

# СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА БЕЗЛЕДНОЙ НАВИГАЦИИ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ И ЕЕ ПЕРСПЕКТИВЫ В XXI ВЕКЕ

Е.А. ЧЕРЕНКОВА, В.А. СЕМЕНОВ

*ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ РАН, МОСКВА, РОССИЯ*

*ИНСТИТУТ ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМЕНИ А. М. ОБУХОВА РАН, МОСКВА, РОССИЯ*

# КАКОВА СИТУАЦИЯ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ?

- Глобальное потепление в последние десятилетия сопровождается быстрым сокращением площади арктических морских льдов;
- Площадь морских льдов в сентябре сократилась к 2022 г. по сравнению с 1979 г. почти на 50% (Matveeva, Semenov, 2022);
- Даты установления ледового покрова в период 2061–2080 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. в среднем по акватории морей предположительно будут наблюдаться на один - два месяца позже в зависимости от жесткости сценарного прогноза (Семенов и др., 2023)

*НАБЛЮДАЕМЫЕ И ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ СОПРЯЖЕНЫ СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМИ ЭКОНОМИЧЕСКИМИ И ГЕОПОЛИТИЧЕСКИМИ РИСКАМИ В РОССИЙСКОМ СЕКТОРЕ АРКТИКИ, В ОСОБЕННОСТИ, В ИСКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ (ИЭЗР).*

# ЦЕЛИ:

- Исследование современных изменений ледовитости в Арктике по спутниковым данным;
- Оценка воспроизведения климатическими моделями концентрации морских льдов в Арктике в конце XX-го – начале XXI-го вв. по сравнению со спутниковыми данными;
- Анализ возможных будущих изменений ледовитости в ИЭЗР в Арктике и оценки перспектив ее полного освобождения от морских льдов в XXI веке по данным ансамблевых расчетов с моделями климата последнего поколения.



# ЧТО ИССЛЕДУЕТСЯ:

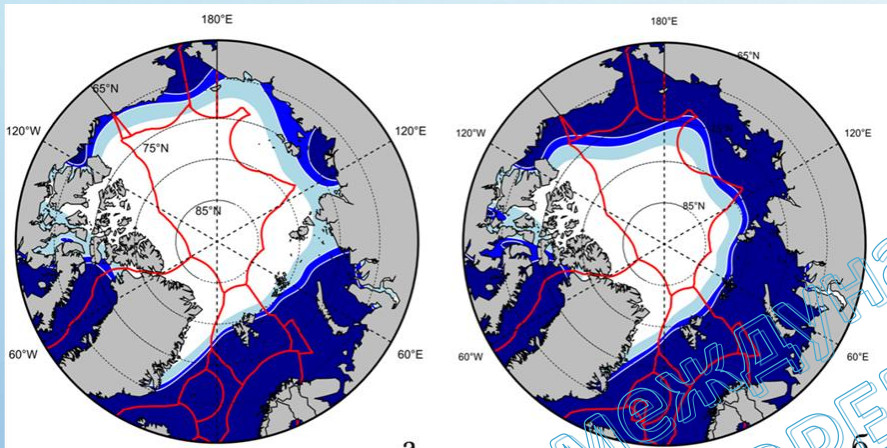
- Современная и ожидаемая динамика концентрации морского льда в сезон наименьшей ледовитости в Арктике;
- Современные (в период 1981-2020 гг.) и ожидаемые в 2031–2050 гг., 2051–2070 гг. и 2071–2090 гг. по сравнению с 1981–2000 гг. изменения продолжительности периода открытой воды (ППОВ), которая определяется как количество суток с концентрацией морских льдов менее 15% в течение календарного года для каждой ячейки архива данных.

# ДААННЫЕ:

- суточные значения концентрации морского льда на сетке 25x25 км, полученные по данным измерений радиояркостной температуры микроволновыми радиометрами SMMR и SSM/I-SSMIS на спутниках Nimbus-7 и DMSP из архива данных Национального центра данных по снегу и льду (NSIDC) Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA);
- суточные значения концентрации морского льда по данным 14-ти климатическим моделям последнего поколения CMIP;
- суточные значения концентрации морского льда по данным ансамбля моделей климата; Итоговый выбор десяти моделей для ансамблевых оценок (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) по данным жесткого SSP245 и умеренного SSP585 сценарных прогнозов основывался на их успешности в воспроизведении сезонного хода площади морского льда для всех морей Российской Арктики.



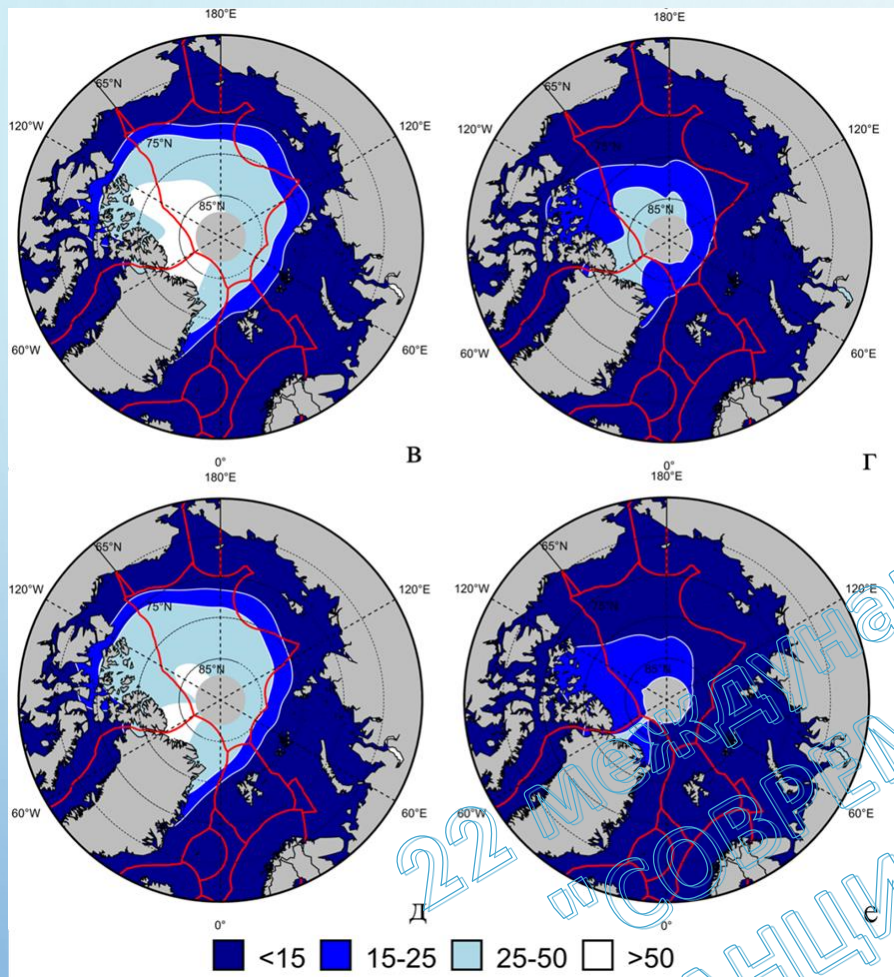
# СОВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ МОРСКОГО ЛЬДА В СЕЗОН НАИМЕНЬШЕЙ ЛЕДОВИТОСТИ В АРКТИКЕ



Концентрация морских льдов в Арктике в сентябре (%), средняя для периодов 1991–2000 гг. (а) и 2011–2020 гг. (б) по спутниковым данным. Границы ИЭЗ показаны линиями красного цвета.

- Освобождение ото льда в сентябре в последние десятилетия происходило более быстрыми темпами в восточной части Арктики по сравнению с ее западной частью;
- ИЭЗ освобождается от льда неравномерно;
- лед в период 2011–2020 гг. по сравнению с 1991–2000 гг. отступал медленнее в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море;
- наименьшие темпы освобождения ото льда наблюдались к востоку от Северной Земли, а также в регионе Айонского ледового массива, который считается наиболее сложным для морской навигации.

# ОЖИДАЕМАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ МОРСКОГО ЛЬДА В СЕЗОН НАИМЕНЬШЕЙ ЛЕДОВИТОСТИ В АРКТИКЕ

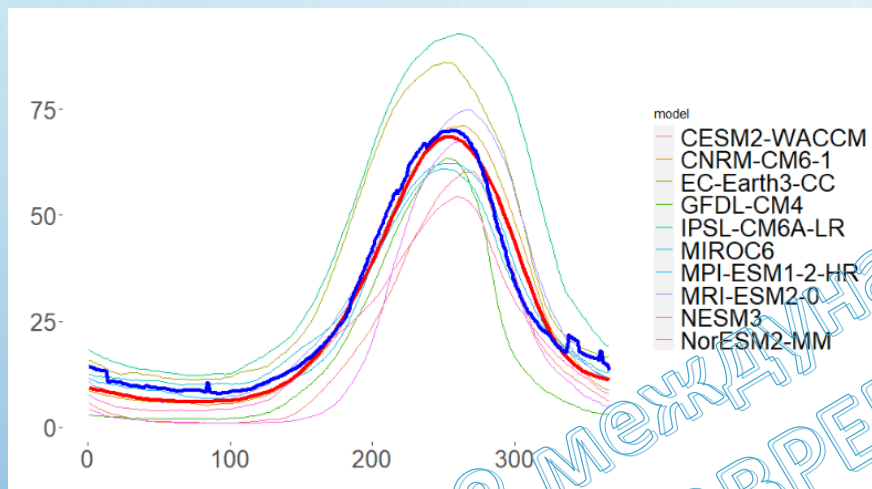


Концентрация морских льдов в Арктике в сентябре (%), средняя для периодов 2031–2040 гг. (в, д) и 2051–2060 гг. (г, е) по данным ансамбля моделей климата при сценариях антропогенного воздействия SSP245 (в, г) и SSP585 (д, е).

- По данным ансамбля климатических моделей следует ожидать сохранения наблюдаемой тенденции в ближайшие сорок лет;
- согласно сценарию SSP245 в период 2031–2040 гг., наиболее проблемной с точки зрения навигации предположительно будет акватория в регионе архипелага Северная Земля;
- безледная навигация в регионе архипелага Северная Земля вне ИЭЗР в ближайшее десятилетие по данным агрессивного сценария SSP585 прогнозируется все еще весьма ограниченной. Тогда как, уже к 2051–2060 гг. состояние безледной Арктики вне границ ИЭЗР ожидается по данным обоих сценарных прогнозов.



# ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ АНСАМБЛЕМ МОДЕЛЕЙ ГОДОВОГО ХОДА ППОВ В ИЭЗР В ПЕРИОД 1981–2000 ГГ.

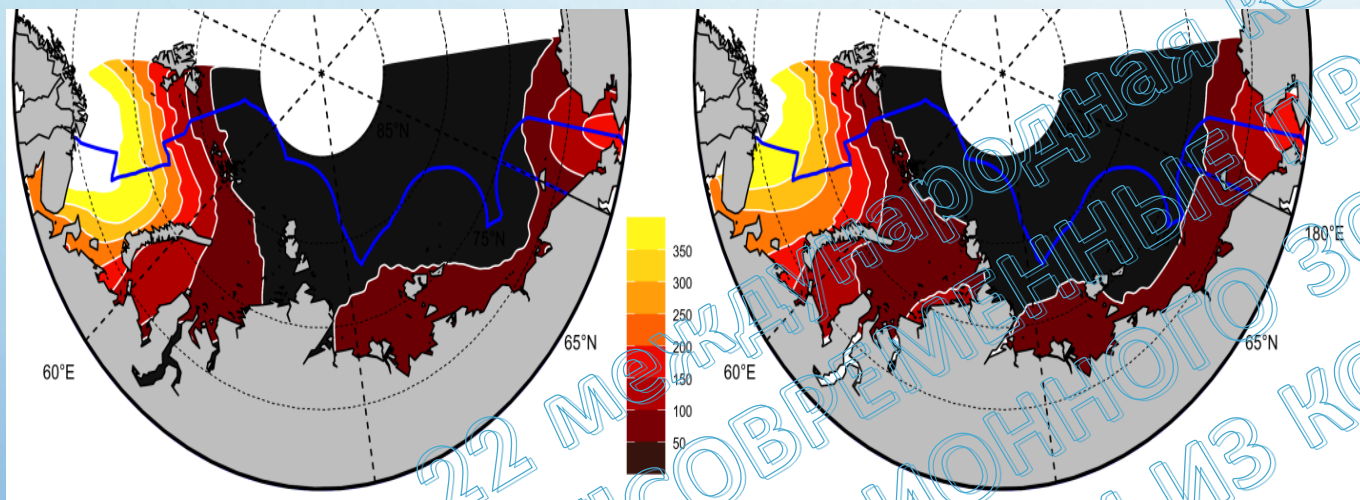


Годовой ход (дни) ППОВ в ИЭЗР в период 1981–2000 гг. по спутниковым данным (полужирная кривая синего цвета), а также по данным климатических моделей (полужирная линия красного цвета).

- Сравнение спутниковых данных и данных ансамбля климатических моделей показало адекватность воспроизведения ансамблем моделей годового хода ППОВ в ИЭЗР в период 1981–2000 гг.;
- Наиболее продолжительный период безледной навигации в течение почти 70 дней наблюдался в сентябре, как по спутниковым данным, так и по данным отдельных моделей и их ансамбля.



# ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ АНСАМБЛЕМ МОДЕЛЕЙ ППОВ В ИЭЗР В ПЕРИОД 1981–2000 ГГ.



Продолжительность периода открытой воды (дни) в морях Российской Арктики по данным ансамбля моделей (а) и по спутниковым данным (б) в среднем за 1981–2000 гг.

- Наибольшие региональные различия ППОВ прослеживаются в Баренцевом море, на востоке Карского моря, а также на юге Восточно-Сибирского моря

# ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА БЕЗЛЕДНОЙ НАВИГАЦИИ В АРКТИКЕ

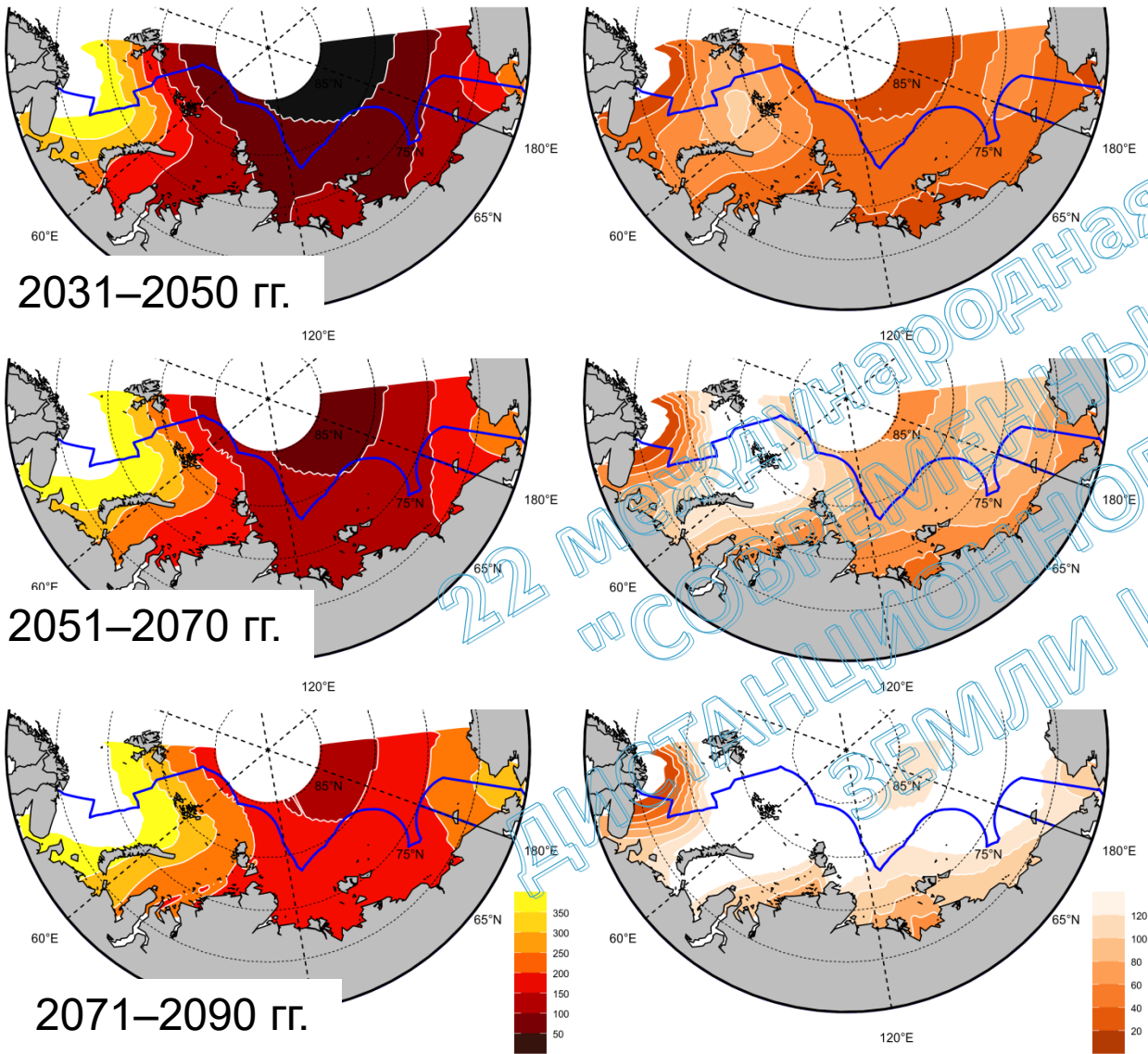
ППОВ (месяцы) в ИЭЗР в границах морей Российской Арктики: в Карском море (55.4° в.д. – 105° в.д.) (I), в море Лаптевых (105.1° в.д. – 140° в.д.) (II), в Восточно-Сибирском море (140.1° в.д. – 180° в.д.) (III) и в Чукотском море (180.1° в.д. – 156° з.д.) (IV) в климатические периоды 1981-2090 гг. по данным сценариев SSP245 и SSP585:

Меридиональный сектор ИЭЗР	Период (годы)			
	1981–2020	2031–2050	2051–2070	2071–2090
<b>SSP245</b>				
<b>I</b>	2.3	4.3	5.3	6.0
<b>II</b>	1.6	2.9	3.7	4.1
<b>III</b>	1.4	2.9	3.6	4.0
<b>IV</b>	3.2	4.8	5.5	5.7
<b>SSP585</b>				
<b>I</b>	2.4	4.4	6.3	7.8
<b>II</b>	1.6	3.1	4.3	5.7
<b>III</b>	1.5	3.1	4.3	5.7
<b>IV</b>	3.2	5.0	6.2	7.8

- Согласно умеренному сценарному прогнозу, продолжительность безледной навигации в ИЭЗР в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море может вырасти в более чем 2.5 раза в период 2071–2090 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. и составить четыре месяца в году во второй половине XXI-го века. В то же время, аналогичный по темпам рост ППОВ в ИЭЗР в Карском море, а также его увеличение в 1.7 раза в Чукотском море в те же периоды может привести к безледной навигации в течение полугода в обеих частях ИЭЗР в период 2071–2090 гг.



# ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА БЕЗЛЕДНОЙ НАВИГАЦИИ В АРКТИКЕ



Продолжительность периода открытой воды (дни) в морях Российской Арктики по данным ансамбля моделей для 2031–2050 гг., 2051–2070 гг. и 2071–2090 гг., а также ее изменения (дни) в среднем для периодов: 2031–2050 гг., 2051–2070 гг. и 2071–2090 гг. относительно периода 1981–2000 гг. для сценария антропогенного воздействия SSP585.

- Ансамблевые оценки ППОВ свидетельствуют о постепенном увеличении продолжительности периода безледной навигации в ИЭЗР в XXI-ом веке как по данным сценария SSP245, так и по данным сценария SSP585

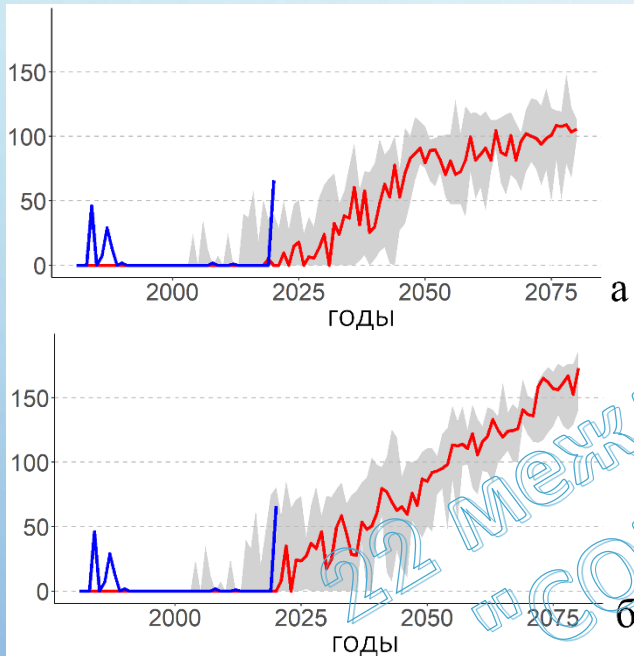
# ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА БЕЗЛЕДНОЙ НАВИГАЦИИ В АРКТИКЕ

По данным SSP585 ожидается:

- Увеличение ППОВ в ИЭЗР в 2071–2090 гг. по сравнению с 1981–2020 гг. в более чем в три раза в Карском море и в 2.4 раза в Чукотском море. ППОВ в ИЭЗР в тот же период может достигнуть в среднем почти восьми месяцев в году;
- При этом наиболее ощутимые темпы роста (почти в 4 раза) ППОВ прогнозируются в среднем по ИЭЗР в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море;
- В результате период безледной навигации в ИЭЗР в обоих морях в 2071–2090 гг. может составить почти полгода.



# ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА БЕЗЛЕДНОЙ НАВИГАЦИИ В АРКТИКЕ



Продолжительность периода открытой воды (дни), в период 1981–2000 гг. по спутниковым данным (кривая синего цвета) и в период 1981–2080 гг. по ансамблю климатических моделей CMIP6 (кривая красного цвета, медианное значение) согласно сценариям SSP245 (а) и SSP585 (б). Серым цветом показан интервал между 25% и 75% перцентилями модельного разброса.

- После 2050 г. ожидается более быстрый рост ППОВ согласно данным сценария SSP585 по сравнению со сценарием SSP245 в среднем по всей ИЭЗР.
- Агрессивный сценарный прогноз предполагает, что 90% ИЭЗР к 2080 году может быть свободной ото льда в течение более 150 дней в году.
- До 2050 г. рост ППОВ по обоим сценариям практически одинаков и составляет примерно два с половиной месяца.

# ВЫВОДЫ:

- ППОВ в морях российской Арктики к концу XXI в. может вырасти от 2.5 до 3.5 месяцев для сценария SSP245 и от 4-х до 5.5 месяцев для сценария SSP585. При этом к середине века изменения ППОВ мало отличаются для обоих сценариев и составляют от 1.5 до 2-х месяцев. ;
- Начиная с 2020-х гг., согласно модельным результатам, начинают реализовываться условия безледной навигации за пределами ИЭЗР. Период безледной навигации монотонно растет и к середине XXI в. может составить более двух с половиной месяцев, причем рост практически одинаков для обоих сценариев антропогенного воздействия. После 2050 г. при умеренном сценарии рост ППОВ замедляется, а для агрессивного сценария продолжается теми же темпами и к 2075 г. может составить примерно 3.5 и 5.5 месяцев, соответственно.