

## АНАЛИЗ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ В XXI ВЕКЕ

В.Ч.ХОН, И.И.МОХОВ

Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва

Получены оценки современных и ожидаемых климатических изменений в Арктическом бассейне, в том числе характеристик ледового покрова, влияющих на продолжительность судоходного сезона навигации по Северному морскому пути (СМП). Оценена способность современных климатических моделей воспроизводить средние климатические значения продолжительности ледового сезона и ее изменения для последних десятилетий. Средние по ансамблю моделей климатические значения продолжительности ледового сезона для современного периода достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений. Отмечена некоторая недооценка моделями изменений продолжительности ледового сезона в восточном секторе Арктики для современного периода. Получены оценки продолжительности сезона навигации по открытой воде на различных трассах СМП в XXI веке для ансамбля климатических моделей при умеренном антропогенном сценарии SRES-A1B.

Спутниковые наблюдения за последнее тридцатилетие показывают значительное сокращение площади морского льда, с наиболее существенным уменьшением в летний сезон. С конца 1970-х гг. площадь сентябрьского морского льда в Северном полушарии по спутниковым данным уменьшилась в среднем на 1,4 млн км<sup>2</sup> по сравнению с началом XXI века (рис. 1а) (см. <http://nsidc.org/>). В сентябре 2007 г. отмечена наименьшая площадь морских льдов в Северном Ледовитом океане за всю историю спутниковых наблюдений – около 4,3 млн км<sup>2</sup>, тогда как в конце 1970-х гг. она была около 7,5 млн км<sup>2</sup>. Рис. 1б характеризует распространение морского льда в Арктическом бассейне в сентябре 2007 г. по спутниковым данным (для сравнения

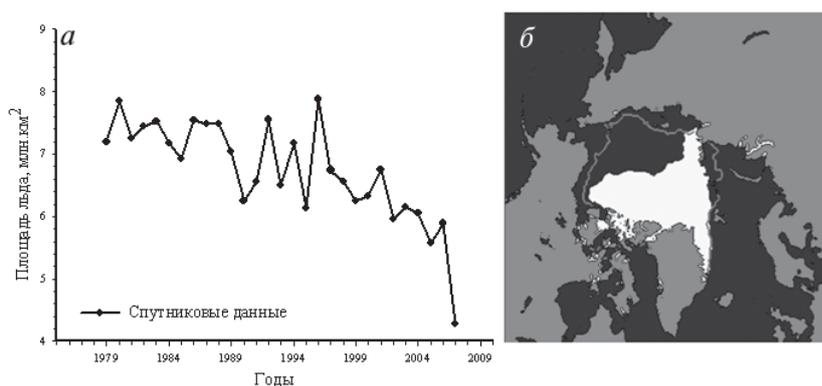


Рис. 1. Изменения площади морского льда в Арктике в сентябре (а) для периода 1979–2007 гг. и границы распространения морского льда в Арктике в сентябре 2007 г. (б) по спутниковым данным

отмечена также соответствующая средняя граница морских льдов). Эти изменения свидетельствуют об увеличении доступности судоходной навигации в окраинных морях Северного Ледовитого океана и повышении перспектив Северного морского пути (СМП) [1-4, 6, 7].

Цель данной работы – анализ ледовых условий в Арктическом бассейне с оценками возможных изменений продолжительности сезонной навигации на трассе СМП в XXI веке. Оценки продолжительности сезона навигации сделаны для наиболее слабого ледового класса судов (навигация по чистой воде) и без учета ледокольной поддержки.

Для анализа длительности ледового сезона для современного периода анализировались ежедневные спутниковые данные [5] для сплоченности морского льда, полученные по данным пассивного микроволнового зондирования в 1979–2006 гг. Пространственное разрешение спутниковых данных составляет  $25 \times 25$  км. Для сравнения использовались также данные HadISST [12] по наблюдениям для сплоченности морского льда с пространственным разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$  для того же периода.

Для оценки ожидаемых в XXI веке изменений характеристик ледового покрова использовались результаты численных экспериментов с глобальными климатическими моделями общей циркуляции атмосферы, океана и морского льда [8]. Расчеты с этими моделями использовались при подготовке 4-го Оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по оценке климатических изменений (IPCC) [6]. Анализировались результаты численных экспериментов с увеличением концентрации парниковых газов и аэрозоля в атмосфере согласно умеренному сценарию SRES-A1B. Были отобраны 6 моделей (IPSL-CM4, HadGEM1, HadCM3, CCSM3, GFDL\_2.0 и GFDL\_2.1), которые достаточно реалистично воспроизводят как годовой ход площади морского льда в Северном полушарии [11], так и особенности его пространственного распределения для периода 1980–1999 гг.

Продолжительность ледового сезона характеризовалась количеством дней в году со сплоченностью морского льда, превышающей 15 % [9–10].

На рис. 2 приведено пространственное распределение средней продолжительности в году ледового покрытия Арктического бассейна для периода 1980–1999 гг. по расчетам с глобальными климатическими моделями (*a–e*) и мультимодельному (среднему по ансамблю моделей) расчету (*ж*) в сопоставлении с данными наблюдений HadISST (*з*) и спутниковыми данными (*и*). В целом современные климатические модели способны адекватно воспроизводить среднюю продолжительность ледового сезона для современного климата. Результаты мультимодельного расчета (рис. 2*ж*) средней продолжительности ледового сезона для современного периода свидетельствуют о хорошем согласии с данными наблюдений. Наилучшее соответствие наблюдаемой продолжительности ледового сезона в Арктическом бассейне получено для моделей HadGEM1, IPSL-CM4, GFDL2.1 и CCSM3.

При этом модели способны достаточно реалистично воспроизводить не только средний режим ледового сезона, но и его изменения. На рис. 3 приведены изменения продолжительности ледового сезона для последнего десятилетия 1997–2006 гг. по спутниковым данным (*a*) и по результатам мультимодельных расчетов (*б*). Для большей части Арктического бассейна характерно уменьшение продолжительности сезонного ледового покрова, за исключением центральной полярной области (с круглогодичными многолетними морскими льдами) и западного сектора Арк-

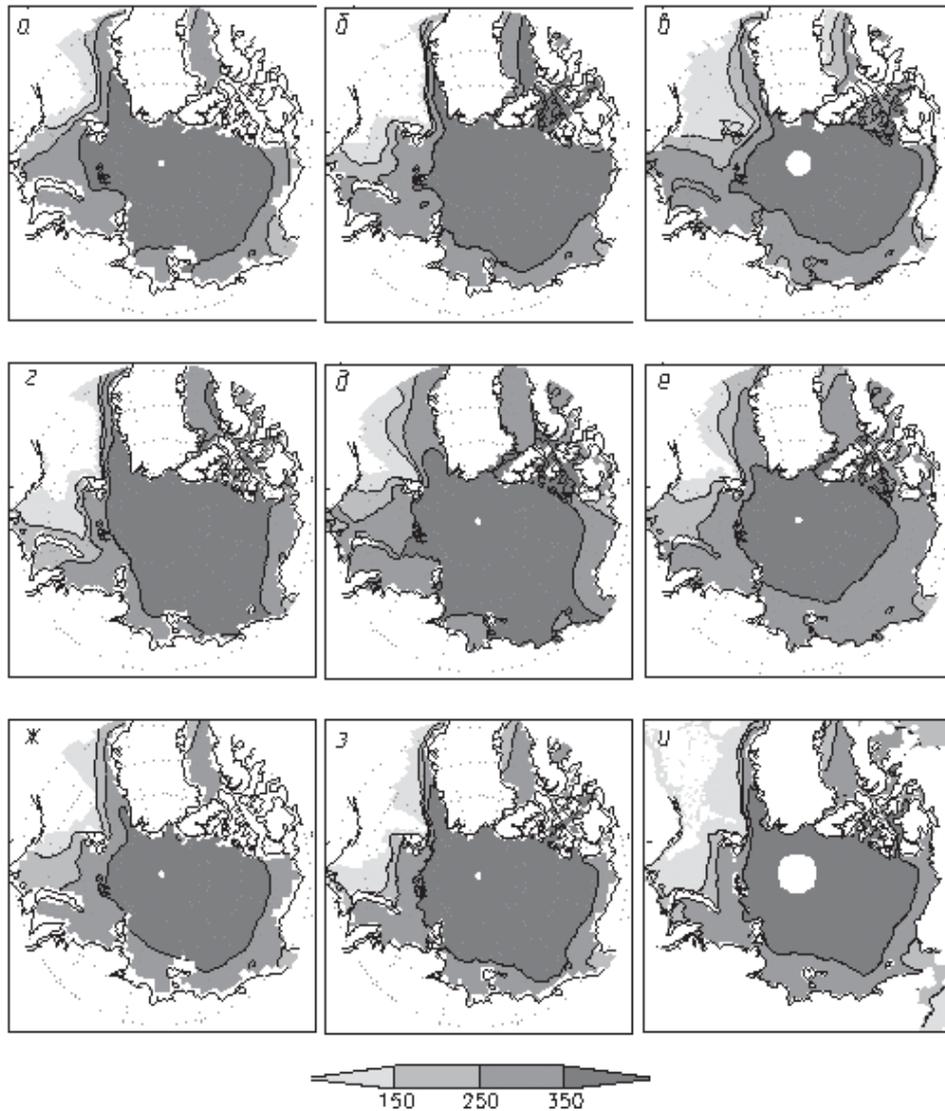


Рис. 2. Средняя продолжительность ледового сезона (в днях) для периода 1980–1999 гг. по расчетам с глобальными климатическими моделями IPSL-CM4 (а), HadGEM1 (б), HadCM3 (в), CCSM3 (г), GFDL2.0 (д), GFDL2.1 (е), мультимодельному расчету (ж) в сопоставлении с данными наблюдений HadISST (з) и спутниковыми данными (и)

тики с областями небольших положительных аномалий. Наиболее существенное уменьшение продолжительности ледового сезона отмечено для атлантического и восточного секторов Арктики. В целом результаты мультимодельных расчетов изменений продолжительности ледового сезона согласуются с данными наблюдений. При этом отмечена некоторая недооценка моделями изменений ледового сезона в восточном секторе Арктики (рис. 3б).

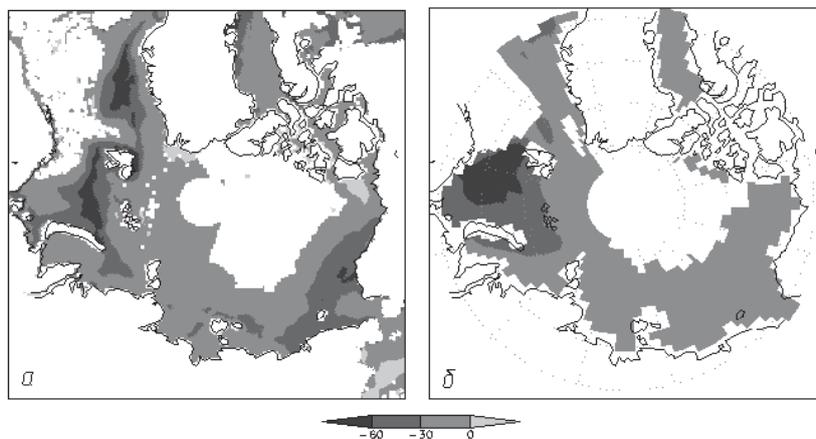


Рис. 3. Изменения продолжительности ледового сезона (в днях) для периода 1997–2006 гг. (относительно периода 1979–1988 гг.) по спутниковым данным (а) и по результатам мультимодельных расчетов (б)

Помимо традиционных прибрежных маршрутов, анализировались и более высокоширотные потенциальные трассы. Анализируемые маршруты трасс СМП приведены на рис. 4.

На рис. 5 представлено распределение числа дней в году ( $N$ ) в зависимости от протяженности пути с открытой водой ( $\tau$ ) на различных трассах СМП для периода 1997–2006 гг. (сплошная линия) и 1979–1988 гг. (прерывистая линия) по спутниковым данным. Изменения  $N(\tau)$  в последнее десятилетие по сравнению с предыдущим ( $\Delta N(\tau)$ ) отмечены вертикальными столбцами. Согласно рис. 5 в 1997–2006 гг. по сравнению с 1979–1988 гг. увеличилась вероятность появления более

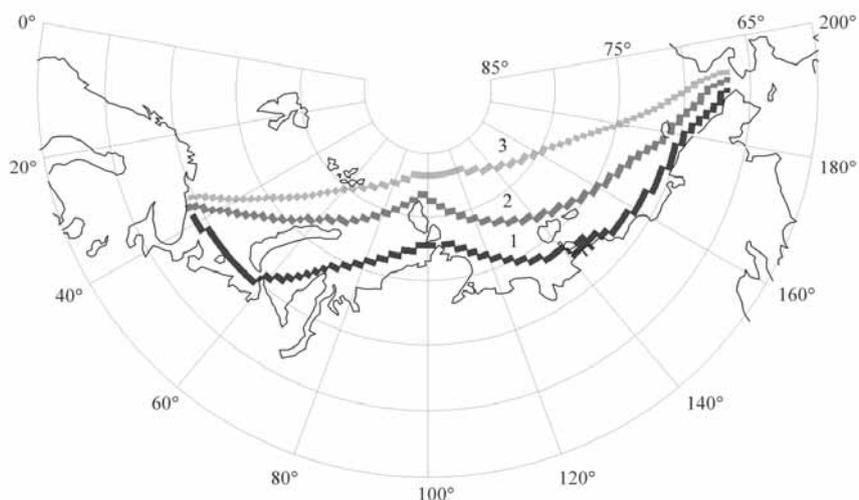


Рис. 4. Трассы СМП, для которых проводились расчеты:  
1 – более низкоширотная, 2 – промежуточная и 3 – более высокоширотная

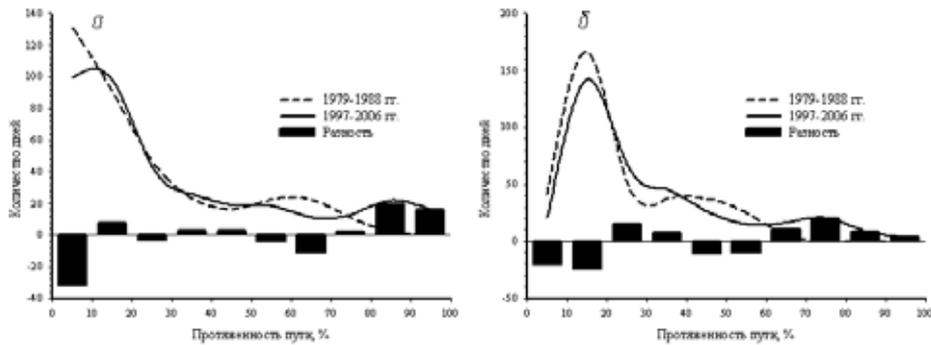


Рис. 5. Число дней в году  $N$  в зависимости от протяженности пути  $\tau$  (в %) с открытой водой для низкоширотной (а) и промежуточной (б) трасс СМП по спутниковым данным для периодов 1997–2006 гг. (сплошная линия) и 1979–1988 гг. (прерывистая линия). Вертикальными столбцами отмечена разница между сплошной и прерывистой линией

протяженных участков открытой воды. Так, для низкоширотной трассы (рис. 5а)  $N(\tau > 80 \%)$  (повторяемость участков открытой воды, превышающих 80 % от общей длины пути), для периода 1997–2006 гг. увеличилась более чем на месяц (примерно на 35 дней). Для более высокоширотной трассы (рис. 5б) отмечено увеличение примерно на полтора месяца ( $\Delta N \approx 43$  дня) при  $\tau > 60 \%$  с наибольшим увеличением для  $\tau$  в интервале 60–80 % ( $\Delta N$  составляет порядка месяца).

С использованием результатов модельных расчетов проведен анализ ледовых условий, влияющих на продолжительность периода навигации в российских арктических морях в XXI веке, в частности при умеренном антропогенном сценарии SRES-A1B. При этом продолжительность сезона навигации на различных трассах СМП определялась количеством дней в году со сплоченностью морского льда не более 15 % одновременно для каждой ячейки трассы.

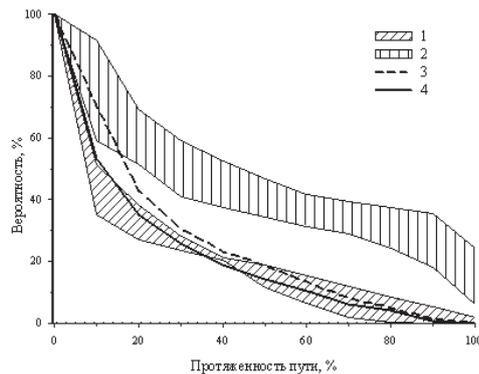


Рис. 6. Вероятность открытой воды на низкоширотной трассе СМП в зависимости от протяженности пути:

1 – диапазон модельных оценок для периода 1980–1999 гг., 2 – для периода 2080–2099 гг., 3 – спутниковые данные и 4 – данные HadISST для периода 1980–1999 гг.

На рис. 6 приведена кумулятивная функция распределения  $P(\tau \geq \tau_0)$  протяженности пути с открытой водой на низкоширотной трассе СМП по модельным оценкам (1) в сопоставлении со спутниковыми данными (3) и данными наблюдений HadISST (4) для периода 1980–1999 гг. Значения кумулятивной функции  $P(\tau \geq \tau_0)$  характеризуют вероятность реализации пути с открытой водой  $\tau$  не короче  $\tau_0$  ( $\tau \geq \tau_0$ ). Кумулятивные распределения построены для 4 моделей (HadGEM1, IPSL-CM4, GFDL2.1 и CCSM3), наиболее реалистично воспроизводящих характеристики ледового покрова на трассах СМП в условиях современного климата. Наклонной штриховкой (1) и вертикальной штриховкой (2) на рис. 6 выделены диапазоны оценок на основе результатов расчетов с 4 моделями для периода 1980–1999 гг. и при реализации антропогенного сценария SRES-A1B для периода 2080–2099 гг. соответственно. Согласно рис. 6 для современного периода лучше всего модельные расчеты соответствуют данным наблюдений при  $\tau_0 > 50$  %.

В табл. 1 приведены значения (в сутках) кумулятивной функции распределения для разной протяженности пути с открытой водой на низкоширотной трассе СМП для 20-летних периодов в конце XX века (по наблюдениям и по модельным расчетам) и в конце XXI века (по модельным оценкам). В среднем по ансамблю моделей продолжительность навигационного сезона на низкоширотной трассе СМП к концу XXI века составит около 4 месяцев в году при длине пути с открытой водой  $\tau$  более 70 % (при  $\tau \geq 90$  % период навигации составит около 3-х месяцев).

Таблица 1

$P(\tau \geq \tau_0)$  (в сутках) протяженности пути  
по открытой воде ( $\tau_0 = 60$  %, 70 %, 80 %, 90 %) для низкоширотной трассы СМП  
по данным наблюдений и модельным оценкам

$\tau_0$ , %	1980–1999 гг.		2080–2099 гг.
	Наблюдения	Модельные оценки	Модельные оценки
60 %	39 ± 49	42 (± 13)	133 (± 20)
70 %	22 ± 30	25 (± 15)	123 (± 20)
80 %	15 ± 18	14 (± 14)	111 (± 22)
90 %	3 ± 5	7 (± 9)	95 (± 27)

. В скобках приведены стандартные отклонения оценок для ансамбля из 4-х моделей

В данной работе с использованием данных наблюдений и модельных расчетов проведен анализ продолжительности сезона навигации на трассах СМП с открытой водой. Средние по ансамблю анализировавшихся моделей продолжительности ледового сезона для современного периода достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений. При этом модели способны адекватно воспроизводить не только среднюю продолжительность ледового сезона, но и ее изменения. Отмечена некоторая недооценка моделями изменений продолжительности ледового сезона в восточном секторе Арктики для современного периода. Сделаны количественные оценки возможных изменений продолжительности навигации в XXI веке при умеренном антропогенном сценарии SRES-A1B.

*Данная работа выполнена при поддержке РФФИ, программ РАН и Минобрнауки.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев В.Г., Фролов И.Е. Современная ситуация в Арктической зоне РФ, перспективы и возможные пути социально-экономического развития региона: Аналитический доклад. СПб.: ААНИИ, 2006. 39 с.

2. Катцов В.М. и др. Моделирование эволюции ледяного покрова Мирового океана в XX и XXI веках // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. С. 165–181.
3. Мохов И.И., Хон В.Ч., Рекнер Э. Изменения ледовитости Арктического бассейна в XXI веке по модельным расчетам: Оценка перспектив Северного морского пути // Доклады РАН. 2007. Т. 414. С. 814–818.
4. Проблемы Северного морского пути / СОПС РАН. М.: Наука, 2006. 581 с.
5. Cavalieri D. J. et al. Deriving long-term time series of sea ice cover from satellite passive-microwave multisensor data sets // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104(C7). P. 15,803–15,814.
6. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. S. Solomon et al. (eds.). Cambridge Univ. Press. Cambridge. 996 p.
7. Khon V.Ch., Mokhov I.I., Roeckner E. Changes of seasonal ice area in the Arctic Ocean from model simulations with IPCC SRES scenario // Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling. J.Cote (Ed.). Geneva: WMO/TD–No. 1397. 2007. P. 7.3–7.4.
8. Meehl G.A. et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset – A new era in climate change research // Bulletin of the American Meteorological Society. 2007. Vol. 88 (9). P. 1383–1394.
9. Parkinson C. L. Spatial patterns of increases and decreases in the length of the sea ice season in the North Polar region, 1979–1986 // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 14,377–14,388.
10. Parkinson C. L. Variability of Arctic sea ice: the view from space, an 18-year record // Arctic. 2000. Vol. 53. P. 341–358.
11. Parkinson C. L., Vinnikov K. Y., Cavalieri D. J. Evaluation of the simulation of the annual cycle of Arctic and Antarctic sea ice coverages by 11 major global climate models // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. doi:10.1029/2005JC003408.
12. Rayner N.A. et al. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // J. Geophys. Res. 2003. Vol. 108 (D14). 4407, doi:10.1029/2002JD002670.

*V.CH.KHON, I.I.MOKHOV*

### ANALYSIS OF SEA ICE CONDITIONS IN THE ARCTIC BASIN AND PERSPECTIVES OF THE NORTHERN SEA ROUTE IN THE 21<sup>ST</sup> CENTURY

*Current and expected climatic changes in the Arctic basin, including the characteristics of the ice cover affecting the navigation duration on the Northern Sea Route (NSR) were estimated. The ability of modern climate models to reproduce the average duration of ice season, and its change for the past decades was evaluated. The multi-model averaged values of the ice season duration for the present period are in a good agreement with observations. Some model underestimations of the ice season changes are noted in the eastern Arctic for the present period. The duration of the navigation season on the Northern Sea Route in the 21<sup>st</sup> century was estimated for the ensemble of climate models with moderate anthropogenic scenario SRES-A1B.*