

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 551.465

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В АРКТИКЕ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО СЦЕНАРИЯ

Н.А. Дианский^{1,2,3)}, И.В. Соломонова⁴⁾, А.В. Гусев^{2,5)}

¹⁾ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²⁾ Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва

³⁾ Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва

⁴⁾ Институт водных проблем РАН, Москва

⁵⁾ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

nikolay.diansky@gmail.com, _iren@mail.ru, anatoly.v.gusev@gmail.com

В статье предлагается комбинированный сценарий оценок климатических изменений, базирующийся на композиции «парникового» и «циклического» эффектов. С его помощью диагностированы причины колебания климата в Арктике, уточнен сценарий его изменения в XXI веке и приведен сценарий изменения состояния ледового покрова Арктики на долгосрочную перспективу. Последнее даст возможность оценить перспективы развития Северного морского пути.

Ключевые слова: Арктика, Северный морской путь, Атлантика, морской лёд, прогноз, климатические изменения, парниковый эффект, колебания.

PREDICTIVE ESTIMATES OF CLIMATE CHANGES IN THE ARCTIC BASED ON THE COMBINED SCENARIO

N.A. Diansky^{1,2,3)}, I.V. Solomonova⁴⁾, A.V. Gusev^{2,5)}

¹⁾ Lomonosov Moscow State University, Moscow

²⁾ Marchuk Institute of Numerical Mathematics RAS, Moscow

³⁾ N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow

⁴⁾ Water Problems Institute RAS, Moscow

⁵⁾ P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow

nikolay.diansky@gmail.com, _iren@mail.ru, anatoly.v.gusev@gmail.com

The article proposes a combined scenario of climate changes estimates based on the composition of "greenhouse" and "cyclical" effects. With its use, the causes of climate fluctuations in the Arctic were diagnosed. The scenario of its change in the XXI century was clarified and was given the scenario of changing of the Arctic ice cover for the long term. The latter will provide an opportunity to assess the development prospects of the Northern Sea Route.

Keywords: Arctic, Northern sea route, Atlantic, sea ice, forecast, climate changes, greenhouse effect, oscillations

В последнее время заметно повысился интерес к Арктике благодаря происходящим в этом регионе быстрым изменениям климата, а также прогнозам, указывающим на так называемое полярное усиление глобального потепления на протяжении всего XXI века [1]. Выводы отдельных публикаций [2] свидетельствуют, что климатические изменения в Арктике достигли порогового значения, при котором могут происходить необратимые процессы, и в грядущие десятилетия следует ожидать полного таяния льда в летний период.

Рассматриваемые отдельно, все модели дают уменьшение интенсивности субтропического круговорота вод в столетии и, как следствие, общее похолодание высокоширотного климата. Однако нужно подчеркнуть, что все эти модели, показывающие постепенное замедление круговорота, свидетельствуют о том, что соответствующее похолодание лишь замедляет общее глобальное потепление. Таким образом, совместные модели океан-атмосфера предсказывают нагревание поверхности повсеместно к концу столетия.

Установить связь поверхностных аномалий и общей циркуляции можно

только посредством анализа процессов на глубинах и высокоразрешающего моделирования. В области моделирования океанской циркуляции в последнее десятилетие достигнут существенный прогресс, связанный с увеличением пространственного расширения и использованием новых параметризаций перемешивания. Однако воспроизведение основных механизмов, управляющих океанской циркуляцией и её изменчивостью, в большинстве моделей характеризуется высокой степенью неопределенности. Как следствие, даже такие фундаментальные характеристики океанской циркуляции, как меридиональный перенос тепла, существенно различаются в различных моделях и при сравнении модельных расчетов с балансовыми оценками и прямыми расчетами.

Важнейшая особенность климата Арктики в прошедшем столетии – неоднократные его изменения. В глобальном климате наблюдались периоды потепления (1915-1949 гг. и 1971-по н.в.) и период похолодания (1950-1970 гг.), которые в Арктике, по сравнению с другими широтами, проявляются сильнее (рис. 1).

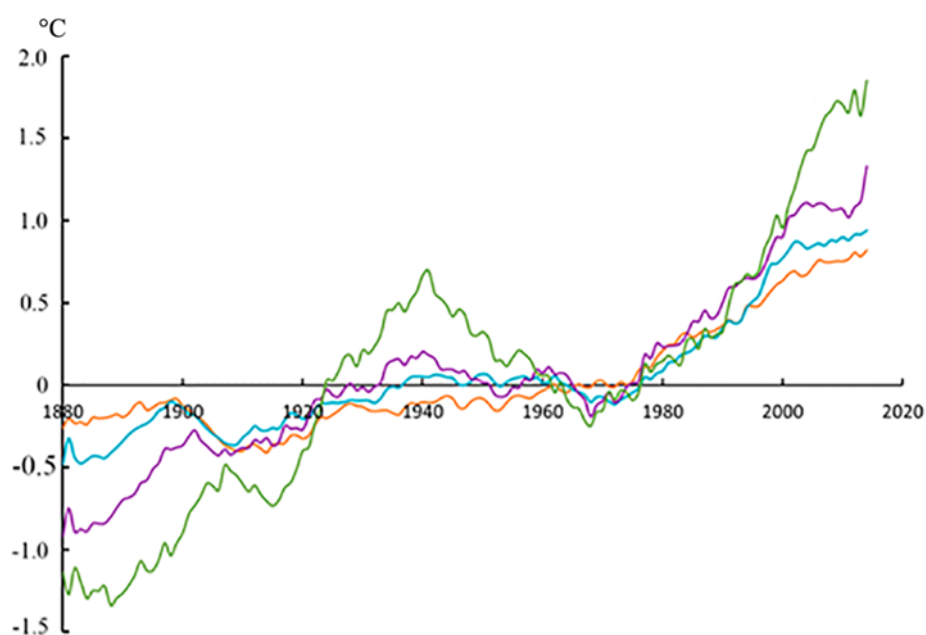


Рис. 1. Среднегодовые аномалии приземной температуры воздуха над сушей (сглаженные по девяти годам) за 1880-2014 гг., осредненные в полосе: оранжевая кривая – от экватора до 24° с. ш., голубая – 24-44° с. ш., фиолетовая – 44-64° с. ш., зелёная – 64-90° с. ш. (по данным Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies [3])

Эти климатические колебания [4–8] практически не воспроизводятся при моделировании с использованием моделей земной системы из списка МГЭИК (Межправительственная группа

экспертов по изменению климата или IPCC), основанных на совместных моделях общей циркуляции атмосферы и океана [9] (см. рис. 2).

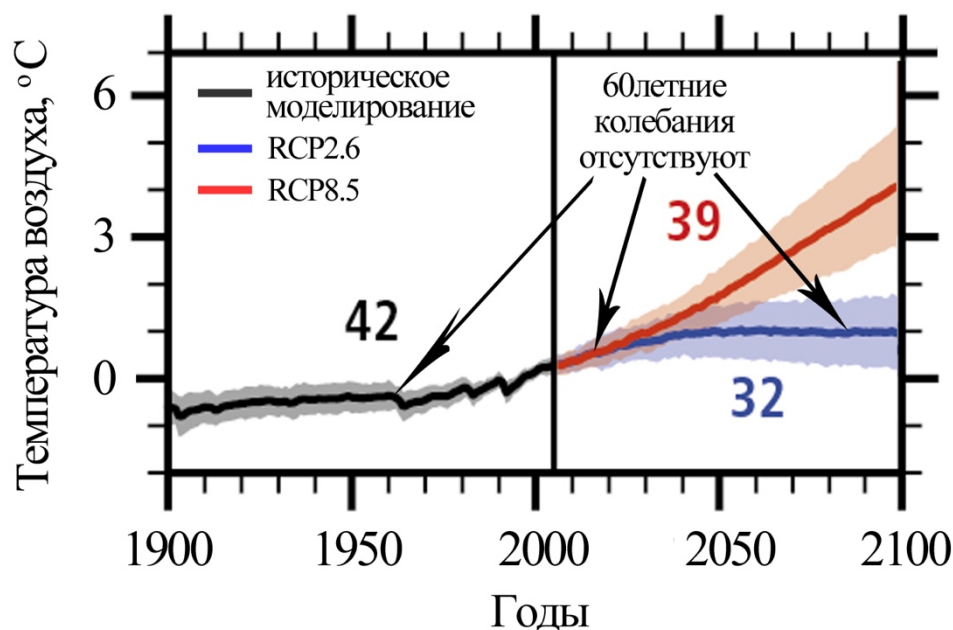


Рис. 2. Изменение средней глобальной приземной температуры (относительно 1986-2005 гг.) по данным МГЭИК [9]. Чёрная линия – результаты исторического моделирования CMIP5; синяя линия – временной ряд для сценария RCP2.6; красная линия – временной ряд для сценария RCP8.5. Затенение – мера неопределённости. Цифры – количество моделей CMIP5, использованных для расчёта мультимодельного среднего

На рис. 2 представлены временные ряды глобального ежегодного изменения средней приземной температуры за 1900-2100 гг. (относительно 1986-2005 гг.) по результатам задаваемых концентрациями экспериментов этапа 5 Проекта по сравнению совместных моделей (CMIP5). Приведены проектные оценки мультимодельного среднего (сплошные линии) и интервала 5-95 % повторяемости в распределении значений, полученных по отдельным моделям (затенение). Цифрами указано количество моделей CMIP5, использованных для расчёта мультимодельного среднего. Серые линии и затенение представляют результаты исторического моделирования CMIP5.

RCP (Representative Concentration Pathway) – это траектория концентрации парниковых газов (не эмиссия), принятая МГЭИК в своём пятом отчёте [9]. В RCP 2.6 предполагается, что глобальные годовые выбросы парниковых газов (измеряемые в CO₂-эквивалентах) достигают максимума в период между 2010 и 2020 годами, после чего выбросы существенно уменьшатся. В RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего 21-го века.

Данные измерений и реконструкций температуры в северной полярной зоне [4] свидетельствует о значительном вкладе циклических (около 60 лет) изменений температуры в

Арктический климат. В работах [10–12] отмечается, что во внутривековых температурных региональных (в частности, в Северной Атлантике (СА) и атлантическом секторе Арктики), полушарных и глобальных изменениях, а также в изменениях ледовитости арктических морей значимо проявляются вариации с периодом около 6 десятилетий – они характерны для Атлантической мультидекадной осцилляции (АМО), в свою очередь, связанной с термохалинной циркуляцией океана.

Такое поведение климатических изменений, произошедших за последние полтора века, позволило Г.Н. Панину [4] предложить простую аппроксимацию климатических изменений на основе композиции «парникового» и «циклического» эффектов (комбинированный сценарий оценок климатических изменений). Здесь под парниковым изменением климата подразумеваются климатические изменения, вызванные внешними факторами антропогенного или естественного (извержения вулканов, изменение солнечной постоянной и т.д.) характера. В свою очередь, под циклическими изменениями климата понимаются собственные колебания в совместной системе атмосфера-океан-суша. При этом полагалось, что главная частота наиболее сильных циклических колебаний климата соответствует периоду колебаний в 60 лет, а парниковые изменения климата определяются линейным трендом

$$\Delta T \approx \Delta T_{\text{IPCC}} + k \sin \omega t, \quad (1)$$

где ΔT – прогнозируемая аномалия температуры приземного воздуха; ΔT_{IPCC} – аномалия температуры, прогнозируемая с помощью МЗС МГЭИК; ω – циклическая частота приблизительно 60-летних колебаний климата; t – время; $k(\lambda, \varphi)$ – эмпирический коэффициент, зависящий от координат (более подробно см. [13]).

На основе предложенного комбинированного сценария, согласно формуле (1), был построен прогноз приповерхностных характеристик атмосферы на период 2010-2071 гг. с упором на данные за 1948-2009 гг. из базы CORE (Datasets for Common Ocean-ice Reference Experiments) [14] приповерхностных атмосферных характеристик за 1948-2009 гг. Эти данные [14], основанные на реанализе NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), характеризуются высоким качеством, достоверностью и сбалансированностью (что особенно важно для приходящей к поверхности Земли радиации), так как специально подготовлены для использования в моделях общей циркуляции океана. Используя эти данные, с помощью модели общей циркуляции океана INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) были проведены ретроспективные и прогностические расчёты по воспроизведению термохалинной циркуляции и морского льда в Атлантическом и Северном Ледовитом океанах (СЛО) на период 2010-2071 гг. В этой модели на основе полной системы уравнений гидротермодинамики океана рассчитываются все параметры циркуляции и термодинамического состояния вод океана, включая динамику и термодинамику морского льда [15].

Все это позволило оценить вклад термохалинной циркуляции в формирование североатлантического меридионального переноса тепла (МПТ) в высокие широты Северного полушария, оценить роль циклических особенностей климатических изменений СА и Арктики, изменение состояния ледяного покрова Арктики. Похолодание Арктики в 1950-1970-х годах происходило при снижении интенсивности АМО и Атлантической меридиональной циркуляции (АМЦ) в

этот период. Последний отражает климатические изменения в потоке тепла с поверхности СА в атмосферу в средних широтах. А рост интенсивности АМЦ в последние три десятилетия XX в. вместе с антропогенным воздействием мог способствовать значительному потеплению в Арктике. Эти изменения, по-видимому, привели и к увеличению продолжительности навигационного периода Северного морского пути (СМП). Изменчивость индекса АМО, а также индекса интенсивности АМЦ и связанного с ним результирующего потока тепла между СА и атмосферой характеризуется значительными долгопериодными колебаниями, что дает основание использовать эти индексы для оценки непосредственного влияния изменения климата СА на вариации климата в Северной Евразии и Арктике. Активизация таяния льда в Арктике в 1990-2000-х гг. согласуется с ростом этих индексов. [13].

Тенденции изменения ледовитости СЛО (рис. 3) находятся в противофазе с вариациями АМЦ и индекса АМО (см. [13]). Снижение активности термохалинной циркуляции в СА в период с 1948 г. до середины 1970-х годов согласуется с ростом ледовитости СЛО в этот период (см. [16, с.132; 17]). Рост интенсивности АМЦ и АМО с середины 1970-х годов до конца столетия сопровождался изменением распределения пресной воды в верхнем слое и уменьшением площади морского льда СЛО. По результатам расчётов циркуляции Мирового океана также выявлено заметное падение интенсивности АМЦ в конце XX в., которое проявляется также и для эволюции МПТ в океане [5; 18], результирующего потока тепла между СА и атмосферой.

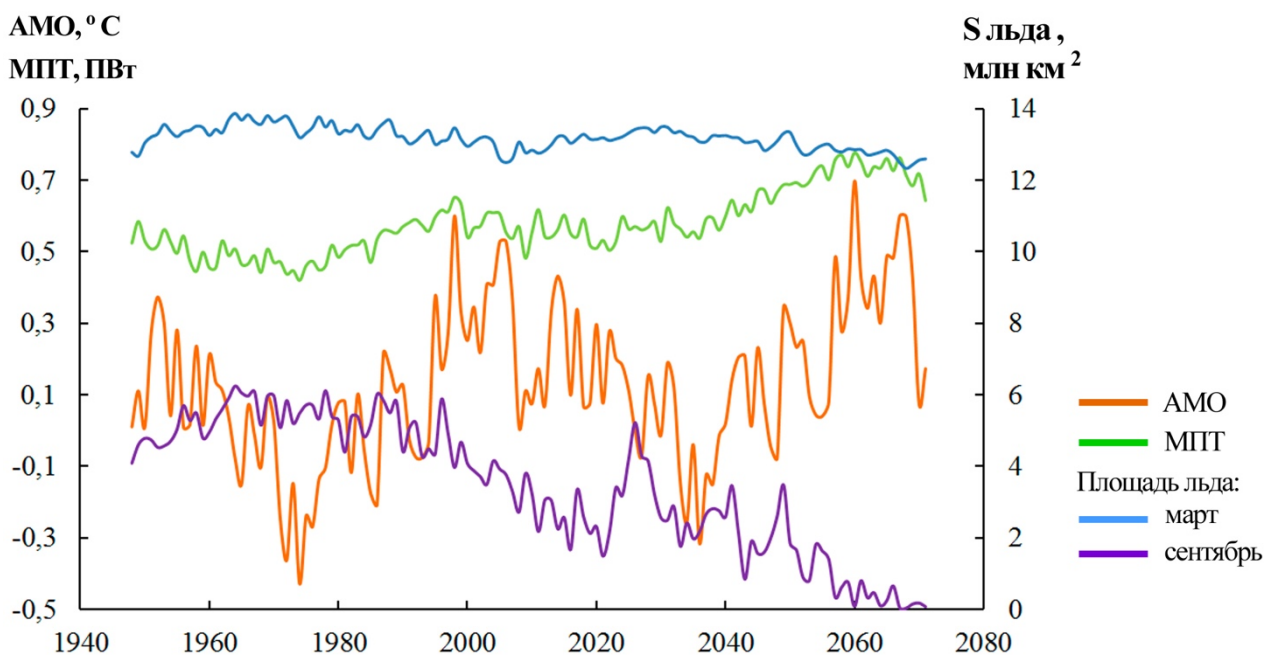


Рис. 3. Результаты расчётов по INMOM (1948-2009 гг. – диагноз, 2010-2070 гг. – прогноз согласно комбинированному сценарию) временного хода: среднегодового индекса АМО (оранжевая линия); МПТ, среднего в полосе 30-60° с. ш. в СА (зелёная

линия) и площади арктического льда в марте (голубая линия) и в сентябре (фиолетовая линия)

Результаты эволюции морского льда в СЛО, полученные с помощью расчётов по INMOM, показывают (рис. 3) ближе к 2020-м годам смену тенденций в ледовитости с падения на рост до середины 2030-х. А далее опять происходит быстрое уменьшение площади морского льда в СЛО. Такое поведение ледовитости находится в полном соответствии с ходом приповерхностной температуры в высоких широтах [19], когда имеет место падение среднегодовой температуры с начала 2020-х по середину 2030-х годов. В сезонном разрезе падение температуры начинается немного раньше, с 2007 г. в зимний сезон и с 2016 г. в летний. Также можно заметить, что рост площади льда в 2020-2030 гг. весьма значителен (рис. 3), и на 2026 г. почти соответствует состоянию, наблюдавшемуся при локальном похолодании 1970-х. При этом средняя температура локального похолодания 1960-х годов была приблизительно на 1.5°C ниже, чем в 2020-х годах. Таким образом, обнаружен нелинейный эффект в эволюции льда в СЛО, когда при значительно разных климатических ситуациях площадь льда в СЛО сравнима.

Проведённый анализ тенденций изменения ледовитости СЛО на основе ежедневных данных модельных расчетов (по комбинированному сценарию) показывает возможное похолодание в Арктике и соответствующее снижение продолжительности навигационного периода СМП в ближайшие 10-20 лет.

Сценарии развития морских льдов, полученные при помощи численного моделирования (см., например, [10; 11; 20–22]), показывают уменьшение площади ледяного покрова, что улучшит возможности навигации на трассе СМП и деятельности на шельфе в других частях

Арктики. Понятие «навигационный сезон» используется для определения числа дней в году, когда ледовые условия для навигации являются лёгкими в соответствии с оперативными определениями [20]. Для судов разного ледового класса требования для максимальной степени покрытия акватории льдом различны. Например, пороговое значение концентрации морских льдов 50% соответствует судам повышенного ледового класса.

Для определения продолжительности навигационного периода (ПНП) по комбинированному сценарию за 1948-2071 гг. использовались различные значения для предельной концентрации морских льдов в океанических модельных ячейках. В том числе, определялось количество суток в году с концентрацией морских льдов, не превышающей 15% (85% площади с открытой водой). Для сравнения, результаты сопоставлялись со спутниковыми данными (SMMR) за 1980-2013 гг., полученными в [11; 21] (рис. 4).

Как видно из рисунков, комбинированный сценарий даёт очень хорошее соответствие с данными наблюдений. Коэффициент корреляции между ПНП по комбинированному сценарию и данным со спутника составляет 0.5 (рис. 4б). На фоне общей тенденции увеличения ПНП отмечается большая межгодовая изменчивость. В отдельные периоды заметно уменьшается ПНП в XXI веке. По нашим расчетам, продолжительность навигации по СМП при концентрации морских льдов (степени покрытия акватории льдом) 15% может составить к 40-м годам XXI в. около 3.5-4 месяцев, а к 70-м годам – около 4.5-4.7 месяцев (рис. 4а).

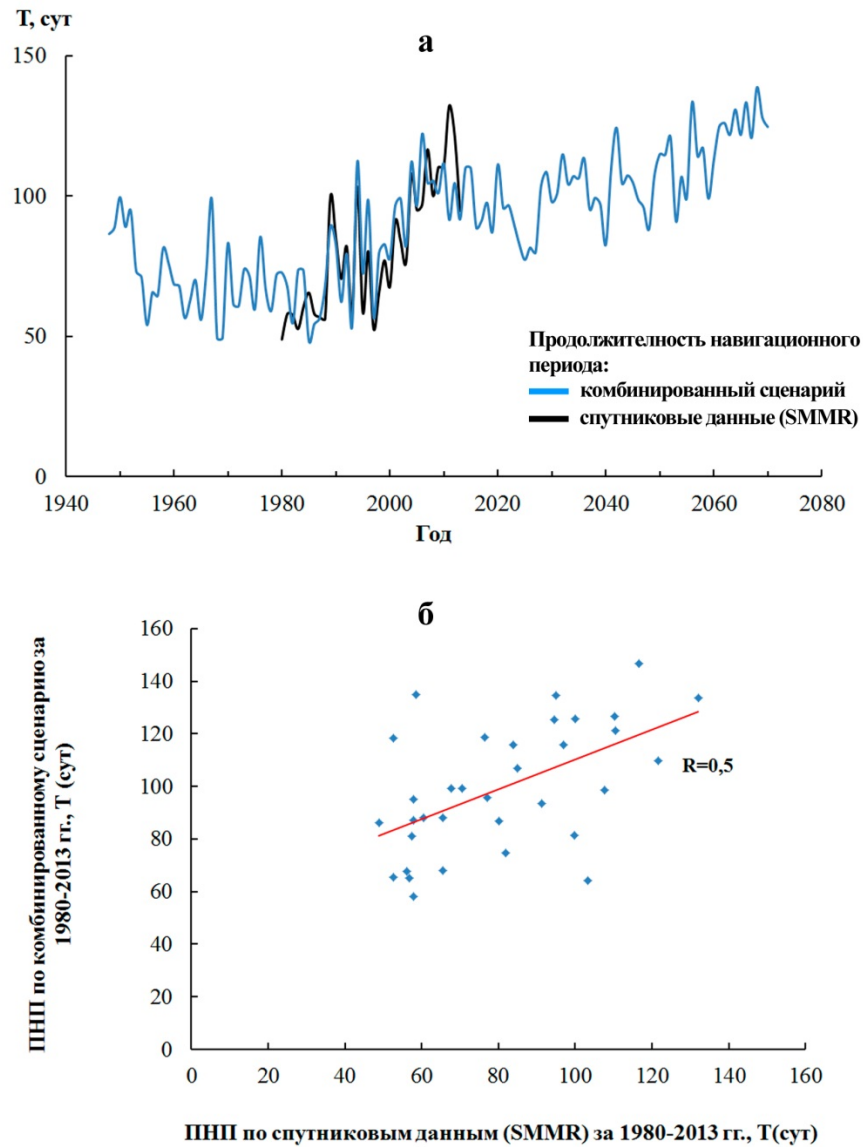


Рис. 4. Межгодовые вариации продолжительности навигационного периода Т(сут) при доле морских льдов не более 15%: голубая линия – по комбинированному сценарию за 1948-2071 гг; чёрная линия – спутниковые данные (SMMR) за 1980-2013 гг. по [21] (а).

Сопоставление результатов моделирования ПНП (комбинированный сценарий) со спутниковыми данными (SMMR) при доле морских льдов не более 15% за 1980-2013 гг.

(б)

Выводы

Основываясь на предложенной Г.Н. Паниным [4] аппроксимации климатических изменений на основе композиции «парникового» и «циклического» эффектов, впервые для

описания процессов, происходящих в полярных областях и прилегающих к ним районам, предложено использование модели с так называемой циклической составляющей для оценки возможных перспектив Северного морского пути [13]. Этот подход позволяет описывать не

только рост температуры, вызванный эмиссией парниковых газов, но и изменчивость климата (в частности наблюдавшееся похолодание в 1950-1970-х гг.).

Проведено исследование взаимосвязей между климатическими процессами Северной Атлантики и Арктики. Предложенный комбинированный сценарий климатических изменений показывает возможное похолодание в Арктике и соответствующее снижение продолжительности навигационного периода Северного морского пути в ближайшие 15 лет. Начиная

приблизительно с 2035 г. вплоть до 2070 г. опять начнётся потепление, причём более стремительное, чем было в конце XX в. По крайней мере, сценарий изменений ледовитости Арктики показывает это. Обнаружен нелинейный эффект в эволюции льда, когда при значительно разных климатических ситуациях 1980-х и прогнозируемых 2020-х гг. площадь льда в Арктике сравнима.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №18-05-60111-Арктика.

Список литературы:

1. Bekryaev R. V., Polyakov I. V., Alexeev V. A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming // J. Climate. 2010. Vol. 23. P. 3888-3906.

2. Lenton T. M., Held H., Kriegler E. et al. Tipping elements in the Earth's climate system // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2008. Vol. 105 (6). P. 1786-1793.

3. GISTEMP Team, 2017: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. URL <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

4. Панин Г. Н. Об изменениях климата в полярных зонах Земли в XX и XXI столетиях // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 427. С. 397-402.

5. Панин Г. Н., Выручалкина Т. Ю., Соломонова И. В. Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике, районе Каспия и их взаимосвязь // Фундам. и прикладная климатология. 2015. № 1. С. 183-210.

6. Панин Г. Н., Дианский Н. А. Климатические изменения в Арктике, Северной Атлантике и Северный морской путь // Докл. Акад. наук. 2015. Т. 462, № 2. С. 217-222.

7. Панин Г. Н., Соломонова И. В., Выручалкина Т. Ю. Климатические тенденции в средних и высоких широтах Северного полушария // Вод. ресурсы. 2009. Т. 36, № 6. С. 743-756.

8. Семенов В. А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Докл. РАН. 2008. Т. 418, № 1. С. 106-109.

9. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner et al (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.

10. Мохов И. И. Современные изменения климата в Арктике // Вестн. РАН. 2015. Т. 85, № 5-6. С. 478-484.

11. Мохов И. И., Хон В. Ч., Прокофьева М. А. Новые модельные

оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // Докл. РАН. 2016. Т. 468, № 6. С. 699-704.

12. Алексеев Г. В. Проявление и усиление глобального потепления в Арктике // *Фундамент. и прикладная климатология*. 2015. № 1. С. 11-26.

13. Панин Г. Н., Дианский Н. А., Соломонова И. В., Гусев А. В., Выручалкина Т. Ю. Оценка климатических изменений в Арктике в XXI столетии на основе комбинированного прогностического сценария // *Арктика: экология и экономика*. 2017. № 2(26). С. 35-52.

14. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set // *Clim Dyn*. 2009. Vol. 33. P. 341-364.

15. Дианский Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.

16. Алексеев Г. В., Большианов Д.Ю., Радионов В.Ф., Фролов С.В. 95 лет исследований климата и криосферы Арктики в АНИИ // *Лёд и снег*. 2015. Т. 55, № 4. С. 127-140.

17. Захаров В.Ф. Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей // *Тр. АНИИ*. 1976. Т. 337. 96 с.

18. Гусев А. В., Дианский Н. А. Воспроизведение циркуляции Мирового океана и ее климатической изменчивости в 1948-2007 гг. с помощью модели INMOM // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 1. С. 3-15.

19. Дианский Н.А., Соломонова И.В., Гусев А.В. Оценка перспектив навигации по Северному морскому пути на основе комбинированного прогностического сценария // *Труды*

Государственного океанографического института. 2018. № 219. С. 249-268.

20. Йоханнесен О.М., Александров В.Ю., Фролов И.Е., Сандвен С., Петтерссон Л.Х., Бобылев Л.П., Клостер К., Смирнов В.Г., Миронов Е.У., Бабич Н.Г. Научные исследования в Арктике. Т. 3. Дистанционное зондирование морских льдов на Северном морском пути: изучение и применение. Спб.: Наука, 2007. 512 с.

21. 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.

22. Wadhams P. Next year or the year after, the Arctic will be free of ice. *The Guardian*. 21 August 2016. URL <https://www.theguardian.com/environment/2016/aug/21/arctic-will-be-ice-free-in-summer-next-year>

References

1. Bekryaev R.V., Polyakov I.V., Alexeev V.A. Role of Polar Amplification in Long-Term Surface Air Temperature Variations and Modern Arctic Warming. *J. Climate*, 2010, vol. 23, pp. 3888-3906.

2. Lenton T.M., Held H., Kriegler E. et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, vol. 105 (6), pp. 1786-1793.

3. GISTEMP Team, 2017: GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP). NASA Goddard Institute for Space Studies. Available at: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

4. Panin G.N. On climate changes in polar zones of the Earth in the twentieth and twenty-first centuries. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 427, no. 2, pp. 988-992.

5. Panin G.N., Vyruchalkina T.Yu., Solomonova I.V. (2015). Klimaticheskie izmeneniya v Arktike, Severnoj Atlantike, rajone Kaspiya i ih vzaimosvyaz' [Climatic changes in the Arctic, North Atlantic, the

Caspian Sea region, and their relationships]. *Fundam. i prikladnaya klimatologiya*, – *Fundamental and Applied Climatology*, 2015, no. 1, pp. 183-210. (In Russian).

6. Panin G.N., Diansky N.A. Climatic variations in the Arctic, North Atlantic, and the Northern sea route. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 462, no. 1, pp. 505-509.

7. Panin G.N., Solomonova I.V., Vyruchalkina T.Yu. Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere. *Water Resources*, 2009, vol. 36, no. 6, pp. 718-730.

8. Semenov V.A. Influence of oceanic inflow to the Barents Sea on climate variability in the Arctic region. *Doklady Earth Sciences*, 2008, vol. 418, no. 1, pp. 91-94.

9. IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner et al (eds.)]. Cambridge; New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.

10. Mokhov I.I. *Sovremennyye izmeneniya klimata v Arktike* [Contemporary climate changes in the Arctic]. *Vestn. RAN – Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 85, no. 5-6, pp. 478-484. (In Russian).

11. Mokhov I.I., Khon V.Ch., Prokofeva M.A. New model estimates of changes in the duration of the navigation period for the Northern sea route in the 21st century. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, no. 2, pp. 641-645.

12. Alekseyev G.V. *Proyavlenie i usilenie global'nogo potepneniya v Arktike* [Development and amplification of global warming in the Arctic]. *Fundam. i prikladnaya klimatologiya – Fundamental and Applied Climatology*, 2015, no. 1, pp. 11-26. (In Russian).

13. Panin G.N., Dianskiy N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V., Vyruchalkina T.Yu. (2017). *Ocenka klimaticheskikh izmenenij v Arktike v XXI stoletii na osnove kombinirovannogo prognosticheskogo scenariya* [Assessment of climatic changes in the Arctic in the 21st century based on the combined forecast]. *Arktika: ekologiya i*

ekonomika – The Arctic: ecology and economy, 2017, no. 2(26), pp. 35-52. (In Russian).

14. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air–sea flux data set. *Clim Dyn.*, 2009, vol. 33, pp. 341-364.

15. Dianskiy N.A. *Modelirovanie cirkulyacii okeana i issledovanie ego reakcii na korotkoperiodnyye i dolgoperiodnyye atmosferynye vozdeystviya* [Simulation of ocean circulation and the study of its response to short-term and long-term atmospheric effects]. M.: Fizmatlit, 2013. 272 p. (In Russian).

16. Alekseyev G.V., Bol'shiyanov D.YU., Radionov V.F., Frolov S.V. 95 let issledovaniy klimata i kriosfery Arktiki v AANII [95 years of research on the Arctic climate and the cryosphere at the AARI]. *Led i Sneg – Ice and Snow*, 2015, vol. 55, no. 4, pp. 127-140. (In Russian).

17. Zaharov V.F. *Poholodanie Arktiki i ledyanoy pokrov arkticheskikh morej* [Arctic Cooling and Ice Sheet of the Arctic Seas]. *Trudy AANII – Proceedings of AANII*, 1976, vol. 337, 96 p. (In Russian).

18. Gusev A.V., Diansky N.A. Numerical simulation of the world ocean circulation and its climatic variability for 1948-2007 using the INMOM. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 1-12.

19. Dianskiy N.A., Solomonova I.V., Gusev A.V. *Ocenka perspektiv navigacii po Severnomu morskemu puti na osnove kombinirovannogo prognosticheskogo scenariya* [Assessing prospects of navigation on the northern sea route based of the combined prognostic scenario]. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo institute – Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute*, 2018, no. 219, pp. 249-268. (In Russian).

20. Johannessen O.M., Aleksandrov V.Yu., Frolov I.E., Sandven S., Pettersson L.H., Bobylev L.P. et al. *Nauchnye issledovaniya v Arktike. T. 3. Distancionnoe zondirovanie morskikh l'dov na Severnom morskem puti: izuchenie i primenenie* [Scientific research in the Arctic. T. 3. Remote sensing of sea ice on the Northern

Sea Route: study and application]. Spb.: Nauka, 2007. 512 p. (In Russian).

21. Mokhov I.I., Khon V.Ch. Prodolzhitel'nost' navigacionnogo perioda i ee izmeneniya dlya Severnogo morskogo puti: model'nye ocenki [Duration of the navigation period and its changes for the Northern Sea Route: model estimates]. Arktika: ekologiya i ekonomika ekonomika –

The Arctic: ecology and economy, 2015, no. 2 (18), pp. 88-95. (In Russian).

22. Wadhams P. Next year or the year after, the Arctic will be free of ice. The Guardian. 21 August 2016. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2016/aug/21/arctic-will-be-ice-free-in-summer-next-year>.