная структура изохрон с быстрым ростом ДУ в восточном направлении — со второй половины октября на восточной границе до конца — начала декабря в западной и центральной областях. Такие особенности связаны с притоком теплых атлантических вод в Баренцево море [15]. В море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском распределение ДУ в целом имеет зональную структуру с относительно слабым зональным градиентом ДУ. Ледовый покров в широкой прибрежной области в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море в среднем устанавливается в течение второй декады октября. Чукотское море характеризуется более поздними ДУ вблизи Берингова пролива (конец ноября — начало декабря), что может быть связано с океаническим притоком и влиянием Алеутского минимума.

Модели (в среднем по ансамблю) отображают наблюдаемые особенности пространственной структуры ДУ (рис. 1 б). Вместе с тем следует отметить, что ДУ воспроизводятся ансамблем моде-

лей в более поздние сроки по сравнению со спутниковыми данными: в Баренцевом море в конце декабря и начале января, в Карском море — от конца ноября — первой половины декабря в восточной части акватории до третьей декады октября в западной и центральной областях, в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море в третьей декаде октября, в Чукотском море в первой половине декабря. Такие отличия, в частности, могут быть связаны с осреднением по ансамблю моделей, что делает пространственную структуру более гладкой.

Согласно модельным оценкам, установление ледового покрова в период 2061–2080 гг. будет происходить существенно позже по сравнению с периодом спутниковых измерений. Как показано в табл. 1, ДУ в акватории морей Российской Арктики сдвинутся на 1.1–1.5 мес по SSP245 и на 1.6–2.3 мес по SSP585. Для обоих сценариев наибольшие изменения ДУ в среднем по акватории морей затронут Карское море (табл. 1). При этом предполагается, что наибольшие региональные изменения ДУ произойдут на севере Баренцева и Карского морей, южнее Земли Франца Иосифа, а также на северо-западе моря Лаптевых, и они составят 2–2.5 мес для сценария SSP245 (рис. 1 в)

Таблица 1. ДУ (порядковый номер дня с начала года) и ППОВ (дни) в среднем по акваториям морей Российской Арктики: по спутниковым данным и данным ансамбля климатических моделей за период 1981–2020 гг., согласно сценариям SSP 245 и SSP 585 за период 2061–2080 гг.; а также их изменения (дни) в 2061–2080 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. (все изменения значимы на уровне 0.05)

Период	Источник данных	Характеристики ледовой обстановки	Море				
			Баренцево	Карское	Лаптевых	Восточно-Сибирское	Чукотское
1981–2020 гг.	спутник	ДУ	383	321	294	297	335
		ППОВ	232	79	57	50	127
	SSP 245	ДУ	373	320	303	301	340
		ППОВ	195	85	56	52	120
	SSP 585	ДУ	372	321	304	302	341
		ППОВ	195	86	57	53	120
2061–2080 гг.	SSP 245	ДУ	407	367	339	340	378
		ППОВ	298	176	124	123	186
	SSP 585	ДУ	421	389	361	362	401
		ППОВ	329	221	156	158	230
2061–2080 гг. vs 1981–2020 гг.	SSP 245	ДУ	34	46	36	39	38
		ППОВ	103	91	67	71	66
	SSP 585	ДУ	49	68	58	60	60
		ППОВ	134	135	99	105	109

и 2.5–3 мес для сценария SSP585 (рис. 1 г). Таким образом, ледовый покров в Баренцевом море во второй половине XXI века будет устанавливаться в конце января–начале февраля только в узкой полосе на севере и на юге акватории. Согласно SSP245 его установление в Карском и Чукотском морях будет смещено на декабрь, а в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море – на ноябрь. Сценарные оценки SSP585 предполагают смещение ДУ в среднем на месяц позже по сравнению с SSP245 (табл. 1, рис. 1 в, г).

Анализ ППОВ по спутниковым данным и данным моделей показал сходство их пространственного распределения в период 1981–2020 гг. (рис. 2 а, б). Наибольшая вариативность ППОВ характерна для Баренцева моря. Период открытой воды в центральной части акватории наблюдается круглогодично, а его продолжительность на севере моря составляет в среднем 100 сут. ППОВ в Карском море варьируется от 50 сут на востоке до 100 сут на западе. Наиболее коротка ППОВ в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море: длительность наблюдения открытой воды превышает пятьдесят суток лишь в прибрежной полосе. ППОВ в Беринговом проливе составляет 100–150 сут.

Прогностические оценки ППОВ в период 2061–2080 гг. по данным ансамбля моделей климата свидетельствуют о значительном его увеличении по сравнению с 1981–2020 гг. во всей акватории морей Российской Арктики. По модель-

ным результатам, ППОВ наиболее сильно (на 3–3.4 мес для сценария SSP245 и на 4.5 мес для сценария SSP585) возрастет в Баренцевом и Карском морях, а в остальных восточных морях на 2.2–2.4 мес для сценария SSP245 и на 3.3–3.6 мес для сценария SSP585 (табл. 1). Как видно на рис. 2 в, г, наиболее ощутимые региональные изменения ППОВ ожидаются на севере Баренцева моря (на 4–5 мес по SSP245 и на 6–7 мес по SSP585) и в Карском море: на 4.5 мес для SSP245 и на шесть месяцев для SSP585 на северо-западе его акватории, а также почти на четыре месяца для SSP245 и на 5–5.5 мес для SSP585 на ее юго-западе. Таким образом, ППОВ в узкой полосе на севере и на юге Баренцева моря во второй половине XXI века может возрасти в зависимости от сценария до десяти-одиннадцати месяцев в году (табл. 1, рис. 2 в, г). Длительность периода открытой воды в Карском и Чукотском морях предположительно будет достигать полугода для сценария SSP245 и семи месяцев для SSP585. Ожидаемый рост ППОВ в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море может составить до четырех месяцев в году согласно SSP245 и пяти месяцев при сценарии SSP585.

Наиболее ощутимые изменения ППОВ в прибрежной части морей Российской Арктики во второй половине XXI века по данным модельных прогнозов произойдут на юго-западе Карского моря при использовании обоих сценариев антропогенного воздействия (рис. 2 в, г). На рис. 3 а, б

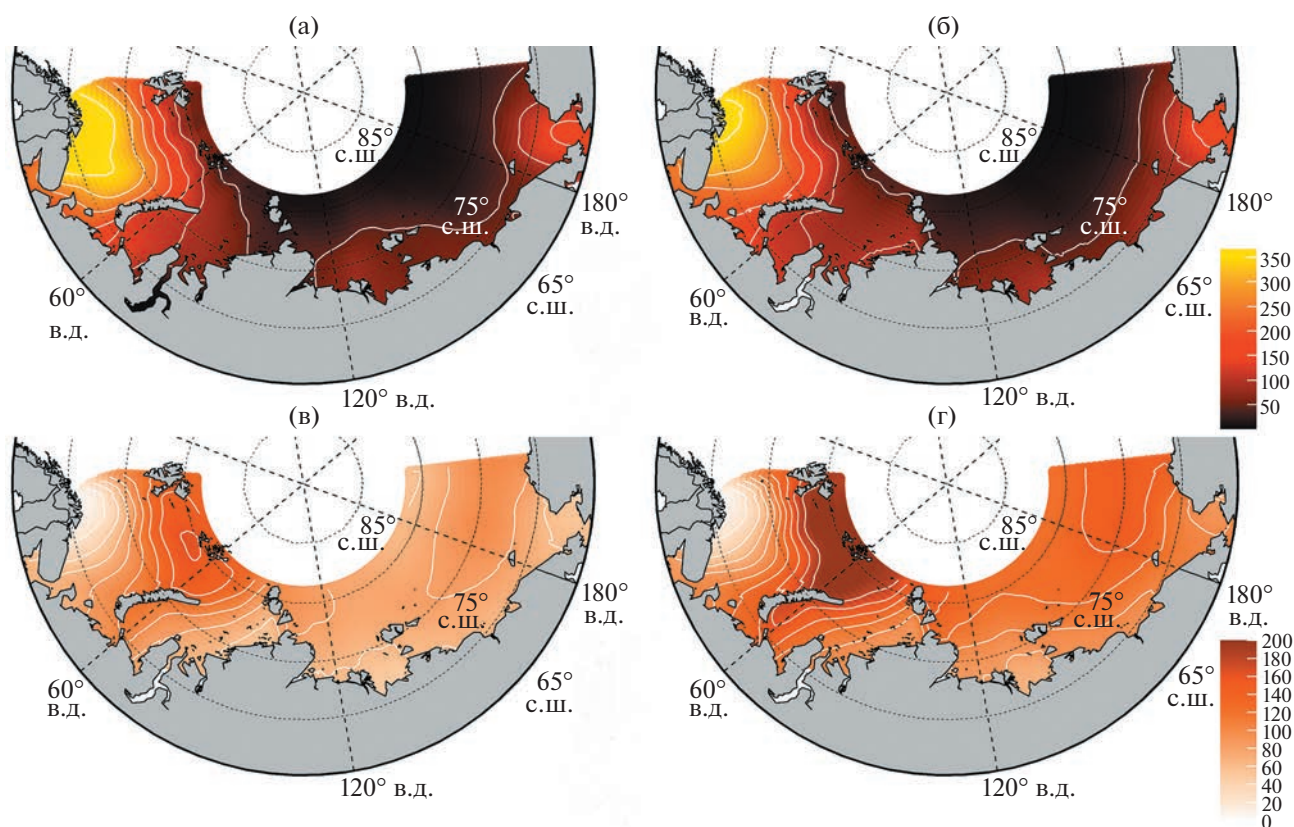


Рис. 2. Продолжительность периода открытой воды (дни) в морях Российской Арктики в среднем за период 1981–2020 гг. по спутниковым данным (а) и данным ансамбля климатических моделей (б), а также их изменения (дни) в период 2061–2080 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. согласно сценариям SSP 245 (в) и SSP 585 (г).

видно, что изменения обеих анализируемых характеристик ледовой обстановки начинают существенно различаться друг от друга лишь со второй половины XXI века. Так, монотонный рост ДУ и ППОВ в регионе продолжится после приблизительно 2050 г. согласно сценарию SSP585, но замедлится согласно сценарию SSP245. Следует также отметить хорошую согласованность модельных оценок (средних по ансамблю) трендов ДУ и ППОВ в период 1981–2020 гг. с оценками по данным спутниковых наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модели климата последнего поколения CMIP6 в среднем для выбранного для анализа ансамбля (10 моделей) достаточно хорошо воспроизводят пространственную структуру дат установления ледового покрова и продолжительности периода открытой воды в российском секторе Арктики в сопоставлении с данными спутникового зондирования в период 1981–2020 гг.

Получены прогностические оценки изменений этих характеристик с использованием умеренного (SSP245) и агрессивного сценариев ан-

тропогенного воздействия на климат для периода 2061–2080 гг. Согласно модельным оценкам, установление ледового покрова в морях Российской Арктики будет происходить в среднем примерно на один месяц и декаду позже для сценария SSP245 и на два месяца позже для сценария SSP585 с наиболее сильными изменениями на севере Баренцева и Карского морей, а также на северо-западе моря Лаптевых (2–2.5 мес для сценария SSP245 и 2.5–3 мес для сценария SSP585). При этом ледовый покров в Карском и Чукотском морях будет устанавливаться в декабре, а в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море — в ноябре согласно SSP245 и еще на месяц позже при сценарии SSP585. ППОВ увеличится на более чем 3 и 4 мес в Баренцевом и Карском морях при сценариях SSP245 и SSP245 соответственно. Аналогичные изменения в восточных морях составят более 2 и 3 мес. Период открытой воды в Карском и Чукотском морях возрастет до полугода по сценарию SSP245 и до семи месяцев по SSP585. Ожидается рост ППОВ в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море до четырех месяцев в году при сценарии SSP245 и пяти месяцев при SSP585.

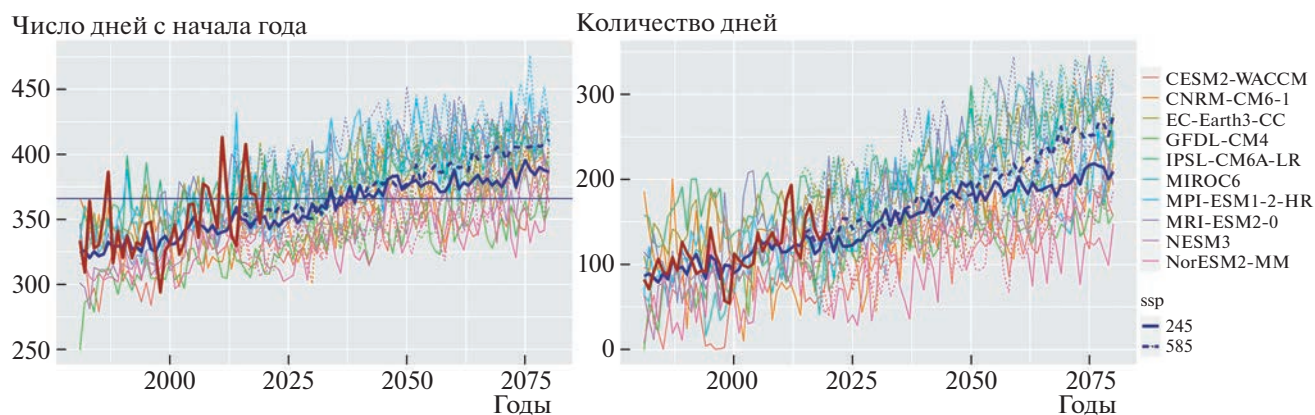


Рис. 3. Межгодовые изменения дат установления ледового покрова (а) и продолжительности периода открытой воды (б) на юго-западе Карского моря (56° – 74° в.д., 70° – 74° с.ш.) по спутниковым данным (жирная линия коричневого цвета) в период 1981–2020 гг., а также данным 10 климатических моделей CMIP6 (тонкие цветные линии) и их ансамбля (жирные линии синего цвета) в период 1981–2080 гг. согласно сценариям SSP 245 (сплошные линии) и SSP 585 (прерывистые линии).

Сравнение эволюции ДУ и ППОВ, рассчитанных по спутниковым и модельным данным для региона на юго-западе Карского моря, показало хорошее соответствие средних для ансамбля климатических трендов ДУ и ППОВ в период 1981–2020 гг. Следует отметить, что заметные расхождения ДУ и ППОВ при двух сценариях антропогенного воздействия происходят лишь со второй половины XXI века. При этом ожидаемые изменения до 2050-х гг. достаточно хорошо описываются линейной экстраполяцией тренда за последние 40 лет.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование характеристик ледовой обстановки в морях Российской Арктики по спутниковым данным проведено в рамках Госзадания Института географии РАН АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009). Анализ и обработка модельных данных осуществлялись при поддержке РНФ (проект 23-47-00104). Прогностические модельные оценки выполнены в рамках Соглашения с Минобрнауки РФ № 075-15-2021-577.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов А.Б., Гагарин В.И., Шеберстов С.В. Влияние регионального потепления на первичную продукцию Карского моря в последние две декады (2002–2021 гг.) // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 2. С. 1–32.
2. Егоров А.Г. Летняя кромка льдов и осенние сроки устойчивого ледообразования в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в 1981–2018 гг. // *Лед и снег*. 2021. Т. 61. № 1. С. 117–127.
3. Парфенова М.Р., Елисеев А.В., Мохов И.И. Изменения периода навигации в арктических морях на Северном морском пути в 21 веке: байесовы оценки по расчетам с ансамблем климатических моделей // *ДАН. Науки о Земле*. 2022. Т. 507. № 1. С. 118–125.
4. Семенов В.А., Мартин Т., Беренс Л.К., Латиф М., Астафьева Е.С. Изменения площади арктических морских льдов в ансамблях климатических моделей CMIP3 и CMIP5 // *Лед и снег*. 2017. Т. 57. № 1. С. 77–107.
5. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // *Изв. РАН Физика атмосферы и океана*. 2021. Т. 61. № 1. С. 21–33.
6. Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Мионов Е.У., Порубаев В.С. Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в юго-западной части Карского моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019. Т. 65 (3). С. 239–254.
7. Bliss A.C., Steele M., Peng G., Meier W.N., Dickinson S. Regional variability of Arctic sea ice seasonal change climate indicators from a passive microwave climate data record // *Environmental Research Letters*. 2019. V. 14. 045003.
8. Crawford A., Stroeve J., Smith A., Jahn A. Arctic Open-Water Periods Are Projected to Lengthen Dramatically by 2100 // *Commun. Earth Environ.* 2021. V. 2. P. 109.
9. Long M., Zhang L., Hu S., Qian S. Multi-Aspect assessment of CMIP6 models for Arctic sea ice simulation // *Journal of Climate*. 2021. V. 34. P. 1515–1529.
10. Matveeva T.A., Semenov V.A. Regional features of the arctic sea ice area changes in 2000–2019 versus 1979–1999 periods // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 1434.
11. Meier W.N., Stroeve J. An updated assessment of the changing Arctic sea ice cover. *Oceanography*. 2022. V. 35. P. 1–10.
12. Notz D., SIMIP Community. Arctic sea ice in CMIP6. *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. e2019GL086749.
13. O’Neil et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 3461–3482.

14. Peng G., Steele M., Bliss A.C., Meier W.N., Dickinson S. Temporal Means and Variability of Arctic Sea Ice Melt and Freeze Season Climate Indicators Using a Satellite Climate Data Record // *Remote Sens.* 2018. V. 10. P. 1328.
15. Smedsrud L.H., Esau I.N., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V., Olsen A., Omar A., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A.B., Semenov V.A., Sorokina S.A. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Rev. Geophysics* // 2013. V. 51. P. 415–449.

MODERN AND PROJECTED CHARACTERISTICS OF SEASONAL CYCLE OF ICE COVER IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS

Academician of the RAS V. A. Semenov^{a,b}, E. A. Cherenkova^{a,b,#}, and T. A. Aldonina^{a,b}

^a *Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: cherenkova@igras.ru*

The characteristics of the sea ice conditions in the Seas of the Russian Arctic during the period of satellite measurements were studied and quantitative estimates of their changes in the second half of the 21st century were made based on the results of the CMIP6 climate models' ensemble using aggressive and moderate scenarios of anthropogenic forcing, SSP585 and SSP245 respectively. It has been revealed that the dates of closing (DOC) of the sea ice cover and the length of the open water season (LOWS) are in general successfully reproduced by the ensemble of models. It is shown that DOC on average over the studied Seas will be observed about forty days later under SSP245 scenario and two months later under SSP585 scenario in 2061–2080 compared to 1981–2020 period. At the same time, the increase of LOWS is more than two and a half months under SSP245 scenario and almost four months under SSP585 scenario. The most significant changes in DOC are expected in the north of the Barents and Kara Seas, as well as in the northwest of the Laptev Sea: 2–2.5 months and 2.5–3 months later for the SSP245 and SSP585 scenarios respectively.

Keywords: dates of ice cover closing, length of open water period, climate models, satellite data, Seas of the Russian Arctic