

## Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки

И. И. Мохов<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН,

В. Ч. Хон<sup>2</sup>, кандидат физико-математических наук  
ФГБУН Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

*Получены оценки продолжительности навигационного периода и ее изменений в 1980–2013 гг. для Северного морского пути на основе спутниковых данных о концентрации морских льдов в Арктическом бассейне. Оценена способность современных климатических моделей воспроизводить современный режим морских льдов в Арктике и его изменения в сопоставлении со спутниковыми данными. Сделаны модельные оценки возможных перспектив Северного морского пути в XXI в.*

**Ключевые слова:** Арктика, Северный морской путь, навигационный период, изменения климата, морской лед, спутниковые данные, модельные сценарии.

### Введение

Арктические регионы характеризуются самыми сильными и быстрыми климатическими изменениями — в последние десятилетия до 0,8 K/(10 лет) и более для среднегодовой приповерхностной температуры и до 1 K/(10 лет) и более для среднесезонной. Современная скорость приповерхностного потепления в Арктике существенно больше глобальной и полусферной скоростей. Наиболее впечатляющие изменения связаны с быстрым уменьшением ледовитости Арктического бассейна, особенно в конце лета — начале осени. Это свидетельствует о возможной перспективе отсутствия морских льдов в Арктическом бассейне в летне-осенние месяцы уже в первой половине XXI в. Изменение режима распространения морских льдов в Арктике имеет большое значение в связи с перспективой развития арктических морских транспортных систем и освоением шельфа [1—15; 17—21].

Сильные и быстрые изменения арктического климата требуют всесторонних исследований их причин с оценкой роли естественных и антропогенных факторов. Значительная неопределенность оценок климатических изменений в арктических регионах связана с сильной климатической изменчивостью в высоких широтах. На фоне долгопериодных тенденций проявляются существенные межгодовые и междесятилетние вариации температурного и ледового режимов.

В связи с ожидаемым увеличением доступности судоходной навигации в окраинных морях Северного Ледовитого океана и повышением перспектив использования арктических транспортных систем в сопоставлении со спутниковыми данными необходимы оценки способности современных климатических моделей адекватно воспроизводить изменения режима морских льдов, в частности, для Северного морского пути (СМП). При этом оценки возможных изменений, разумеется, должны зависеть от возможных сценариев естественных и антропогенных воздействий, требований для максимальной степени покрытия акватории льдом, различных для судов разного ледового класса.

В [9; 12; 13; 19] сделаны оценки возможных изменений продолжительности навигационного периода (ПНП) для СМП в XXI в. по расчетам с ансамблем климатических моделей в рамках международного проекта CMIP3 при сценарии умеренных антропогенных воздействий семейства SRES (SRES-A1B). Согласно полученным в [9; 12; 13; 19] модельным оценкам транзит из Западной Европы в Юго-Восточную Азию Северным морским путем может стать более перспективным, чем через Суэцкий канал, даже в зимние месяцы при продолжении тенденции потепления в XXI в.

В данной работе представлены оценки возможных изменений ПНП для СМП в XXI в. по расчетам с ансамблем нового поколения климатических моделей.

<sup>1</sup> e-mail: mokhov@ifaran.ru.

<sup>2</sup> e-mail: khon@ifaran.ru.

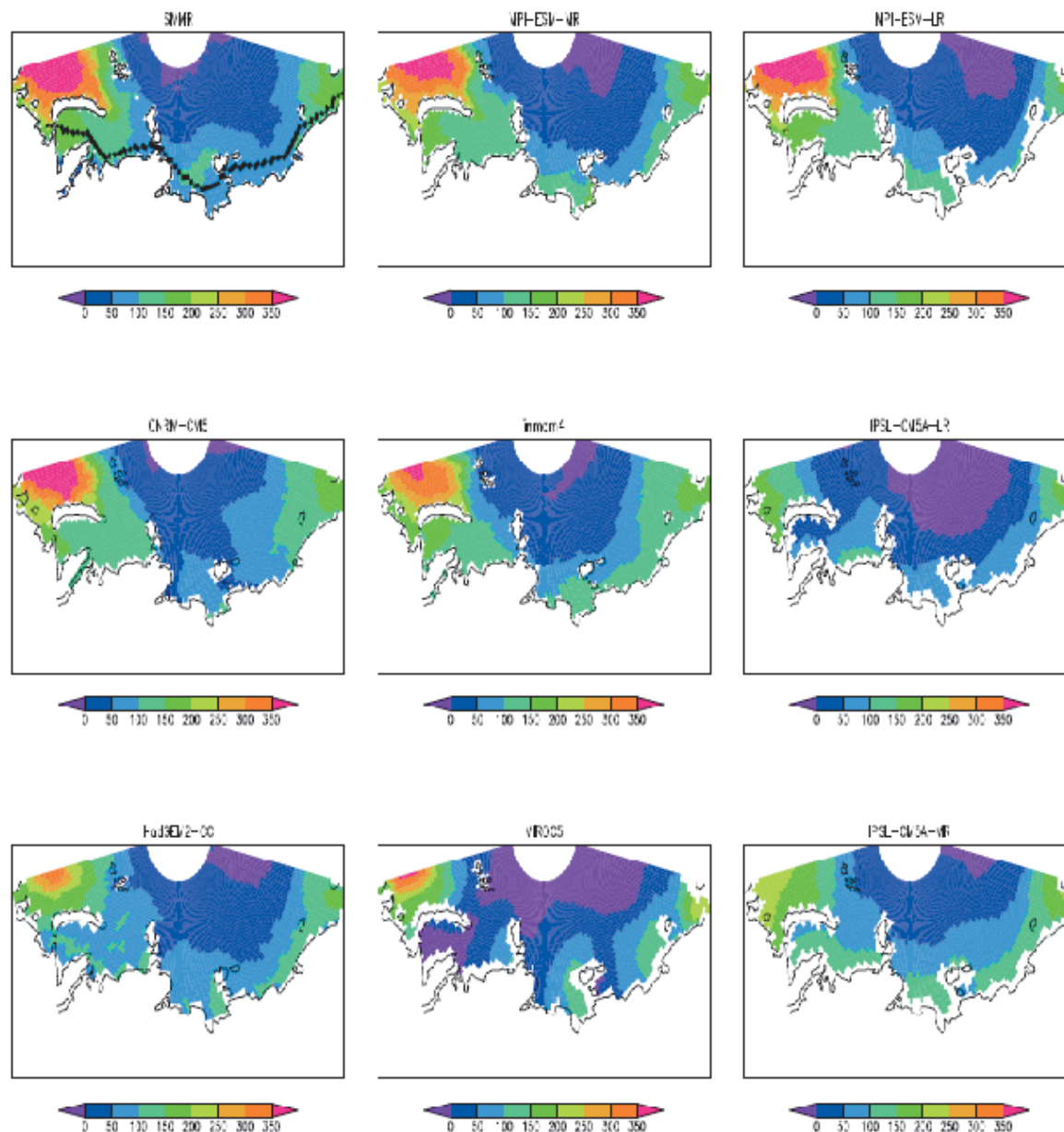


Рис. 1. Средняя продолжительность навигационного периода (сут) при доле морских льдов не более 15% в 1980–2013 гг. по спутниковым данным (SMMR) и по расчетам с ансамблем климатических моделей. Отмечена также трасса СМП, для которой оценивались изменения навигационного периода

### Используемые модельные расчеты и данные наблюдений

Для оценок возможных изменений характеристик морских льдов в Арктике анализировались результаты расчетов с ансамблем современных глобальных климатических моделей в рамках международного проекта CMIP5 при сценариях естественных и антропогенных воздействий семейства RCP. В частности, при анализе использовался сценарий умеренных антропогенных воздействий RCP 4,5 для XXI в. Продолжительность навигационного периода на трассе Северного морского пути оценивалась аналогично [9; 12; 13; 19], где использовались результаты расчетов

с ансамблем предыдущего поколения глобальных климатических моделей CMIP3 при сценариях семейства SRES.

Качество модельных расчетов оценивалось в сопоставлении со спутниковыми данными [16]. При анализе использовались ежедневные данные о концентрации морских льдов, полученные на основе пассивного микроволнового зондирования с использованием радиометров SMMR-SSM/I (Scanning Multichannel Microwave Radiometer — Special Sensor Microwave/Imager) в рамках космических программ «Nimbus-7» и DMSP (Defense Meteorological Satellite Program) для периода 1980–2013 гг.

Тренд, сут за год

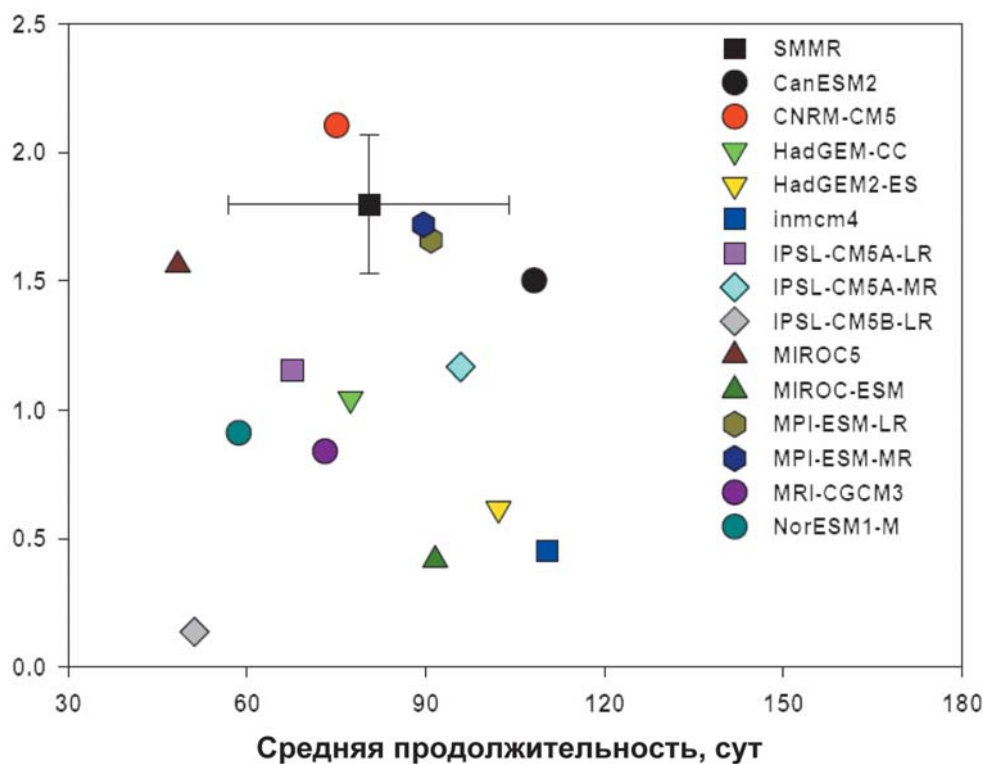


Рис. 2. Средние продолжительность  $T$  и скорость изменения (тренд)  $dT/dt$  навигационного периода при доле морских льдов не более 15% на трассе СМП в 1980–2013 гг. по спутниковым данным (SMMR) и по расчетам с климатическими моделями. Горизонтальными и вертикальными отрезками отмечены соответствующие стандартные отклонения для данных наблюдений

Таблица 1. Значения средней продолжительности навигационного периода при доле морских льдов не более 15% на СМП  $T$  и скорости ее изменения  $dT/dt$  в 1980–2013 гг. по спутниковым данным и по расчетам с тремя климатическими моделями CNRM-CM5, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR

Показатель	Спутниковые данные (SMMR)	CNRM-CM5	MPI-ESM-LR	MPI-ESM-MR
$dT/dt$ , сут/год	1,8 ( $\pm 0,3$ )	2,1 ( $\pm 0,2$ )	1,7 ( $\pm 0,3$ )	1,7 ( $\pm 0,4$ )
$T$ , сут	80 ( $\pm 24$ )	75 ( $\pm 25$ )	91 ( $\pm 24$ )	90 ( $\pm 28$ )

Примечание. В скобках приведены соответствующие среднеквадратические отклонения.

Пространственное разрешение анализируемых спутниковых данных составляет 25×25 км.

Для оценок ПНП использовались различные пороговые значения доли площади океанических модельных ячеек, покрытой морскими льдами. В частности, определялось количество суток в году с долей морских льдов  $n$ , не превышающей 15% (или 85% площади с открытой водой) и 25% (75% площади с открытой водой), что может соответствовать условиям безопасного функционирования морских судов различного ледового класса.

**Сравнительный анализ результатов модельных расчетов с данными наблюдений**

Результаты модельных расчетов в сопоставлении со спутниковыми данными для характеристик морских льдов выявляют значимые различия. На рис. 1

представлена средняя ПНП в 1980—2013 гг. по спутниковым данным (SMMR) и по расчетам с ансамблем климатических моделей при  $n_i$  не более 15%. Можно видеть существенный разброс региональных оценок средней продолжительности навигационного периода в Арктическом бассейне по разным модельным расчетам. Наряду с оценками ПНП для разных регионов (акваторий) Арктического бассейна по модельным расчетам в сопоставлении с данными спутниковых наблюдений сделаны оценки продолжительности навигационного периода в целом для СМП, в частности, для трассы, отмеченной на рис. 1.

На рис. 2 представлены средние значения продолжительности и скорости изменения (тренда) навигационного периода на трассе Северного морского пути в 1980—2013 гг. по расчетам с климатическими моделями в сравнении с полученными по спутниковым данным (SMMR). Горизонтальными и вертикальными отрезками отмечены соответствующие среднеквадратические отклонения (СКО) для данных наблюдений.

Согласно рис. 2 лучше всего соответствуют полученным по спутниковым данным (1980—2013 гг.) средним значениям продолжительности  $T$  и скорости изменения  $dT/dt$  (тренда) навигационного периода на трассе Северного морского пути три климатические модели — CNRM-CM5, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR (с отклонениями около СКО или меньше). Следует отметить, что в целом модели недооценивают скорость изменений ПНП. CNRM-CM5 — единственная модель, для которой  $dT/dt$  больше, чем по спутниковым данным. Что касается средних значений ПНП, то для половины проанализированных моделей они меньше, чем по спутниковым данным, а для половины — больше.

В табл. 1 представлены значения средней ПНП при доле морских льдов не более 15% на СМП и скорости ее изменения

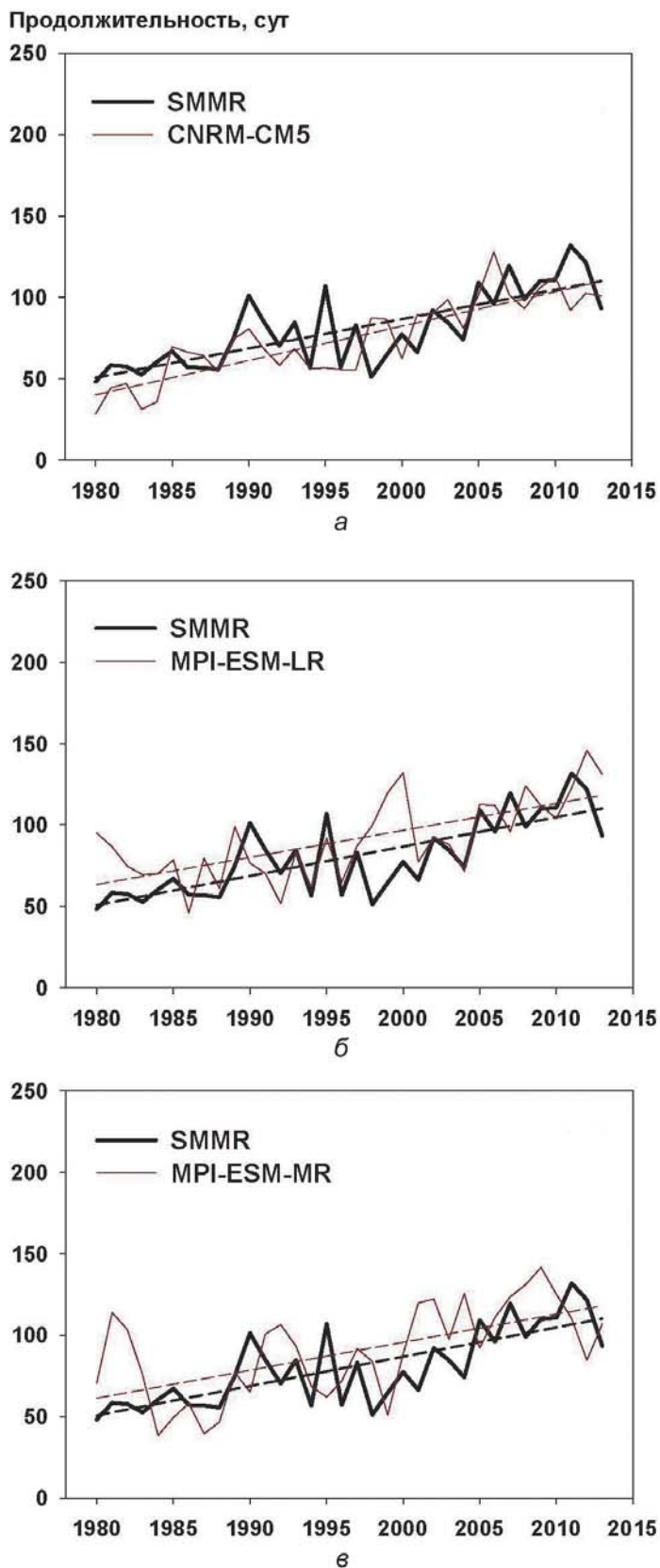


Рис. 3. Межгодовые вариации продолжительности навигационного периода  $T$  (сут) при доле морских льдов не более 15% в 1980—2013 гг. по модельным расчетам в сопоставлении со спутниковыми данными (SMMR): CNRM-CM5 (а), MPI-ESM-LR (б), MPI-ESM-MR (в). Прямые (отмечены пунктиром) характеризуют соответствующие линейные тренды

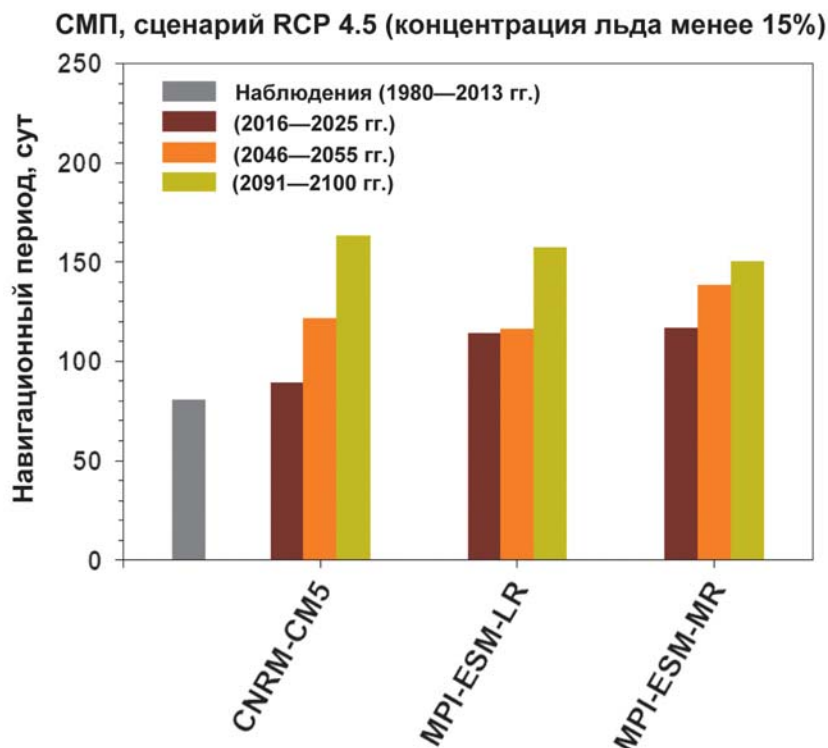


Рис. 4. Оценки средней продолжительности навигационного периода  $T$  (сут) на СМП по расчетам с тремя климатическими моделями (CNRM-CM5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR) для разных 10-летних периодов в XXI в. (2016—2025 гг., 2046—2055 гг., 2091—2100 гг.) при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 в сопоставлении со средней продолжительностью по спутниковым данным для современного периода (1980—2013 гг.)

Таблица 2. Значения средней продолжительности навигационного периода при доле морских льдов не более 15% на СМП  $T$  и скорости ее изменения  $dT/dt$  по расчетам с тремя климатическими моделями CNRM-CM5, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR для разных 10-летних периодов в XXI в. при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5

Показатель	CNRM-CM5	MPI-ESM-LR	MPI-ESM-MR
2016—2025 гг.			
$dT/dt$ , сут/год	2,6 ( $\pm$ 1,3)	0,9 ( $\pm$ 2,1)	1,0 ( $\pm$ 2,1)
$T$ , сут	89 ( $\pm$ 14)	114 ( $\pm$ 18)	117 ( $\pm$ 18)
2046—2055 гг.			
$dT/dt$ , сут/год	4,0 ( $\pm$ 0,8)	-4,7 ( $\pm$ 2,2)	3,2 ( $\pm$ 1,8)
$T$ , сут	121 ( $\pm$ 14)	116 ( $\pm$ 23)	139 ( $\pm$ 18)
2091—2100 гг.			
$dT/dt$ , сут/год	0,8 ( $\pm$ 0,7)	2,4 ( $\pm$ 1,3)	-0,7 ( $\pm$ 2,0)
$T$ , сут	163 ( $\pm$ 7)	157 ( $\pm$ 13)	150 ( $\pm$ 17)

**Примечание.** В скобках приведены соответствующие среднеквадратические отклонения.

в 1980—2013 гг. по спутниковым данным и по расчетам с тремя wybranными («лучшими») климатическими моделями — CNRM-CM5, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR. Согласно табл. 1 лучшие климатические модели способны адекватно воспроизводить не только среднюю ПНП на СМП, но и скорость ее изменения. При этом существенно, что и характерные межгодовые вариации, характеризующие СКО, в лучших моделях хорошо соответствуют отмеченным по спутниковым данным.

На рис. 3 представлены межгодовые вариации ПНП при доле морских льдов не более 15% в 1980—2013 гг. по модельным расчетам в сопоставлении со спутниковыми данными (SMMR). Прямые (отмечены пунктиром) характеризуют соответствующие линейные тренды. При очень хорошем соответствии средних значений ПНП для СМП, их трендов и СКО проявляются существенные отличия от отмеченных по спутниковым данным для отдельных лет.

На рис. 4 приведены оценки средней ПНП на СМП по расчетам с тремя климатическими моделями (CNRM-CM5, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR) для разных 10-летних периодов в XXI в. (2016—2025 гг., 2046—2055 гг., 2091—2100 гг.) при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 в сопоставлении со средней продолжительностью по спутниковым данным для современного периода (1980—2013 гг.). При общей согласованности тенденций изменений ПНП в XXI в. проявляются существенные количественные различия даже для выделенных лучших моделей.

На рис. 5 приведены модельные оценки межгодовых вариаций ПНП при доле морских льдов не более 15% в 1980—2100 гг. по расчетам при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 в сопоставлении со спутниковыми данными. На фоне общей тенденции увеличения ПНП отмечается большая межгодовая



и междесятилетия изменчивость. Отмеченное на рис. 4 слабое увеличение ПНП в 2046—2055 гг. по расчетам с MPI-ESM-LR связано с периодом существенного уменьшения ПНП в середине XXI в. Наиболее сильное увеличение ПНП на рис. 4 по расчетам CNRM-CM5 связано с тем, что для 10-летнего периода 2016—2025 гг. отмечены пониженные значения ПНП, а для последнего десятилетия 2091—2100 гг. — наименьшая изменчивость ПНП (см. рис. 5).

Нелинейность отмеченных на рис. 5 изменений ПНП для СМП проявляется в табл. 2, где представлены количественные оценки средней ПНП при доле морских льдов не более 15% на СМП и скорости ее изменения по расчетам с тремя климатическими моделями CNRM-CM5, MPI-ESM-LR и MPI-ESM-MR для разных 10-летних периодов в XXI в. при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5. При общей тенденции увеличения ПНП в связи с существенной междесятилетней изменчивостью для отдельных десятилетий отмечаются отрицательные тренды ПНП, в том числе значимые, например, по расчетам для середины XXI в. с MPI-ESM-LR. Стоит отметить, что к концу XXI в. по сравнению с его началом проявляется общая тенденция уменьшения значений СКО ПНП.

Оценки зависят от требований для максимальной степени покрытия акватории льдом и различаются для судов разного ледового класса. Для сравнения на рис. 6 представлены оценки средней ПНП при доле покрытия льдами менее 25% на СМП по расчетам с ансамблем климатических моделей для разных 10-летних периодов в XXI в. при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5. Оценки существенно зависят от возможных сценариев антропогенных воздействий. В частности, согласно [11] по расчетам с климатической моделью HadGEM2 (характеризуемой сравнительно высокой чувствительностью) при

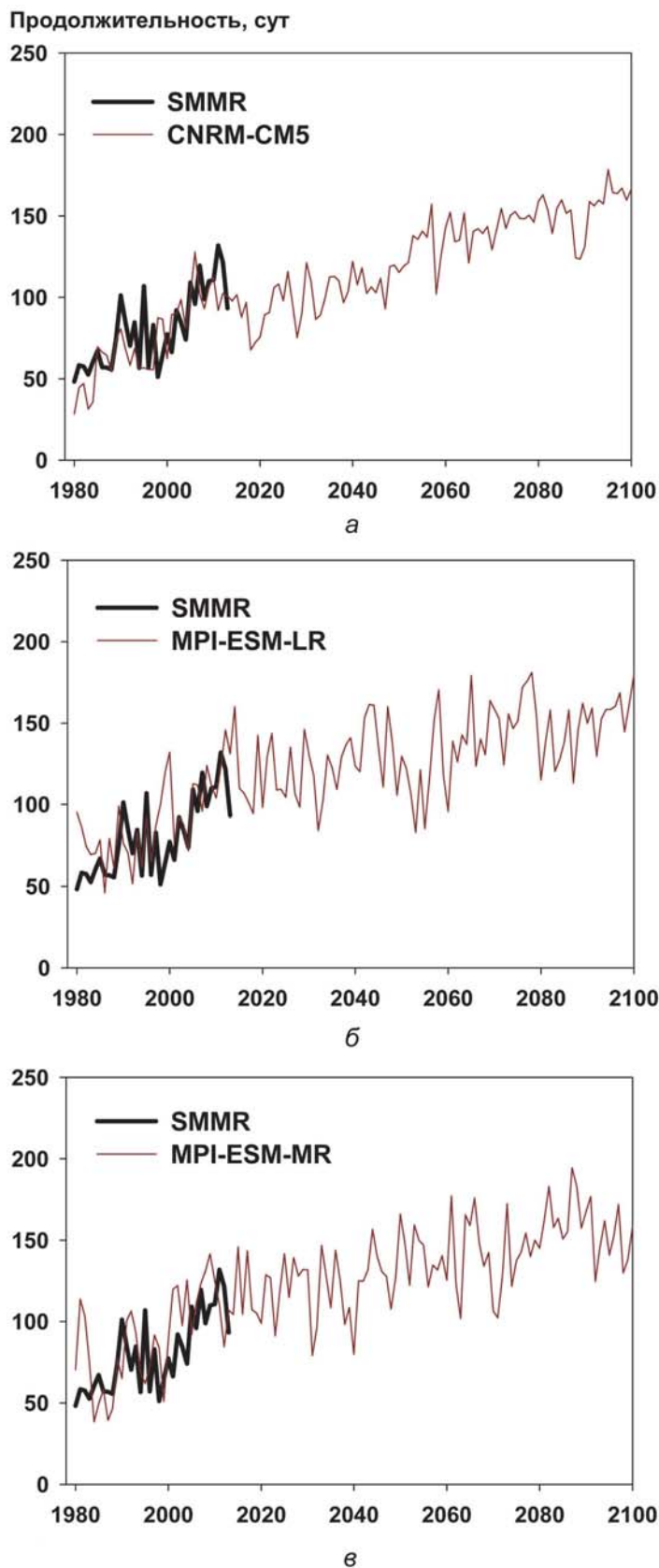


Рис. 5. Межгодовые вариации продолжительности навигационного периода  $T$  (сут) при доле морских льдов не более 15% в 1980—2100 гг. по модельным расчетам при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 в сопоставлении со спутниковыми данными (SMMR): CNRM-CM5 (а), MPI-ESM-LR (б), MPI-ESM-MR (в)

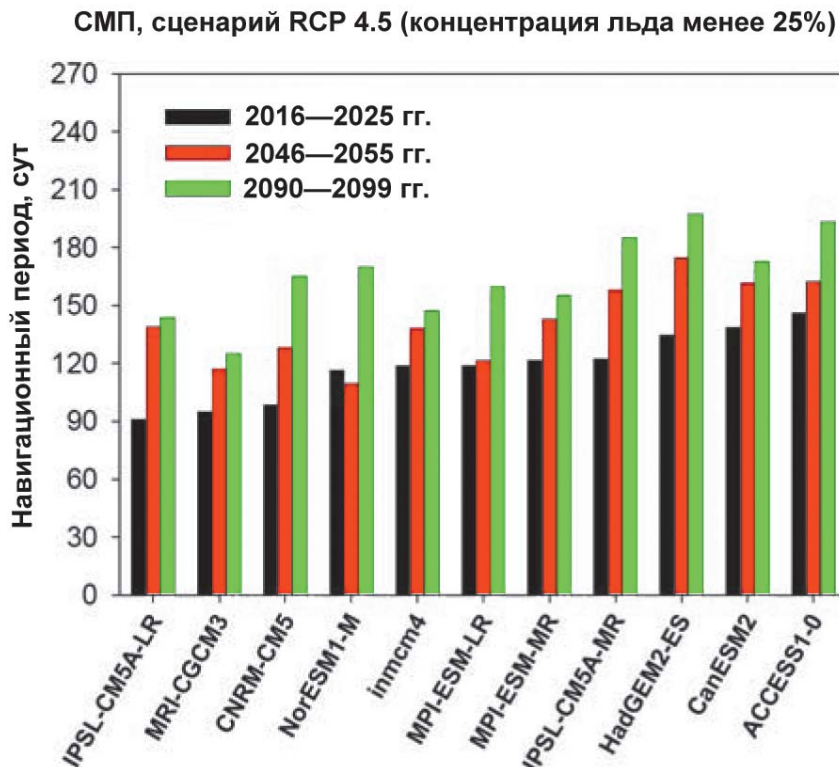


Рис. 6. Продолжительность навигационного периода  $T$  (сут) при доле покрытия морской поверхности льдами менее четверти по расчетам с ансамблем климатических моделей для разных периодов в XXI в. при сценарии RCP 4.5: 2016–2025 гг., 2046–2055 гг., 2090–2099 гг.

более агрессивном сценарии антропогенных воздействий RCP 6.0 ПНП для СМП может достигать к концу XXI в. восьми месяцев при пороговом значении концентрации морских льдов  $n_i = 30\%$ . Еще больше увеличивается ПНП при пороговом значении концентрации морских льдов  $n_i = 50\%$  для судов повышенного ледового класса.

### Заключение

Полученные оценки свидетельствуют о способности лучших современных климатических моделей воспроизводить ключевые особенности современного навигационного режима в Арктике и его изменений, в частности, на СМП, в сопоставлении со спутниковыми данными. По спутниковым данным средняя ПНП при степени покрытия акватории льдом меньше 15% для СМП в 1980—2013 гг. составляла 80 сут, а по расчетам с лучшими климатическими моделями — от 75 до 91 сут. При этом скорость роста ПНП по данным наблюдений была равна 18 сут за десятилетие, а по модельным расчетам — от 17 до 21 сут. Следует отметить существенный уровень межгодовой изменчивости ПНП — 24 сут для СКО ПНП по спутниковым данным и от 24 до 28 сут по модельным расчетам.

Что касается возможных перспектив СМП в XXI в., то по расчетам с лучшими климатическими моделями при сценарии умеренных антропогенных

воздействий в ближайшее десятилетие (2016—2025 гг.) можно ожидать увеличения средних значений ПНП при степени покрытия акватории льдом меньше 15% до 3—4 мес, к середине XXI в. — до 4—5 мес, а к концу века — от 5 до 5,5 мес. При этом на фоне долгопериодных тенденций проявляются существенные межгодовые и междесятилетние вариации температурного и ледового режимов.

Следует отметить, что в связи с изменениями климата и режима морских льдов в Арктике следует ожидать соответствующих изменений ветрового и циклонического режима в атмосфере, морского волнения и айсберговой активности в Арктическом бассейне. Оценки возможных изменений в XXI в. ветро-волновой активности в Арктическом бассейне с использованием модели ветрового волнения и расчетов региональных климатических изменений с учетом умеренных антропогенных воздействий свидетельствуют о новых потенциальных рисках в связи с общим усилением волновой активности в Северном Ледовитом океане. В частности, отмечено увеличение повторяемости опасных явлений с сильными ветрами и экстремальными морскими волнами вдоль Северного морского пути. Это связано с увеличением длины разбега волн и региональным усилением приповерхностного ветра [14; 19]. Рост морского волнения должен способствовать усилению скорости береговой эрозии в Арктическом

бассейне [20]. В настоящее время она достигает нескольких метров в год [21]. Повышенная скорость береговой эрозии связана и с разрушением вечной мерзлоты.

### Литература

1. Алексеев Г. В., Данилов А. И., Катцов В. М. и др. Изменения площади морских льдов Северного полушария в XX и XXI веках по данным наблюдений и моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2009. — Т. 45, № 6. — С. 723—735.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014. — 1008 с.
3. Данилов А. И., Алексеев Г. В., Клепиков А. В. Последствия изменения климата для морской деятельности в Арктике // Лед и снег. — 2014. — № 3. — С. 91—99.
4. Катцов В. М., Алексеев Г. В., Павлова Т. В. и др. Эволюция ледяного покрова Мирового океана в XX и XXI веках в расчетах с глобальными климатическими моделями нового поколения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 43, № 2. — С. 1—17.
5. Катцов В. М., Порфирьев Б. Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 2 (6). — С. 66—79.
6. Метеорологические и геофизические исследования. — М.: Paulsen, 2011. — 349 с.
7. Мохов И. И. Современные изменения климата в Арктике // Вестн. РАН. — 2015. — Т. 85, № 6. — С. 82—88.
8. Мохов И. И., Семенов В. А., Хон В. Ч., Позгарский Ф. А. Тенденции климатических изменений в высоких широтах Северного полушария: Диагностика и моделирование // Лед и снег. — 2013. — № 2 (122). — С. 53—62.
9. Мохов И. И., Хон В. Ч. Оценки перспектив Северного морского пути при изменениях климата на основе расчетов с ансамблем климатических моделей // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. — Т. 3. — Ч. 2: Природные процессы в полярных областях Земли. — М.: ИГ РАН, 2008. — С. 20—27.
10. Мохов И. И., Хон В. Ч., Рекнер Э. Изменения ледовитости Арктического бассейна в XXI веке по модельным расчетам: оценка перспектив Северного морского пути // Докл. АН. — 2007. — Т. 414. — С. 814—818.
11. Мохов И. И., Хон В. Ч., Чернокульский А. В. Климатические ресурсы российских регионов и их изменения // Стратегические ресурсы и условия устойчивого развития Российской Федерации. — М.: ИГ РАН, 2014. — С. 48—55.
12. Мохов И. И., Хон В. Ч. Перспективы Северного морского пути (по данным моделирования) // Земля и Вселенная. — 2009. — № 2. — С. 30—35.
13. Хон В. Ч., Мохов И. И. Климатические изменения в Арктике и возможные условия арктической морской навигации в XXI веке // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2010. — Т. 46, № 1. — С. 19—25.
14. Хон В. Ч., Мохов И. И., Позгарский Ф. А. Оценки ветро-волновой активности в арктическом бассейне при возможных изменениях климата в 21 веке по модельным расчетам // Докл. АН. — 2013. — Т. 452, № 4. — С. 445—448.
15. Akperov M. G., Mokhov I. I., Rinke A. et al. Cyclones and their possible changes in the Arctic by the end of the twenty first century from regional climate model simulations // Theor. Appl. Climatol. — 2014. — doi:10.1007/s00704-014-1272-2.
16. Cavalieri D. J., Parkinson C. L., Gloersen P. et al. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensory data sets // J. Geophys. Res. — 1999. — Vol. 104, № C7. — P. 15803—15814.
17. Climate Change 2013: The Physical Science Basis / T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.). — Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2013. — 1535 p.
18. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. — Pt. B: Regional Aspects / V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken et al. (eds.). — Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2014. — 688 p.
19. Khon V. C., Mokhov I. I., Latif M. et al. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the 21st century // Climatic Change. — 2010. — Vol. 100, № 3—4. — P. 757—768.
20. Overeem I., Anderson R. S., Wobus C. W. et al. Sea ice loss enhances wave action at the Arctic coast // Geophys. Res. Lett. — 2011. — Vol. 38. — L17503. — doi:10.1029/2011GL048681.
21. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. — Oslo: AMAP, 2011. — 538 p.