ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ, 2021, том 496, № 2, с. 189–193

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.581:551.465:551.583

ИЗМЕНЕНИЯ РЕЖИМОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ ПО МОДЕЛЬНЫМ РАСЧЕТАМ

© 2021 г. Академик РАН И. И. Мохов[1,2,3,*], Ф. А. Погарский[1]

Поступило 08.09.2020 г.
После доработки 23.09.2020 г.
Принято к публикации 11.11.2020 г.

Проведен анализ характеристик активности морского волнения в Арктическом бассейне с использованием модели WAWEWATCH III и результатов расчетов морских льдов и ветра в атмосфере с ансамблем глобальных климатических моделей CMIP5. Сделана оценка относительной роли ветровых волн и зыби в общей активности морских волн в Арктическом бассейне по модельным расчетам в сопоставлении с полученными с использованием данных реанализа и спутниковых данных. Получены оценки возможных изменений морского волнения, сопровождающих значительное уменьшение протяженности морских льдов в Арктике по модельным расчетам для XXI века при разных сценариях антропогенных воздействий. Отмечены особенности различных режимов морских волн в Арктическом бассейне с оценкой роли ветровых волн, зыби, их взаимодействия, режимов хаотичного волнения типа волновой толчеи.

Ключевые слова: Арктический бассейн, изменения климата, морское волнение, моделирование, ветровые волны, зыбь, режимы волновой толчеи

DOI: 10.31857/S2686739721020134

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия отмечено значительное сокращение общей протяженности морских льдов в Арктике. Это имеет существенное значение для развития арктической транспортной системы и работы на шельфе [1–4]. При отступлении морских льдов возрастает риск увеличения морского волнения [5–10]. В связи с этим необходим разносторонний анализ режимов морского волнения в различных арктических акваториях с оценкой, наряду с ветровым волнением, эффектов зыби и эффектов типа волновой толчеи. Зыбь – компоненты волнения без притока энергии от ветра (после ослабления или изменения направления ветра, либо дошедшие из другой акватории с сильным волнением). Волны зыби могут распространяться на достаточно большие расстояния и, будучи сформированными в удаленных морских бассейнах, могут влиять на режим морских волн в акваториях Арктического бассейна. Толчея – волновой режим с беспорядочным (хаотичным) волнением, связанный с взаимодействием разнонаправленных систем ветровых волн и зыби.

Цель данной работы – анализ разных режимов морского волнения в Арктическом бассейне и их изменений при возможных изменениях климата в XXI веке на основе модельных расчетов, в том числе анализ вклада ветровых волн и волн зыби в волновую активность в Арктическом бассейне.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Характеристики ветровых волн в арктическом бассейне анализировались с использованием двумерной спектральной численной модели морского волнения третьего поколения WAWEWATCH III (версия 5.16) [11]. Численное моделирование выполнялось для области к северу от 50° с.ш. с пространственным разрешением 1° по долготе и 0.5° по широте. В качестве форсинга для модели WAVEWATCH III использовались поля концентрации морских льдов и приповерхностного ветра по расчетам с ансамблем 11 глобальных климатических моделей CMIP5 при разных сценариях: историческом (historical) сценарии для периода

[1] *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[3] *Московский физико-технический институт, Москва, Россия*
**E-mail: mokhov@ifaran.ru*

1990–2005 гг. и сценариях семейства RCP (RCP 4.5 и RCP 8.5) при различных антропогенных воздействиях для периода 2006–2100 гг. [10] (см. также [4, 12, 13]).

В данной работе, в частности, представлены результаты расчетов с климатическими моделями ACCESS1-3 (с пространственным разрешением 1.25° × 1.875°) и inmcm4 3 (с пространственным разрешением 1.5° × 2°) из ансамбля климатических моделей CMIP5 [14]. При отборе моделей учитывалась степень соответствия модельных расчетов современным данным для климатических характеристик в Арктическом бассейне (включая сплоченность морских льдов и высоту морских волн), а также их изменениям в начале XXI века [10].

В числе анализируемых характеристик морских волн – их значительная высота, значительная высота волн зыби, повторяемость режимов толчеи и оценки энергии морских волн. Для разделения компонент волнения использовалась встроенная в программный пакет модели WAVEWATCH III соответствующая автоматическая процедура [11]. В данной работе режим толчеи волн определялся с учетом превышения общей значительной высоты волн 2.5 м (бурное волнение) и наличия двух систем волн, направленных навстречу друг к другу, со значительными высотами этих двух систем волн, отличающимся менее чем в два раза.

Энергия волн определялась интегрированием по спектру. Акватории с покрытием льдом более чем на 75% в расчетах не учитывались, покрытые морским льдом менее чем на 25% считались открытой водой. В диапазоне 25–75% учитывалось затухание волн на несплошном льду. Полная энергия волн в океане рассчитывалась интегрированием по площади плотности энергии волн во всех расчетных точках модели, где покрытие льдом не превышает 75%.

При анализе использовались различные данные реанализа, включая ERA-Interim (https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim) и NCEP/NCAR CFSR (https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr), и спутниковые данные (ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/swath/altimeters/waves/).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты анализа численных расчетов с ансамблем климатических моделей в рамках международного проекта CMIP5 свидетельствуют о способности лучших современных моделей достаточно адекватно воспроизводить протяженность арктических морских льдов и изменении положения их границы в последние десятилетия в сопоставлении с данными спутниковых наблюдений [3, 4, 10, 15].

В [10] анализировались результаты различных модельных расчетов для положения кромки морских льдов (с концентрацией ≥25%) в Арктическом бассейне для периода 2006–2016 гг. и его изменений относительно периода 1990–2005 гг. в сопоставлении со спутниковыми данными. Модельные расчеты при историческом сценарии для периода 1990–2005 гг. были дополнены соответствующими модельными расчетами для периода 2006–2016 гг. при сценарии RCP 4.5. Анализ расчетов с 11 моделями ансамбля CMIP5 выявил, в частности, вполне адекватное согласие со спутниковыми данными региональных особенностей расположения кромки морских льдов и ее изменения в последние десятилетия для моделей ACCESS1-3 и inmcm4.

Аналогичное сравнение проведено для значительных высот морских волн в Арктике в сентябре по расчетам с волновой моделью WAVEWATCH III при климатических изменениях (включая концентрацию морских льдов и приповерхностный ветер) по расчетам с глобальными климатическими моделями ансамбля CMIP5, а также с использованием данных реанализа CFSR и ERA-Interim и спутниковых данных для периода 1990–2005 гг. Некоторые различия в сравнении со спутниковыми данными связаны с неопределенностью, присущей продуктам спутниковых наблюдений. В частности, анализ с учетом времени и локации спутниковых измерений свидетельствует [10] о хорошем согласии региональных особенностей для значительной высоты морских волн, определенных на основе данных реанализа и спутниковых данных. В сравнении с оценками, полученными по данным спутниковых наблюдений и реанализа, в целом адекватно воспроизводятся региональные особенности для значительной высоты волн в Арктическом бассейне, в частности в сентябре, по расчетам с моделями ACCESS1-3 и inmcm4.

На рис. 1 представлены средние изменения значительной высоты морских волн, значительной высоты зыби и повторяемости толчеи волн к концу XXI века (2091–2100 гг.) при сценарии RCP 8.5 относительно периода 1990–2005 гг. WAVEWATCH III по расчетам с моделью морского волнения WAVEWATCH III при климатических изменениях (включая концентрацию морских льдов и приповерхностный ветер) по расчетам с глобальными климатическими моделями ACCESS1-3 (а, в, д) и inmcm4 (б, г, е).

Полученные результаты с использованием расчетов с глобальными климатическими моделями из ансамбля CMIP5 при историческом (historical) и RCP сценариях подтверждают ранее полученные результаты с использованием расчетов

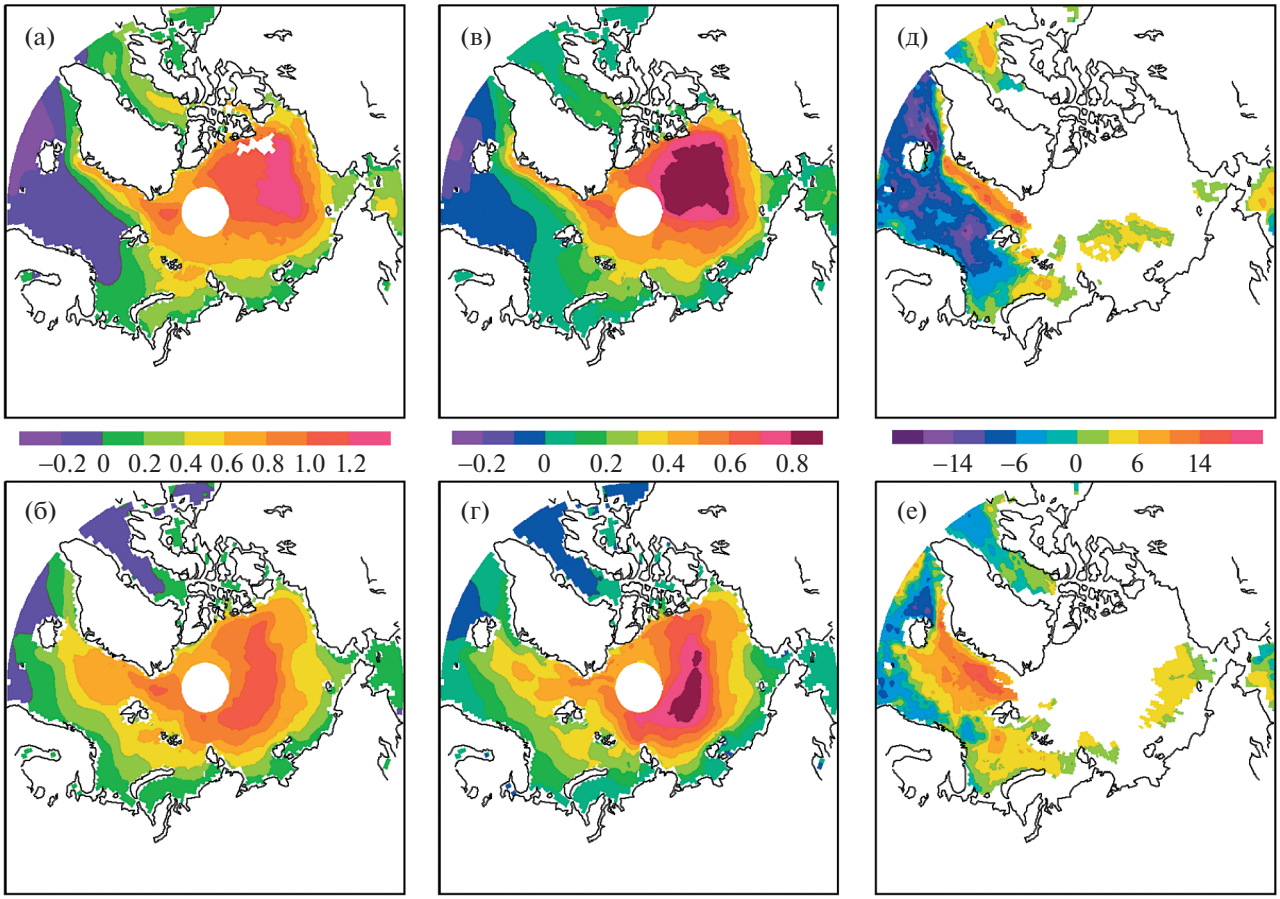

Рис. 1. Изменения значительной высоты волн, м (а, б), значительной высоты зыби, м (в, г) и возникновения толчеи волн, количество случаев в год (д, е) в конце XXI века (2091–2100 гг.) по сценарию RCP8.5 относительно периода 1990–2005 гг., по результатам моделирования WaveWatch III с климатическим форсингом (концентрация морского льда и приземный ветер), полученным на основе моделирования с двумя глобальными климатическими моделями: ACCESS1-3 (а, в, д) и inmcm4 (б, г, е).

с региональной климатической моделью HIRHAM при сценарии умеренных антропогенных воздействий семейства SRES [7, 8]. Значительная высота волн и ее экстремальные значения увеличиваются в разных акваториях Арктического бассейна при сокращении протяженности морских льдов в XXI веке. Противоположная тенденция с некоторым снижением высоты волн проявляется для атлантического сектора Арктического бассейна.

Результаты модельных расчетов свидетельствуют о сложной реакции морских волн в Арктическом бассейне на совместные изменения приповерхностного ветра и протяженности морских льдов при изменениях климата. Модельные прогностические оценки с пространственно-неоднородными изменениями морского волнения в Арктическом бассейне были позднее подтверждены [10]. По спутниковым данным и данным анализа, качественный переход к региональным режимам, прогнозируемым по модельным расчетам, уже начал проявляться со второй половины первого десятилетия XXI века (см. также [15]). Согласно рис. 1 аналогичные эффекты проявляются и для режимов зыби.

Особые эффекты связаны с взаимодействием ветровых волн и зыби с сопоставимой высотой, распространяющихся в разных направлениях (волновой режим толчеи). Согласно полученным модельным оценкам, можно ожидать увеличение повторяемости подобных явлений в Гренландском море и уменьшение в Норвежском и Баренцевом морях в XXI веке, в частности при сценарии RCP 8.5.

Наряду с оценками изменений разных видов морского волнения в различных акваториях Арктического бассейна получены модельные оценки изменений энергии морского волнения в целом для Арктического бассейна и изменений плотности энергии морского волнения на единицу площади.

На рис. 2 показан годовой цикл полной энергии ветровых волн E_{TOT} в Арктическом бассейне

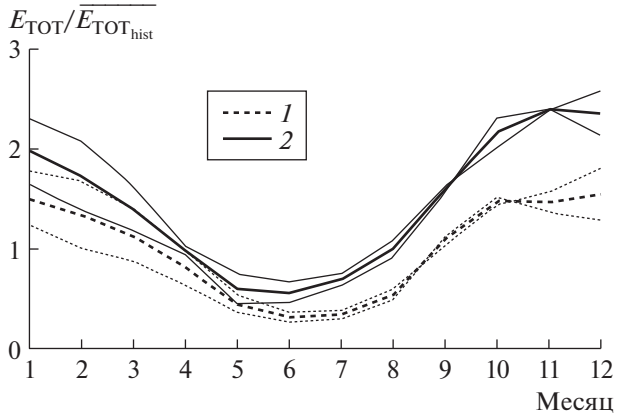

Рис. 2. Годовой ход полной энергии ветровых волн E_{TOT} в Арктическом бассейне по модельным расчетам при историческом сценарии и сценарии RCP 8.5 для двух периодов (1990–2005 гг. и 2091–2100 гг.) с нормированием на среднегодовую величину энергии морских волн для периода 1990–2005 гг. Тонкие линии соответствуют расчетам с моделями ACCESS1-3 и inmcm4, жирные линии соответствуют средним значениям для двух моделей. Пунктирные линии (1) соответствуют периоду 1990–2005 гг., сплошные линии (2) соответствуют периоду 2091–2100 гг.

по модельным расчетам при историческом сценарии и сценарии RCP 8.5 для двух периодов (1990–2005 гг. и 2091–2100 гг.) с нормированием на среднегодовую величину энергии морских волн $\overline{E_{TOT_{hist}}}$ для периода 1990–2005 гг. Согласно модельным расчетам, следует ожидать общего увеличения суммарной энергии морских волн в Арктическом бассейне в XXI веке для всех месяцев.

Согласно рис. 2, наибольшие изменения энергии ветровых волн в XXI веке при сценарии RCP 8.5 проявляются в холодные месяцы года – в конце осени и зимой. Наименьшие изменения проявляются в конце весны и начале лета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные оценки характеризуют реакцию морского волнения в арктическом бассейне на одновременные изменения режимов морских льдов и приповерхностного ветра с использованием результатов расчетов с климатическими моделями из ансамбля CMIP5 при сценариях RCP для XXI века. Согласно модельным результатам в условиях глобального потепления с уменьшением протяженности морских льдов следует ожидать общего увеличения значительной высоты волн в арктическом бассейне. Подобная тенденция ожидается и для экстремальных значений высот морских волн в арктических акваториях. Противоположная тенденция, с уменьшением высоты морских волн, проявляется для атлантического сектора Арктического бассейна. Впервые на фоне региональных особенностей ветровых волн получены оценки для режимов зыби и волновой толчеи, и их изменений при возможных изменениях климата в XXI веке.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Данная работа выполнена в рамках тематики проекта РНФ 18-47-06203. Анализ региональных особенностей климатической изменчивости с использованием модельных расчетов проводился в рамках проекта РНФ 19-05-00240. Особенности изменений режима морских льдов в Арктике оценивались в рамках тематики проекта РФФИ 18-05-60111.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khon V.C., Mokhov I.I., Latif M., Semenov V.A., Park W.* Perspectives of Northern Sea Route and Northwest Passage in the Twenty First Century // Clim. Change. 2010. V. 100. P. 757–768.
2. *Мохов И.И.* Современные изменения климата Арктики // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.
3. *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. 024010.
4. *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.
5. *Overeem I., et al.* Sea Ice Loss Enhances Wave Action at the Arctic Coast // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L17503. https://doi.org/10.1029/2011GL048681
6. *Young I.R., Zieger S., Babanin A.V.* Global Trends in Wind Speed and Wave Height // Science. 2011. V. 332 (6028). P. 451–455.
7. *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.
8. *Khon V., Mokhov I.I., Pogarskiy F., Babanin A., Dethloff K., Rinke A., Matthes H.* Wave Heights in the 21 Century Arctic Ocean Simulated with a Regional Climate Model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41 (8). P. 2956–2961.
9. *Liu Q., Babanin A.V., Zieger S., et al.* Wind and Wave Climate in the Arctic Ocean as Observed by Altimeters // J. Climate. 2016. V. 29. P. 7957–7975.
10. *Pogarskiy F., Khon V., Mokhov I.* Changes in the Arctic Basin Wave Characteristics from CMIP5 Simulations for the 21st Century // Geophys. Res. Abs. 2019. V. 21. EGU2019-14965.
11. The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG) User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 5.16. Tech. Note 329,

NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA / Technical note, MMAB Contribution. 2016. 361 p.

12. *Dobrynin M., Murawsky J., Yang S.* Evolution of the Global Wind Wave Climate in CMIP5 Experiments // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39 L18606. https://doi.org/10.1029/2012GL052843

13. *Wang M., Overland J.E.E.* A Sea Ice Free Summer Arctic within 30 Years - an Update from CMIP5 Models // Geophys. Res. Lett. 2012. V. 39. L18501. https://doi.org/10.1029/2012GL052868

14. *Knutti R., Masson D., Gettelman A.* Climate Model Genealogy: Generation CMIP5 and how we Got There // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 1194–1199.

15. *Мохов И.И.* Оценка способности современных климатических моделей адекватно оценивать риск возможных региональных аномалий и тенденций изменения // ДАН. 2018. Т. 479 (4). С. 452–455.

CHANGES OF SEA WAVES CHARACTERISTICS IN THE ARCTIC BASIN FROM MODEL SIMULATIONS FOR THE 21ST CENTURY

Academician of the RAS I. I. Mokhov[a,b,c,#] and F. A. Pogarskiy[a]

[a] *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[b] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

[c] *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: mokhov@ifaran.ru*

A significant reduction of the Arctic sea ice extent enhances the sea waves activity in the Arctic Ocean. In this paper we analyze characteristics of wind waves activity in the Arctic basin using the WAWEWATCH III model simulations forced by wind and sea ice fields derived from the CMIP5 global climate models under different scenarios. A relative contribution of wind seas and swells to the total sea waves activity in the Arctic basin from model simulations is assessed and compared to that based on reanalysis data and satellite observations. Possible changes of sea waves characteristics from model simulations for the 21st century with anthropogenic scenarios are estimated. Regional estimates of various states of sea waves in the Arctic basin (such as wind seas, swells and their interaction, chop-like events) are performed.

Keywords: Arctic basin, climate change, sea waves, modeling, wind waves, swells, chop-like events