

УДК 551.511

## ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА НАВИГАЦИИ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ НА СЕВЕРНОМ МОРСКОМ ПУТИ В 21 ВЕКЕ: БАЙЕСОВЫ ОЦЕНКИ ПО РАСЧЕТАМ С АНСАМБЛЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

© 2022 г. М. Р. Парфенова<sup>1,\*</sup>, А. В. Елисеев<sup>1,2,3</sup>, академик РАН И. И. Мохов<sup>1,2,4</sup>

Поступило 20.07.2022 г.

После доработки 22.07.2022 г.

Принято к публикации 24.07.2022 г.

Проведен анализ продолжительности навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП) в 21 веке на основе моделей ансамбля CMIP5 (Coupled Models Intercomparison project, phase 5) при сценарии RCP 8.5 с использованием методов байесового осреднения с выделением различных участков СМП. Получено, что различия качества воспроизведения моделями ПНП и ее изменений в западной части СМП больше, чем в восточной. Ансамблевое среднее для ПНП получено в диапазоне 3–4 мес в середине XXI века с увеличением до примерно 6 мес к концу века. Средние ансамблевые оценки изменения ПНП в целом устойчивы к выбору предположений, связанных с вычислением байесовых весов. Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, межгодовые вариации, линейный тренд) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для западной части СМП и в полтора раза – для восточной.

*Ключевые слова:* морской лед, Северный морской путь, CMIP5, Байесово осреднение, спутниковые данные

DOI: 10.31857/S2686739722601454

### ВВЕДЕНИЕ

Арктический регион очень чувствителен к изменениям климата, потепление в арктических широтах происходит со скоростью, в несколько раз превышающей скорость увеличения глобальной приповерхностной температуры в последние десятилетия [1–3]. Это потепление связано с быстрым сокращением площади морского льда в Северном Ледовитом океане, особенно в летний и осенний сезоны [2–4]. В связи со значительным уменьшением протяженности морских льдов в арктическом бассейне в последние десятилетия существенно увеличивается продолжительность навигационного периода (ПНП) на Северном морском пути (СМП) [5–11].

Неопределенность модельных оценок будущих изменений характеристик СМП связана с естественной межгодовой изменчивостью, особенностями учета процессов подсеточного масштаба в моделях и выбором сценариев антропогенных воздействий на Земную систему. Как следствие, целесообразными являются, во-первых, ансамблевый подход к анализу будущих климатических изменений с использованием большого числа моделей, численных экспериментов с такими моделями при задании разных (но согласующихся с доступными данными о доиндустриальном состоянии климата) начальных условий интегрирования и сценариев внешнего воздействия. Например, в [6, 7] из ансамбля климатических моделей были отобраны модели, которые реалистично воспроизводят не только современную ПНП на СМП в сопоставлении с данными наблюдений, но и скорость ее изменения в последние десятилетия. В [8, 9] дополнительно требовалось адекватное воспроизведение стандартных отклонений межгодовой изменчивости ПНП. В [11] на основе ансамбля модельных расчетов с использованием байесова подхода получены оценки изменений для СМП в целом с анализом межгодовой изменчивости ПНП наряду со сред-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>4</sup> Московский физико-технический институт, Москва, Россия

\*E-mail: parfenova@ifaran.ru

ними многолетними значениями и оценками линейного тренда.

В данной работе представлены результаты анализа изменений ПНП для разных частей СМП на основе численных расчетов с ансамблем из 25 климатических моделей СМIP5 с использованием байесова подхода [12].

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

При анализе использовались результаты численных расчетов для сплоченности морских льдов в Северном Ледовитом океане при сценарии антропогенных воздействий RCP 8.5 для XXI века. Для оценки качества результатов моделирования в качестве эталонных использовались спутниковые данные SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) по измерениям на спутнике Nimbus-7 для периода 1980–2018 гг. [13] (эталонные данные  $D$  – см. ниже). Для получения более адекватных количественных оценок ожидаемых изменений оценивалась способность климатических моделей воспроизводить современные особенности распространения морских льдов на СМП, не только средних значений и трендов, но и межгодовой изменчивости.

Анализ изменений ПНП проводился для разных частей СМП на основе численных расчетов с ансамблем из 25 климатических моделей СМIP5. При этом использовался байесов подход [14–18]. Анализ проводился для того же ансамбля климатических моделей и для той же трассы СМП, что и в [7], но с детализацией для разных частей СМП.

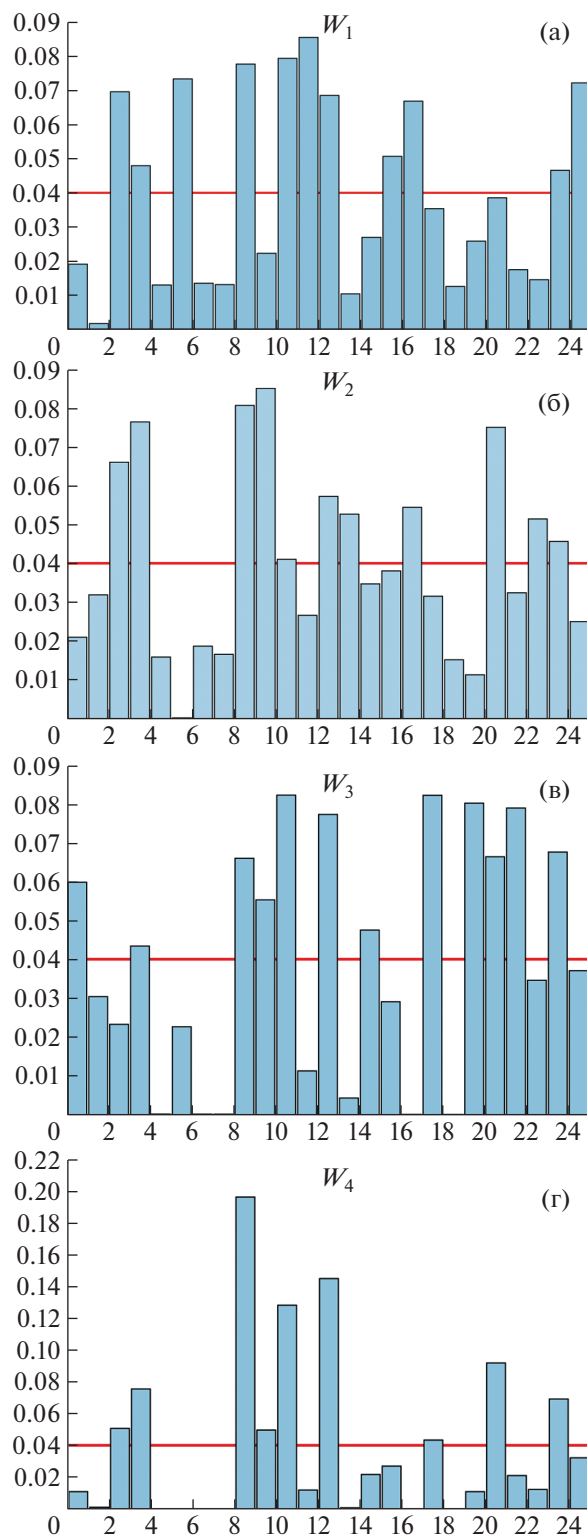
Как и в предыдущих работах [5–12] с модельными оценками ПНП для СМП в целом, акватория считалась свободной от морских льдов при их сплоченности менее 15%. При этом в [11], в частности, ПНП определялась при условии не менее 80% общей протяженности СМП, свободной от морских льдов. В данной работе соответствующий анализ проводился для различных частей СМП, включая западную часть СМП – Баренцево и Карское моря, район пролива Вилькицкого, а также восточную часть СМП – море Лаптевых и Восточно-Сибирское море.

Продолжительность навигационного периода  $Y^{(k)}$  на каждом из участков СМП в модели  $k$  ( $1 \leq k \leq K$ ; где полное число использованных моделей  $K = 25$ ) осреднялась с весами  $w^{(k)}$ , характеризующими качество воспроизведения данной моделью ПНП на СМП с ансамблевым средним

$$E(Y|D) = \sum Y^{(k)} W^{(k)} \quad (1)$$

и межмодельным стандартным отклонением

$$\sigma(Y|D) = \{ \sum [(\sigma^{(k)})^2 + Y^{(k)2} W^{(k)} - E(Y|D)]^2 \}^{1/2}, \quad (2)$$



**Рис. 1.** Байесовы весовые множители для 25 климатических моделей (ось абсцисс), определенные в сопоставлении со спутниковыми данными для периода 2006–2014 гг. для Баренцева и Карского морей: (а)  $W_1$ , (б)  $W_2$ , (в)  $W_3$ , (г)  $W_4$ . Горизонтальная линия соответствует  $W_0 = 1/K$ ,  $K = 25$  – количество моделей в ансамбле.

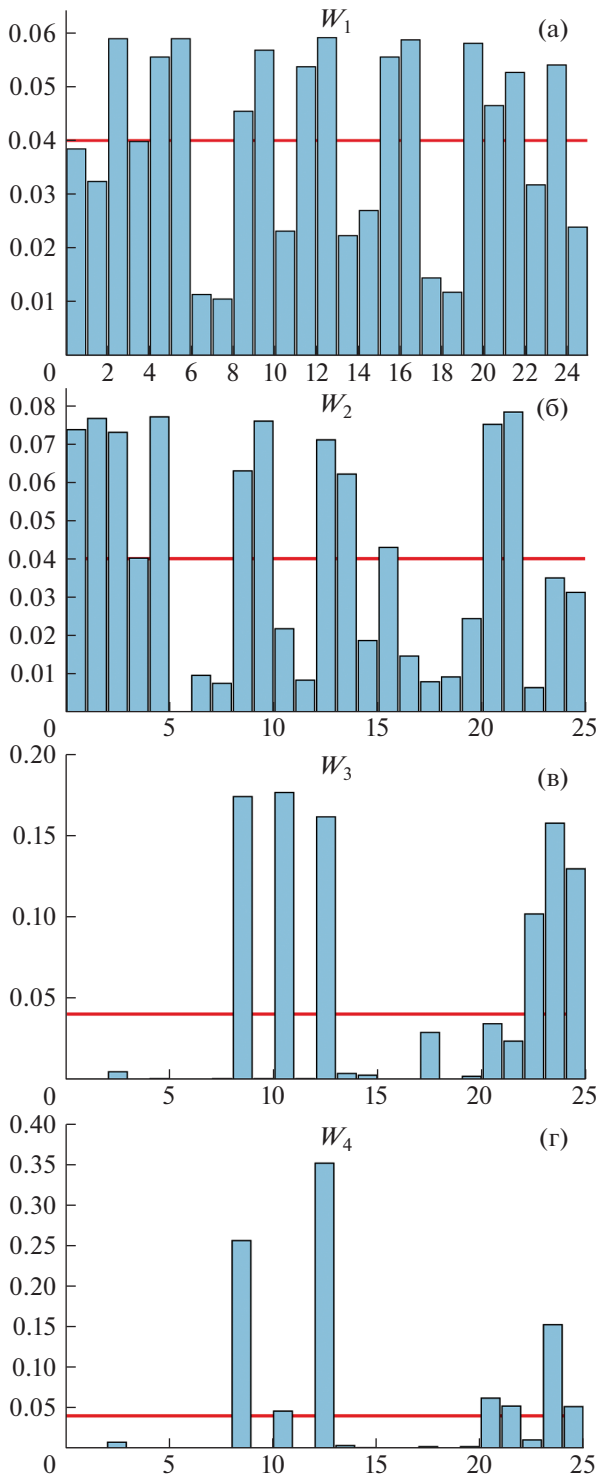


Рис. 2. Подобно рис. 1 для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря.

где  $\sigma^{(k)}$  – межгодовое стандартное отклонение переменной  $Y$  по расчетам с моделью  $k$ .

Весовые множители при байесовом осреднении вычислялись как функции правдоподобия, характеризующие воспроизведение моделями

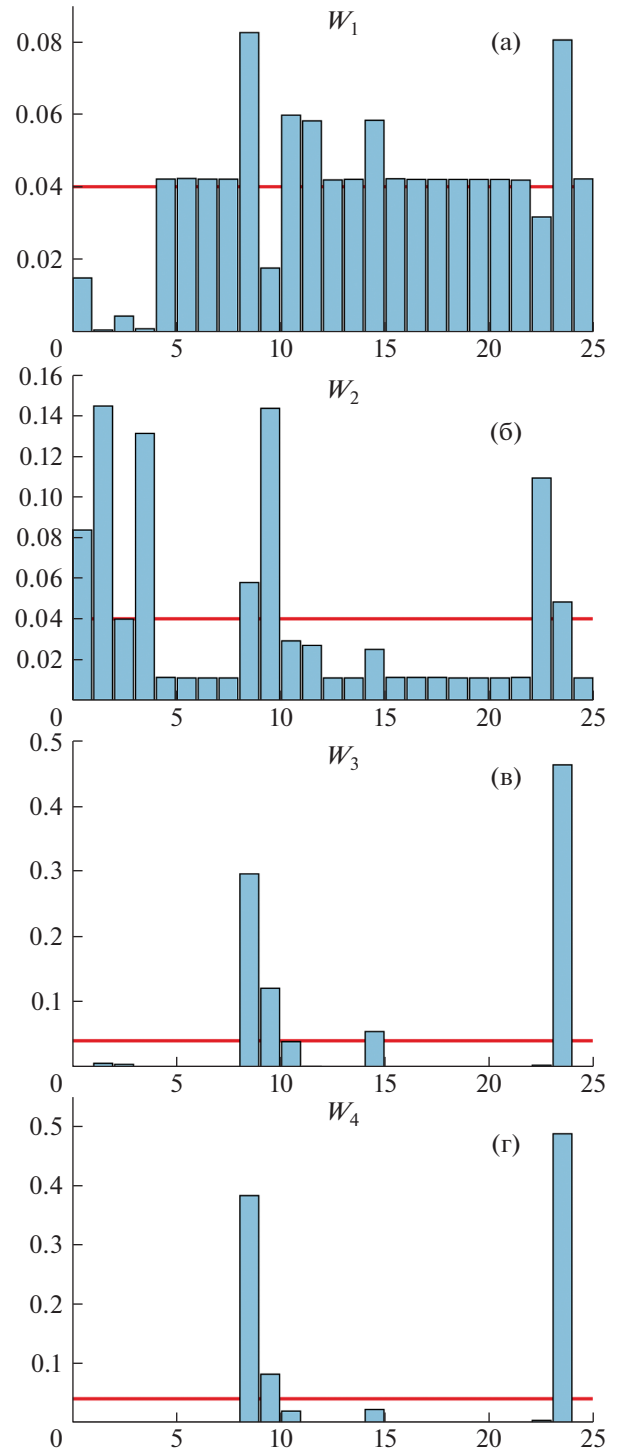
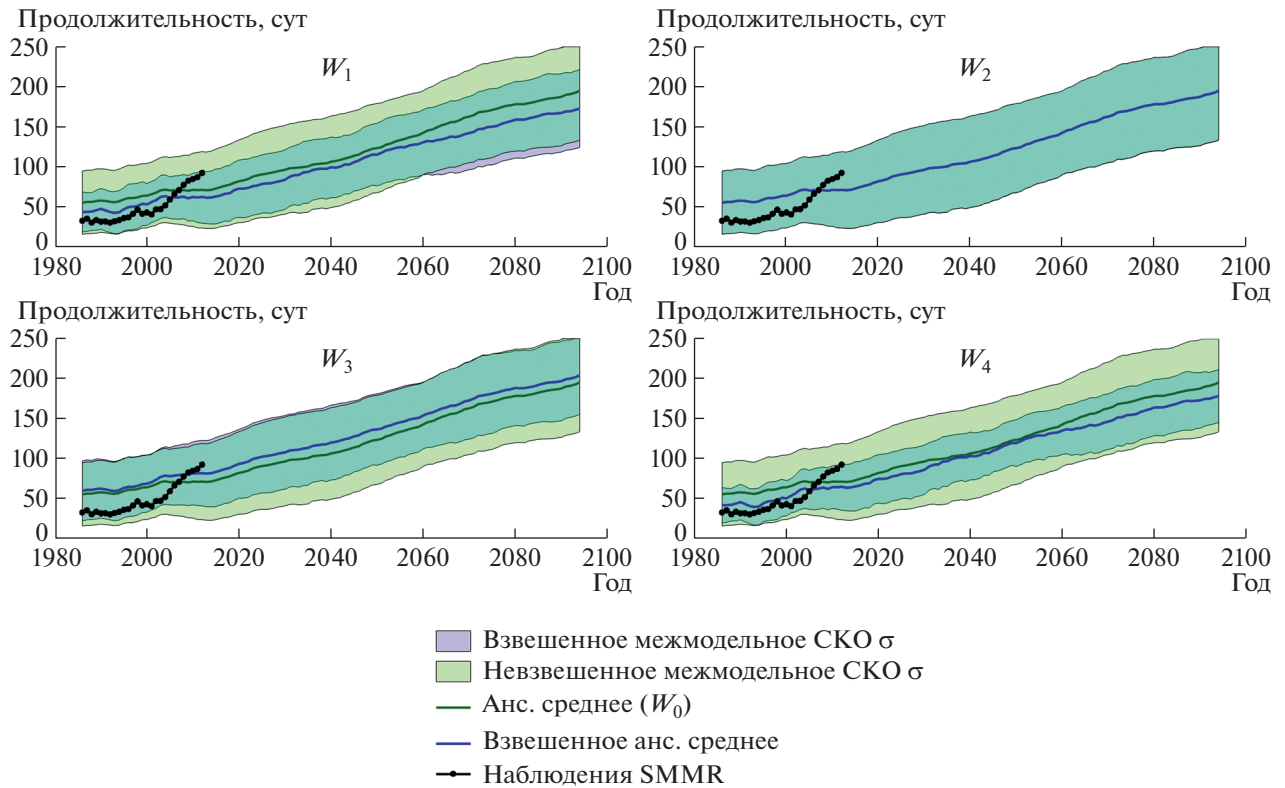


Рис. 3. Подобно рис. 1 для пролива Вилькицкого.

ПНП на СМП  $Y^{(k)}$  на различных временных масштабах в предположении нормального распределения этой переменной на всех временных масштабах (ось абсцисс):

$$W_i^{(k)} = \chi(Y^{(k)}; Y^{(D)}, \delta^{(D)}), \quad (3)$$



**Рис. 4.** Ансамблевые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода на Северном морском пути для Баренцева и Карского морей при разных схемах вычисления байесовых весов  $W_j$  ( $1 \leq j \leq 4$ ) в сравнении с равновзвешенным ( $W_0$ ) осреднением моделей ансамбля CMIP5.

где  $\chi(y; y^{(D)}, \delta^{(D)})$  – нормальное распределение для переменной  $y$  со средним  $y^{(D)}$  и среднеквадратичным отклонением  $\delta^{(D)}$ , верхний индекс ( $D$ ) указывает на вычисление по эталонным данным, нижний индекс  $i$  – характеристика временного мас-

штаба. Выделялись многолетнее среднее  $T_m^{(i)}$  ( $i = 1$ ; характеризует временной масштаб, который больше длины  $I$  эталонных данных  $D$ ; здесь точка указывает либо на номер модели  $k$ , либо на эталонные данные), коэффициент линейного тренда

**Таблица 1.** Продолжительность навигационного периода (средние и внутриансамблевые стандартные отклонения – в скобках) для разных частей СМП в зависимости от схемы вычисления байесовых весов при сценарии антропогенных воздействий RCP 8.5 для XXI в.

ПНП (сут)	Баренцево и Карское моря				
		$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$
2008–2028 гг.	79 ( $\pm 50$ )	69 ( $\pm 34$ )	79 ( $\pm 50$ )	90 ( $\pm 43$ )	71 ( $\pm 30$ )
2040–2060 гг.	123 ( $\pm 55$ )	115 ( $\pm 39$ )	124 ( $\pm 55$ )	136 ( $\pm 44$ )	119 ( $\pm 30$ )
2074–2094 гг.	181 ( $\pm 60$ )	161 ( $\pm 48$ )	182 ( $\pm 58$ )	191 ( $\pm 48$ )	166 ( $\pm 35$ )
море Лаптевых и Восточно-Сибирское море					
2008–2028 гг.	55 ( $\pm 35$ )	62 ( $\pm 30$ )	55 ( $\pm 35$ )	61 ( $\pm 31$ )	65 ( $\pm 26$ )
2040–2060 гг.	95 ( $\pm 48$ )	105 ( $\pm 43$ )	95 ( $\pm 48$ )	104 ( $\pm 39$ )	110 ( $\pm 34$ )
2074–2094 гг.	151 ( $\pm 56$ )	156 ( $\pm 60$ )	151 ( $\pm 56$ )	158 ( $\pm 47$ )	162 ( $\pm 47$ )
пролив Вилькицкого					
2008–2028 гг.	37 ( $\pm 47$ )	25 ( $\pm 28$ )	37 ( $\pm 47$ )	58 ( $\pm 49$ )	36 ( $\pm 27$ )
2040–2060 гг.	53 ( $\pm 64$ )	49 ( $\pm 49$ )	54 ( $\pm 64$ )	83 ( $\pm 64$ )	70 ( $\pm 43$ )
2074–2094 гг.	77 ( $\pm 92$ )	76 ( $\pm 76$ )	77 ( $\pm 92$ )	118 ( $\pm 91$ )	106 ( $\pm 66$ )

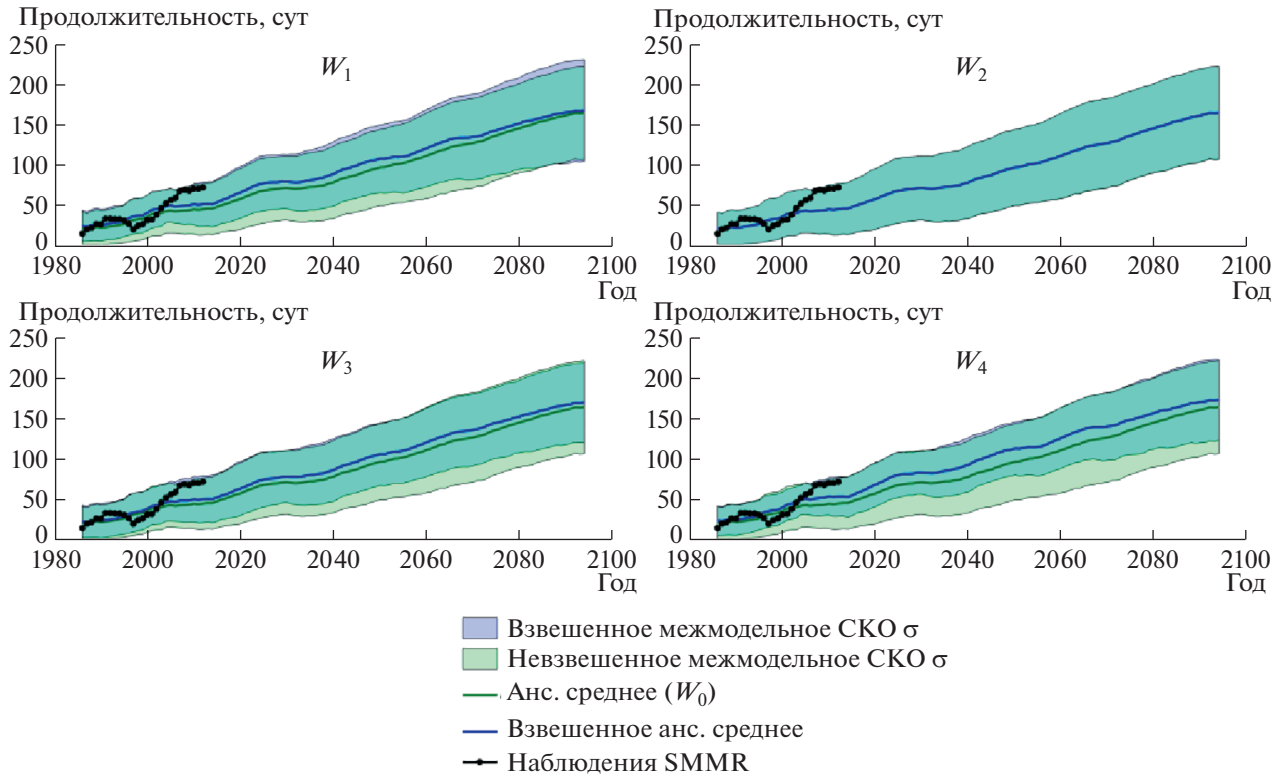


Рис. 5. Подобно рис. 4 для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

этой переменной  $\alpha_T^{(i)}$  ( $i = 2$ ; характеризует междесятилетний масштаб) и среднеквадратическое отклонение (СКО) межгодовой изменчивости (МИ)  $\sigma_{T,IAV}^{(i)}$ , определяемое для временного ряда  $Y^{(i)}$  после исключения линейного тренда с коэффициентом  $\alpha_T^{(i)}$  ( $i = 3$ ; характеризует межгодовой масштаб). Подобный подход был использован в [11, 18]. В качестве СКО  $\delta_i^{(i)}$  для многолетнего среднего ( $i = 1$ ) использовалась  $\sigma_{T,IAV}^{(i)}$ , для коэффициента линейного тренда ( $i = 2$ ) – среднеквадратичная оценка его выборочной оценки, для межгодового СКО ( $i = 3$ ) – величина  $\theta \cdot \sigma_{T,IAV}^{(i)}$  с  $\theta = [2/(I - 1)]^{1/4}$ . Величиной  $\theta$  оценивается неопределенность для  $\sigma_{T,IAV}^{(i)}$  для временного ряда конечной длины  $I$  [19]. В [11] использовалось значение  $\theta \equiv 0.2$ . Различие значений  $\theta$ , в частности в данной работе и в [11], приводит к значительному различию в распределении весов  $W_3$ .

Рассматривались также веса, характеризующие общее качество воспроизведения в моделях ПНП на СМП

$$W_4^{(k)} = W_1^{(k)} W_2^{(k)} W_3^{(k)}. \tag{3}$$

Наряду с этим для всех весов использовалось условие нормировки

$$\begin{aligned} \sum_k W_j^{(k)} &= 1 \\ (1 \leq j \leq 4). \end{aligned} \tag{4}$$

Анализ проводился для того же ансамбля климатических моделей и для той же трассы СМП, что и в [6], но с детализацией для разных частей СМП.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1–3 представлены байесовы весовые множители для моделей (ось абсцисс), определенные в сопоставлении со спутниковыми данными для периода 2006–2014 гг. Наилучшим образом модели согласуются с данными наблюдений для коэффициента линейного тренда. В частности, нормированная информационная энтропия

$$H_j = (\sum_k W_j^{(k)} \log_2 W_j^{(k)}) / \log_2 K \tag{5}$$

для весов  $W_2$  близка к единице для всех частей СМП, что указывает на близость между собой весов  $W_1^{(k)}$  при разных  $k$ . Для восточной части СМП (море Лаптевых и Восточно-Сибирское море) модели также достаточно хорошо согласуются между собой для многолетних средних, так что энтропия веса  $W_1$  для этого участка равна 0.95. В то же время для западной части СМП и для пролива Вилькицкого  $H_1$  составляет 0.83–0.86, что уже за-



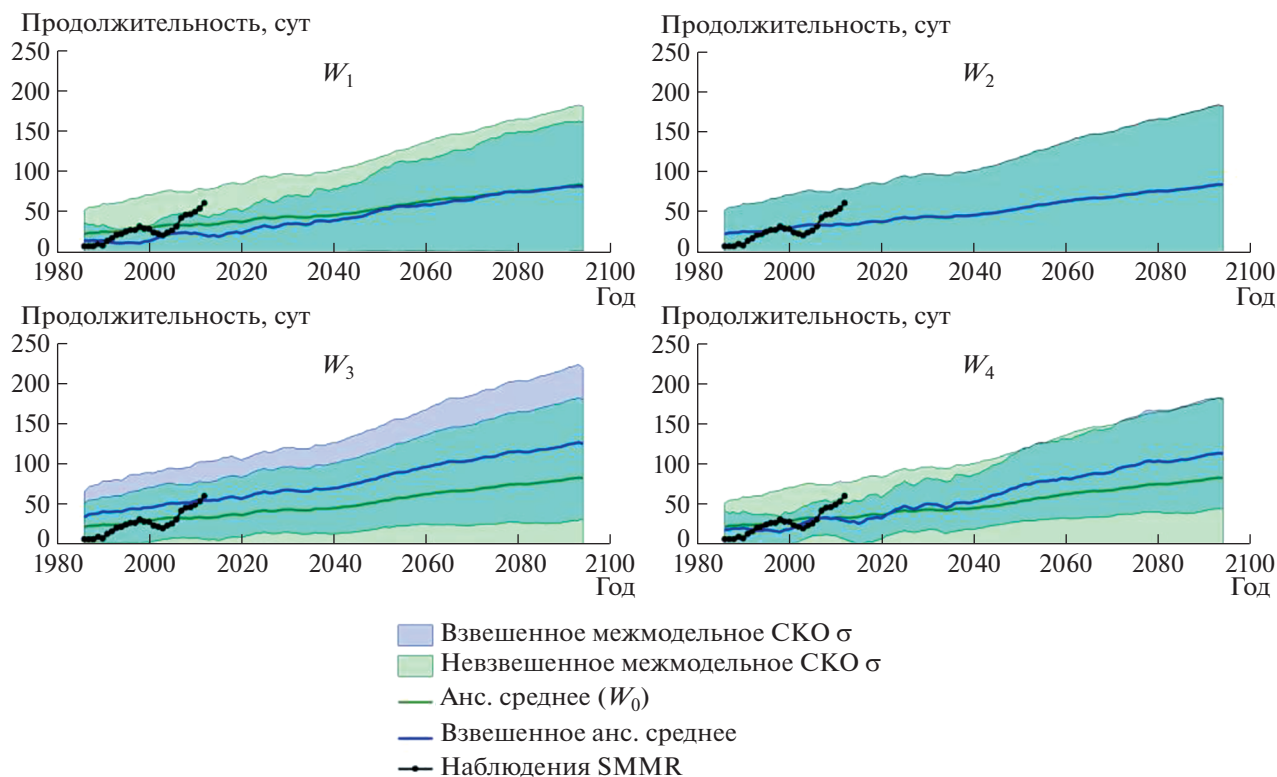


Рис. 6. Подобно рис. 4 для пролива Вилькицкого.

метно отличается от единицы. Последнее указывает на различие качества воспроизведения трендовой компоненты изменения ПНП на СМП для разных моделей ансамбля. Для весов, характеризующих межгодовой масштаб, энтропия  $H_3$  получена в диапазоне от 0.94 до 0.98 для всех анализируемых частей СМП.

Для комбинированного веса  $W_4$  энтропия также наиболее близка к единице (0.92) для восточной части СМП. Соответствующее качество воспроизведения моделями хуже для западной части СМП ( $H_4 = 0.79$ ) и особенно для пролива Вилькицкого ( $H_4 = 0.74$ ).

Для западной части СМП (Баренцева и Карского морей) ансамблевое среднее увеличивается от 2–3 мес в первые десятилетия XXI века до 4–4.5 мес в середине столетия и до примерно полугода – в его конце (рис. 4, табл. 1). При этом, хотя формально различия ансамблевых средних для отдельных весов не являются статистически значимыми (разность между ними не превышает 3 нед, тогда как внутриансамблевые байесовы СКО составляют от месяца до двух), их различие позволяет проанализировать влияние схемы вычисления байесовых весов (критерия отбора моделей внутри ансамбля) на результаты осреднения.

Минимальное увеличение ПНП на СМП отмечено для веса  $W_1$ , характеризующего многолет-

нее среднее (а также для комбинированного веса  $W_4$ ), а максимальное – для веса  $W_3$ , характеризующего межгодовую изменчивость ПНП. Следует отметить, что байесово осреднение способно уменьшить неопределенность оценки ПНП на СМП почти вдвое – с 50–60 до 30–35 сут в зависимости от временного интервала при комбинированном весе  $W_4$ .

Для восточной части СМП (моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря) ансамблевая средняя ПНП близка к 2 мес в первые десятилетия XXI века (рис. 5, табл. 1). Она увеличивается до 3–3.5 мес к середине XXI века и до примерно 5 мес к его концу. Подобно полученному для западной части СМП, максимальное увеличение ПНП отмечено для веса  $W_3$ , характеризующего межгодовую изменчивость. Минимальный рост ПНП в этой части СМП отмечен для веса  $W_2$ , характеризующего линейный тренд. Кроме того, подобно полученному для Карского и Баренцева морей, байесово осреднение примерно в полтора раза уменьшает неопределенность оценки – с 35–56 сут до 26–47 сут в зависимости от временного интервала при комбинированном весе  $W_4$ .

Для пролива Вилькицкого различия ансамблевых средних для различных схем вычисления байесовых весов заметно более значимы, чем для западной и восточной частей СМП (рис. 6, табл. 1).

Например, для середины XXI века ансамблевое среднее значение ПНП при использовании веса  $W_1$  получено равным 49 ( $\pm 49$ ) сут, а при использовании веса  $W_3 - 83 (\pm 64)$  сут.

В целом по расчетам с моделями CMIP5 при сценарии RCP 8.5 внешних воздействий на Земную систему ансамблевое среднее значение ПНП оценено равным 3–4 мес в середине XXI века с увеличением до примерно 6 мес к концу века. Средние ансамблевые оценки изменения ПНП в целом устойчивы к выбору предположений, связанных с вычислением байесовых весов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Качество воспроизведения моделями продолжительности навигационного периода (ПНП) СМП и ее изменений сильнее отличается в западной части трассы, чем в восточной. Совместный учет качества воспроизведения моделями характеристик климата на всех временных масштабах (многолетнее среднее, межгодовые вариации, линейный тренд) в сравнении со спутниковыми данными позволяет уменьшить межмодельное стандартное отклонение вдвое для морей российской Арктики.

Особо следует отметить большой межмодельный разброс оценок ПНП для пролива Вилькицкого.

Размер этого пролива существенно меньше характерного пространственного разрешения моделей CMIP5 (см. [1]). В связи с этим пролив Вилькицкого в моделях представлен единственной ячейкой вычислительной сетки. В соответствии с теоремой Котельникова-Найквиста вычислительно могут быть разрешены лишь вариации с пространственным масштабом не менее удвоенного горизонтального размера ячейки вычислительной сетки. Это свидетельствует о границах применимости расчетов с моделями Земной системы и необходимости обоснования использования моделей для оценок будущих изменений климата в регионах сравнительно малого пространственного масштаба.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.Ч. Хону за предоставление спутниковых данных для морских льдов на Северном морском пути.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда 19-17-00240. Анализ региональных особенностей изменчивости морских льдов поддержан Российским фондом фундаментальных исследований (19-35-90118). Сравнительный анализ оценок

влияния временных масштабов воспроизведения характеристик навигационного периода на оценки его будущих изменений выполнен в рамках проекта Российского научного фонда 21-17-00012.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte, et al. (eds.]. Cambridge Univ. Press., 2021.
2. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Тенденции климатических изменений в высоких широтах Северного полушария: Диагностика и моделирование // Лед и снег. 2013. № 2 (122). С. 53–62.
3. Мохов И.И. Современные изменения климата Арктики // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.
4. Елисеев А.В., Семенов В.А. Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // ДАН. 2016. Т. 471. № 2. С. 214–218.
5. Мохов И.И., Хон В.Ч., Рекнер Э. Изменения ледовитости Арктического бассейна в XXI веке по модельным расчетам: оценка перспектив Северного морского пути // ДАН. 2007. Т. 414. С. 814–818.
6. 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.
7. Khon V.C., Mokhov I.I., Latif M., Semenov V.A., Park W. Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the 21st century // Clim. Change. 2010. V. 100. № 3/4. С. 757–768.
8. Мохов И.И., Хон В.Ч. Продолжительность навигационного периода и ее изменения для Северного морского пути: модельные оценки // Арктика: экология и экономика. 2015. № 2 (18). С. 88–95.
9. Мохов И.И., Хон В.Ч., Прокофьева М.А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // ДАН. 2016. Т. 468. № 6. С. 699–704.
10. Khon V.C., Mokhov I.I., Semenov V.A. Transit navigation through Northern Sea Route from satellite data and CMIP5 simulations // Environ. Res. Lett. 2017. V. 12. № 2. 024010.
11. Кибанова О.В., Елисеев А.В., Мохов И.И., Хон В.Ч. Изменения продолжительности навигационного периода Северного морского пути в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей: байесовские оценки // ДАН. 2018. Т. 481. № 1. С. 88–92.
12. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Parfenova M.R. Changes of navigation period at the North Sea Route in the 21st century from the CMIP5 ensemble simulations: Bayesian estimates // Research Activities in Earth System Modelling. E. Astakhova (ed.). 2021. Rep. 51. S. 7. P. 07–08.

13. Peng G., Meier W.N., Scott D.J., Savoie M.H. A longterm and reproducible passive microwave sea ice concentration data record for climate studies and monitoring // *Earth Syst. Sci. Data*. 2013. V. 5 (2). P. 311–318.
14. Hoeting J.A., Madigan D., Raftery A.E., Volinsky C.T. Bayesian model averaging: A tutorial // *Stat. Sci.* 1999. V. 14. № 4. P. 382–417.
15. Weigel A.P., Knutti R., Liniger M.A., Appenzeller C. Risks of model weighting in multimodel climate projections // *J. Climate*. 2010. V. 23. № 15. P. 4175–4191.
16. Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I. A global climate model based, Bayesian climate projection for northern extra-tropical land areas // *Glob. Planet. Change*. 2012. V. 86–87. P. 57–65.
17. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Chernokulsky A.V. An ensemble approach to simulate CO<sub>2</sub> emissions from natural fires // *Biogeosciences*. 2014. V. 11. № 12. С. 3205–3223.
18. Лупавский А.С., Елусеев А.В., Мохов И.И. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6 // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 5. С. 64–82.
19. Von Storch H., Zwiers F.W. *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge: Cambridge University Press. 2003. 484 p.

## CHANGES IN THE DURATION OF NAVIGATION PERIOD IN THE ARCTIC SEAS ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE 21ST CENTURY: BAYESIAN ESTIMATES BASED ON CALCULATIONS WITH AN ENSEMBLE OF CLIMATE MODELS

**M. Parfenova<sup>a,#</sup>, A. V. Eliseev<sup>a,b,c</sup>, and Academician of the RAS I. I. Mokhov<sup>a,b,d</sup>**

<sup>a</sup> *M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of Physics, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup> *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation*

<sup>d</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: parfenova@ifaran.ru*

The analysis of the duration of the navigation period (NP) on the Northern Sea Route (NSR) and on separate parts of the NSR in the 21st century was carried out based on the models of the CMIP5 ensemble (Coupled Models Intercomparison project, phase 5) under the RCP 8.5 scenario using Bayesian averaging methods. The results demonstrate that the differences in quality of the models simulations of the NP duration and its changes are greater in the western part of the NSR than in the eastern part. The ensemble mean for NP duration is estimated in the range of 3–4 months in the middle of the 21st century, increasing to about 6 months by the end of the century. The ensemble mean estimates of the change in the NP duration are generally robust to the choice of assumptions used for calculating the Bayesian weights. The joint consideration of the quality of the models simulations of climate characteristics on all time scales (long-term average, interannual variations, linear trend) in comparison with satellite data makes it possible to reduce the intermodel standard deviation by two times for the western part of the NSR and one and a half times for the eastern part.

*Keywords:* sea ice, Northern Sea Route, CMIP5, Bayesian averaging, satellite data