

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462>
УДК 551.58



ОБЗОР

REVIEW

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В АРКТИКЕ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

И.И. МОХОВ^{1, 2}

¹ — *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия*

² — *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

mokhov@ifaran.ru

Резюме

В статье (обзоре) оцениваются особенности современных быстрых климатических изменений в Арктике и их последствий на основании результатов, полученных в последние годы. В том числе представлены результаты, полученные в рамках программы Президиума РАН «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» и российско-германского проекта QUARCCS (QUAntifying Rapid Climate Change in the Arctic: regional feedbackS and large-scale impacts). Наряду с данными наблюдений анализировались различные данные реанализа, а также результаты численных расчетов с глобальными и региональными версиями климатических моделей при разных сценариях антропогенных воздействий для XXI в.

Представлены оценки сравнительной роли естественных и антропогенных факторов в формировании температурных трендов на разных временных горизонтах. Согласно полученным оценкам, доминирующая роль радиационного форсинга парниковых газов проявляется в арктических широтах на временных масштабах около полувека и более.

Новые климатические явления, в частности формирование кратеров на Ямале в условиях тающей вечной мерзлоты, и новые эффекты, в том числе для тенденций изменения морского волнения в акваториях Арктического бассейна, свидетельствуют о достижении определенного критического уровня регионального и глобального потепления, сопоставимого с потеплением оптимума голоцена. При этом современные климатические модели проявляют способность не только воспроизводить ключевые особенности современных климатических режимов и их изменчивости, но и дают возможность получать адекватные прогностические оценки даже для сложных процессов в Арктике

Ключевые слова: Арктика, естественные и антропогенные факторы, климатические изменения, моделирование.

Для цитирования: *Мохов И.И.* Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 4. С. 446–462. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462>.

Поступила 28.07.2020

После переработки 15.09.2020

Принята 29.10.2020

FEATURES OF MODERN CLIMATE CHANGES IN THE ARCTIC AND THEIR CONSEQUENCES

IGOR I. MOKHOV^{1,2}

¹ — A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, Russia

² — Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

mokhov@ifaran.ru

Summary

The paper is based on the results reported in an invited speaker presentation at the scientific conference dedicated to the 100th anniversary of AARI in March 2020. The features of present-day rapid climate changes in the Arctic and their consequences are assessed. The presented results include those obtained in the framework of the program of the Presidium of the Russian Academy of Sciences "Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and regulation" and the Russian-German project QUARCCS (QUAntifying Rapid Climate Change in the Arctic: regional feedbacks and large-scale impacts). An assessment is made of the relative contribution of natural and anthropogenic factors to the formation of temperature trends at different time horizons in the Arctic. In view of the rapid changes of the Arctic climate, the prospects of the Northern Sea route are examined. According to the estimates obtained, the dominant role of radiative forcing is manifested in the Arctic latitudes on time scales of about half a century or more.

New climatic phenomena (in particular, the formation of craters in the Yamal Peninsula under the conditions of melting permafrost) and new effects (including the change in the trends of changes in sea waves in the waters of the Arctic basin) indicate the achievement of a certain critical level of regional and global warming, comparable to the warming of the Holocene Climate Optimum. At the same time, modern climate models can not only reproduce the key features of current climatic regimes and their variability, but also provide adequate predictive estimates even for complex processes in the Arctic.

Keywords: the Arctic, climate change, modeling, natural and anthropogenic factors

For Citation: Mokhov I.I. Features of modern climate changes in the Arctic and their consequences. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (4): 446–462. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462>.

Received 28.07.2020

Revised 15.09.2020

Accepted 29.10.2020

ВВЕДЕНИЕ

Потепление Арктики последних десятилетий, характеризующееся так называемым полярным (Арктическим) усилением, со значительно более быстрым ростом поверхностной температуры по сравнению с глобальными изменениями сопровождается быстрым уменьшением протяженности морских льдов. Быстрые изменения климата в Арктике проявляются на фоне большой межгодовой и более долгопериодной климатической изменчивости в высоких широтах, что затрудняет выделение значимых тенденций и количественную оценку роли различных естественных и антропогенных факторов [1–5].

В основе данной работы результаты, представленные в приглашенном докладе «Быстрые климатические изменения в Арктике и их региональные и крупномасштабные последствия» на научной конференции, посвященной 100-летию юбилею ААНИИ, в марте 2020 г. Оцениваются особенности современных быстрых изменений климата в Арктике с использованием результатов, полученных в 2017–2020 гг. в рамках про-

граммы Президиума РАН «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» и российско-германского проекта QUARCCS (QUAntifying Rapid Climate Change in the Arctic: regional feedbackS and large-scale impacts). В том числе определяется роль естественных и антропогенных факторов современных изменений климата в арктических широтах на разных временных горизонтах. В связи с быстрыми изменениями климата в Арктике оцениваются перспективы Северного морского пути. Определяются потенциальные риски на Северном морском пути и для работы на шельфе, связанные с изменением морского волнения при изменении режима морских льдов в Арктическом бассейне. Оценивается способность современных климатических моделей описывать происходящие изменения. Отмечаются особенности изменений температурной стратификации в арктической атмосфере, влияющие на циклоническую активность. С изменениями атмосферной циркуляции связаны изменения переноса в Арктику атмосферных примесей, включая черный углерод от сибирских пожаров.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

При анализе использовались температурные данные GISS (<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>), NOAA (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>), CRU (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/>), спутниковые данные NSIDC (<http://nsidc.org>) для протяженности и концентрации морских льдов в полярных широтах для последних десятилетий. Наряду с данными наблюдений использовались различные данные реанализа, включая ERA5 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>) и NCEP/NCAR (<https://www.esrl.noaa.gov>).

Связь климатических режимов в высоких широтах с ключевыми модами климатической изменчивости, включая явления Эль-Ниньо различных типов (каноническое Эль-Ниньо и Эль-Ниньо Модоки), Атлантическую мультидесятилетнюю осцилляцию (АМО), междесятилетнюю тихоокеанскую осцилляцию и др., оценивалась с использованием соответствующих индексов (<http://climexp.knmi.nl/start.cgi/>). Для явлений Эль-Ниньо разного типа использовались индексы Nino3 и Nino4, характеризующие температуру поверхности в восточной и центральной части Тихого океана в экваториальных широтах. Для оценки параметров чувствительности различных климатических переменных, в частности протяженности морских льдов, к изменениям климата использовались соответствующие линейные регрессии на приповерхностную температуру. Для оценки связи режимов морских льдов в полярных широтах с вариациями температурного режима наряду с корреляционным анализом использовался кросс-вейвлетный анализ. Для исследования причинно-следственных связей в климатической системе и сравнительной роли разных естественных и антропогенных факторов использовались оценки причинности по Винеру–Грейнджеру [6].

Для модельных оценок использовались результаты расчетов с климатическими моделями разной степени сложности. В частности, анализировались результаты расчетов с ансамблем климатических моделей общей циркуляции СМIP5, мультимодельных расчетов с региональными климатическими моделями в рамках проекта Arctic-CORDEX, а также расчетов с климатической моделью промежуточной сложности КМ ИФА РАН. При анализе морского волнения в Арктическом бассейне использовалась модель WAWEWATCH III (http://polar.ncep.noaa.gov/mmab/papers/tn276/MMAB_276.pdf). Способность современных климатических моделей адекватно воспроизводить современные изменения климата оценивалась с использованием байесовского подхода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены изменения (тренды) среднегодовой температуры у поверхности для разных широт по данным GISS для периода 1980–2019 гг. с максимальным потеплением до 4 °С и более в арктических широтах (Арктическое усиление).

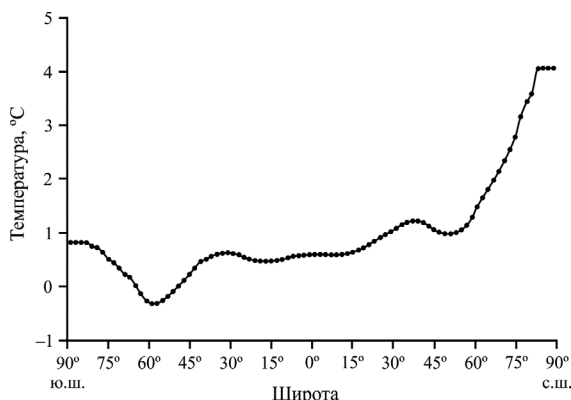


Рис. 1. Изменения (тренды) среднегодовой температуры у поверхности для разных широт по данным GISS для периода 1980–2019 гг.

Fig. 1. Changes (trends) of the annual-mean temperature at the surface for different latitudes based on GISS data for the period 1980–2019

Рис. 2 характеризует межгодовую изменчивость приповерхностной температуры (аномалий относительно базового периода 1951–1980 гг.) в Арктике в сопоставлении с соответствующими вариациями в средних и тропических широтах Северного полушария (СП) и для Земли в целом по данным (<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/>, <http://www.metoffice.gov.uk/>) [6]. Во внутривековых температурных региональных (в частности, в атлантическом секторе Арктики), полушарных и глобальных изменениях, а также в изменениях ледовитости арктических морей значимо проявляются вариации с временным масштабом около шести десятилетий — они характерны для Атлантической мультидесятилетней осцилляции. Согласно модельным расчетам АМО связана с соответствующими вариациями глобальной термохалинной циркуляции океана, одна из ветвей которой — Гольфстрим. Влиянием этого глобального океанического

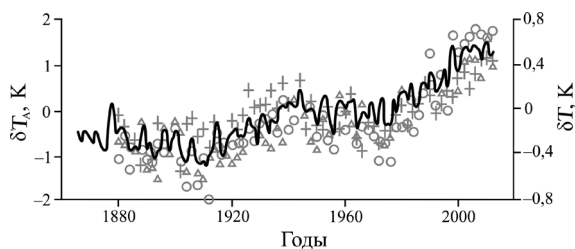


Рис. 2. Межгодовая изменчивость приповерхностной температуры (°C): в Арктике (крестики) — левая шкала (δT_A) — и в средних (кружки) и тропических (треугольники) широтах Северного полушария и для Земли в целом (жирная кривая) — правая шкала (δT) [8]

Fig. 2. Interannual variability of the surface air temperature (°C): in the Arctic (crosses) — the left scale (δT_A), and in the middle (circles) and tropical (triangles) latitudes of the Northern Hemisphere and for the Earth as a whole (bold curve) — the right scale (δT) [8]

конвейера определяется существенный утепляющий эффект в Северной Атлантике и атлантическом секторе Арктики.

В [3] получены условия влияния климатической моды с характерным временным масштабом около шести десятилетий, связанной с АМО, на фоне вековой тенденции потепления на региональном и глобальном уровне. При этом согласно экстраполяциям температурных вариаций для XXI в. в течение ближайших двух десятилетий возможно относительное замедление скорости потепления или даже некоторое (временное) похолодание с последующим более быстрым потеплением. В простейшем случае гармонического колебания температуры $T(t)$ с периодом T_0 (около 60 лет) и амплитудой ΔT на фоне векового линейного тренда $(dT/dt)_c$ отсутствие временного интервала с похолоданием (без отрицательного температурного тренда даже в фазах понижения температуры для колебательного процесса) при условии

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_c / \left(\frac{2\pi\Delta T}{T_0}\right) \geq 1.$$

С использованием данных для приповерхностной температуры с XIX в. получены оценки для СП в целом с амплитудой приповерхностных температурных осцилляций $(\Delta T)_{NH}$ с периодом T_0 примерно 60 лет (с максимумом в первом десятилетии XXI в.) около 0,2 К (с минимальными оценками около 0,1 К). При столетнем тренде приповерхностной температуры для СП в целом для отсутствия временного похолодания необходимо и достаточно, чтобы амплитуда соответствующих температурных осцилляций $(\Delta T)_{NH}$ с периодом T_0 около 60 лет не превышала $(\Delta T)_{NH}(T_0/2\pi) = 0,1$ К.

Аналогичные оценки получены для амплитуды осцилляций $(dT)_A$ с периодом T_0 примерно 60 лет для Арктики в целом $(dT)_A$ (с максимумом в первом десятилетии XXI века) — около 0,3 К (с максимальными оценками около 0,4 К и минимальными — около 0,2 К). При столетнем тренде приповерхностной температуры для Арктики в целом $(dT/dt)_A = 2,4\text{K}/100$ лет для отсутствия временного похолодания необходимо и достаточно, чтобы амплитуда температурных осцилляций $(dT)_A$ с периодом T_0 около 60 лет для Арктики в целом не превышала $(dT/dt)_A(T_0/2\pi) = 0,23\text{K}$. Согласно полученным оценкам, возможно замедление скорости потепления и даже некоторое локальное похолодание в течение одного-двух десятилетий с последующим более быстрым потеплением и в Арктике, и на полушарном (глобальном) уровне [3].

Какова роль различных естественных и антропогенных факторов в происходящих изменениях климата на разных временных интервалах? В табл. 1 представлены оценки вклада парниковых газов, а в табл. 2 — вклада естественных вариаций (АМО) в тренды приповерхностной температуры для предыдущих десятилетий на временных интервалах разной продолжительности относительно современного режима по многолетним данным (с конца XIX в.) с использованием оценок причинности по Винеру–Грейнджеру [6]. Согласно полученным оценкам, доля вклада антропогенных факторов в тренд приповерхностной температуры в арктических широтах не более одной трети на временных интервалах до двух десятков лет, достигает двух пятых для 30-летнего периода, а на интервалах около полувека и более уже превышает половину [6]. При этом для других широтных зон и для Земли в целом соответствующие оценки роли антропогенных факторов получены более значимыми. Это связано с большой естественной климатической изменчивостью в арктических широтах, что подтверждают оценки в табл. 2.

Таблица 1

Оценки вклада парниковых газов в тренды приповерхностной температуры разных широтных зон и для Земли в целом для периодов разной продолжительности относительно современного режима по данным с конца XIX в. [6]

Table 1

Estimates of the contribution of greenhouse gases to trends in the surface air temperature in different latitudinal zones and for the Earth as a whole for periods of different duration relative to the current state, based on data from the late 19th century [6]

Период (годы)	Глобальное осреднение	Тропические широты	Средние широты	Высокие широты
20	0,6	0,6	0,4	0,3
30	0,6	0,7	0,4	0,4
50	0,8	0,9	0,7	0,6

Таблица 2

Оценки отношения вклада естественной изменчивости (АМО) в тренд приповерхностной температуры разных широтных зон и для Земли в целом для периодов разной продолжительности относительно современного режима по данным с конца XIX в. [6]

Table 2

Estimates of the ratio of the contribution of natural variability (AMO) to the trend of surface air temperature in different latitudinal zones and for the Earth as a whole for periods of different duration relative to the current state based on data from the late 19th century [6]

Период (годы)	Глобальное осреднение	Тропические широты	Средние широты	Высокие широты
20	0,8	0,7	1	1
30	0,5	0,5	0,7	0,7
50	0,1	0,1	0,2	0,2

Наиболее ярким проявлением современных изменений климата, связанных с Арктическим усилением, является быстрое уменьшение площади арктических морских льдов (<http://nsids.org>) (см. также [1–5]). Данные NSIDC (<http://nsids.org>), основанные на спутниковых измерениях с 1979 г., свидетельствуют о тенденции уменьшения площади арктического морского льда в сентябре, превышающей 1 % в год. Наблюдаемые изменения допускают возможность того, что уже через несколько десятилетий в Арктическом бассейне в летние и осенние месяцы не будет морских льдов.

Согласно оценкам с использованием спутниковых данных и данных реанализа, чувствительность ледовитости Арктики к изменению приповерхностной температуры СП на 1 К находится в диапазоне от –1,0 млн км² в феврале до –2,5 млн км² в сентябре [7]. При этом в Южном полушарии в последние десятилетия отмечалась противоположная тенденция, хотя и незначимая, с общим ростом протяженности морских льдов в Антарктике, в отличие от ожидаемого по модельным оценкам уменьшения ледовитости Южного океана. Необходимость объяснения отмеченного противоречия — одна из наиболее известных климатических проблем начала XXI в.

Общее увеличение в последние десятилетия протяженности морских льдов в Антарктике, контрастировавшее с быстрым уменьшением общей протяженности

арктических морских льдов при сильном арктическом потеплении, сменилось резким уменьшением ледовитости в Южном океане с 2016 г. Отмеченное до этого общее увеличение площади морских льдов в Антарктике объясняется тем, что спутниковые данные для протяженности морских льдов доступны только с конца 1970-х гг., когда отмечалось общее понижение, хотя и относительно слабое, температуры океана в антарктических акваториях. Региональное понижение температуры поверхности океана в антарктических широтах для последних четырех десятилетий на фоне общего потепления ЮП объясняется значимым влиянием естественных климатических квазициклических процессов типа Эль-Ниньо, Антарктической осцилляции и междесятилетней тихоокеанской осцилляции. Для более длительных периодов, в частности для последних шести десятков лет, проявляется уже общий рост температуры поверхности океана в антарктических широтах. При продлении ряда спутниковых данных для морских льдов в ближайшие годы на фоне общего потепления соответственно следует ожидать более значимое проявление общей тенденции уменьшения протяженности антарктических морских льдов. Явные признаки этого проявились в 2016 г., а результаты кросс-вейвлетного анализа свидетельствуют, что уже в течение последних двух десятилетий проявляется все более значимая отрицательная корреляция долгопериодных вариаций общей протяженности антарктических морских льдов с температурным режимом в Антарктике и для ЮП в целом в соответствии с прогностическими модельными оценками [7].

Аналогично [3] можно оценить соотношение амплитуд ΔT и ΔS и периода (T_0) циклических изменений T и S на фоне общих (вековых) трендов повышения температуры $(dT/dt)_c$ и уменьшения протяженности морских льдов $(dS/dt)_c$, при которых возможны периоды с изменениями противоположного знака: $dT/dt < 0$, $dS/dt > 0$. В простейшем случае гармонических вариаций температуры $T(t)$ и площади морских льдов $S(t)$ на фоне общего потепления с $(dT/dt)_c > 0$ и $(dS/dt)_c < 0$ соответствующее условие для возможности $dT/dt < 0$ и $dS/dt > 0$ сводится к следующему:

$$\Delta S / (T_0 / 2\pi) \geq (-dS/dt)_c (dT/dt)_c.$$

В табл. 3 представлены количественные оценки чувствительности общей протяженности арктических и антарктических морских льдов S (млн км²) к изменению приповерхностной температуры T К по данным реанализа ERA5 соответственно в СП и в Арктике для разных месяцев по спутниковым данным в межгодовой изменчивости для периода 1978–2019 гг. [7]. Выделены параметры чувствительности, оцениваемые коэффициентами соответствующих линейных регрессий, значимые на уровне двух стандартных отклонений, а также соответствующие коэффициенты корреляции. В СП оценки статистически значимы для всех месяцев.

Наибольшие значения (по абсолютной величине) параметров чувствительности dS/dT для арктических морских льдов оценены для летних месяцев и сентября — до $-1,7$ млн км² при потеплении на 1 К в Арктике в августе и, соответственно, до $-2,6$ млн км² при потеплении на 1 К в СП в августе. Наименьшие значения (по абсолютной величине) параметров чувствительности dS/dT для арктических морских льдов оценены для конца зимы — в феврале — около $-0,2$ млн км² при потеплении на 1 К в Арктике и, соответственно, около $-1,0$ млн км² при потеплении на 1 К в СП [7].

В связи с быстрыми климатическими изменениями в Арктике актуальны оценки их последствий. В [8–10] с использованием результатов численных расчетов с ансамб-

Таблица 3

Оценки чувствительности протяженности арктических морских льдов (млн км² / К) по спутниковым данным (<http://nsidc.org>) к изменению приповерхностной температуры в Северном полушарии и в Арктике по данным реанализа ERA5 для разных месяцев в межгодовой изменчивости [7]

Table 3

Satellite-based (<http://nsidc.org>) estimates of the sensitivity of the Arctic sea ice extent (mln. km² / K) to the change in the surface air temperature in the Northern Hemisphere and in the Arctic based on ERA5 reanalysis data for different months in interannual variability [7].

dS / dT 1979–2019 гг.		
Месяцы	Арктика	Северное полушарие
Январь	-0,29 (±0,05)	-1,17 (±0,15)
Февраль	-0,24 (±0,05)	-0,99 (±0,15)
Март	-0,29 (±0,06)	-1,02 (±0,12)
Апрель	-0,31 (±0,05)	-1,04 (±0,14)
Май	-0,46 (±0,08)	-1,33 (±0,16)
Июнь	-0,90 (±0,09)	-1,76 (±0,12)
Июль	-1,61 (±0,21)	-2,46 (±0,23)
Август	-1,65 (±0,17)	-2,62 (±0,25)
Сентябрь	-1,16 (±0,11)	-2,48 (±0,26)
Октябрь	-0,73 (±0,05)	-2,21 (±0,18)
Ноябрь	-0,40 (±0,04)	-1,33 (±0,14)
Декабрь	-0,37 (±0,05)	-1,15 (±0,16)

лем климатических моделей при разных сценариях антропогенных воздействий для XXI в. получены оценки изменений продолжительности навигационного периода на Северном морском пути, в том числе с использованием байесовских оценок. Отмечено, что лучшие модели климата способны не только адекватно воспроизводить средние современные ледовые условия, но и адекватно оценивать естественную изменчивость ледовитости и чувствительность режима арктических морских льдов к изменениям климата [11]. Получены оценки при разных условиях для допустимой концентрации морских льдов (в частности, не более 15 % площади покрытия) и одновременно открытой для навигации части СМП (в частности, не менее 80 %). В табл. 4 представлены средние значения мультимодельных оценок продолжительности навигационного периода T (сут) на Северном морском пути и ее тренда dT / dt (сут/год) по ансамблевым модельным расчетам при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 для разных временных интервалов в 1980–2100 гг. в сопоставлении со спутниковыми данными (см. также [11]).

На основе ансамблевых модельных расчетов при различных сценариях антропогенных воздействий получено, что ожидаемая продолжительность навигационного периода на Северном морском пути оценивается около 2–3 месяцев к середине XXI в. и 3–6 месяцев к его концу [10]. При этом отмечены большие различия моделей в воспроизведении естественной межгодовой и более долгопериодной естественной климатической изменчивости, в частности изменчивости ледовитости морей на Северном морском пути.

Средние значения мультимодельных оценок продолжительности навигационного периода T на Северном морском пути и ее тренда dT/dt по ансамблевым модельным расчетам при сценарии умеренных антропогенных воздействий RCP 4.5 для разных временных интервалов в 1980–2100 гг. в сопоставлении со спутниковыми данными [8]

Table 4

Average values of multi-model estimates of the navigation period duration T on the Northern Sea Route and its trend dT/dt based on ensemble model simulations, taking into account anthropogenic forcings of the RCP 4.5 scenario for different time intervals in 1980–2100 in comparison with satellite data [8]

Данные период, годы		dT/dt сут/год	T сут
Спутниковые данные	1980–2013	1,8 ($\pm 0,3$)	80 (± 24)
		1,8 ($\pm 0,2$)	85 (± 21)
Ансамблевые модельные оценки	2016–2013	1,5 ($\pm 1,1$)	107 (± 11)
	2046–2055	0,8 ($\pm 0,8$)	125 (± 7)
	2091–2100	0,9 ($\pm 1,1$)	157 (± 10)

На фоне общих тенденций изменений климата в Арктике отмечаются особенности температурной, ледовой и циркуляционной изменчивости в разных регионах, в том числе в атлантическом секторе Арктики, в бассейнах Баренцева и Карского морей, на архипелаге Шпицберген, на полуострове Ямал, в районе пролива Вилькицкого [12]. С климатическими аномалиями в Арктике связаны погодно-климатические аномалии в других широтных зонах, в том числе в российских регионах [13]. Это проявилось, в частности, в формировании в последние годы аномально холодных зимних режимов в разных регионах СП. Отмечается особая роль Баренцева моря, как бассейна с сильнейшей изменчивостью теплообмена между океаном и атмосферой в Арктике, в формировании аномальных погодно-климатических режимов в российских регионах [14]. Проявление подобных региональных сезонных аномалий не только не противоречит тенденции глобального потепления, но и подтверждает результаты модельных расчетов [15] с увеличением их вероятности (особенно зимой над континентами) при общем потеплении.

При глобальном потеплении существенно изменяется вертикальная температурная стратификация атмосферы, характеризующая статическую устойчивость и конвективную неустойчивость тропосферы. С изменениями вертикальной температурной структуры атмосферы, с изменением ее статической устойчивости связаны, в частности, изменения конвективных процессов в атмосфере, режимов облачности и вихре-волновой активности. Генерация внетропических циклонов связана с проявлением бароклинной неустойчивости и зависит как от меридионального градиента температуры, так и от вертикальной температурной стратификации атмосферы. От климатической обратной связи через вертикальный градиент температуры γ в тропосфере существенно зависит проявление Арктического усиления, чувствительность климата к различным воздействиям.

В [5] представлены широтные зависимости нормированных на соответствующие средние значения для СП оценок вертикального градиента температуры γ в тро-

посфере, параметра $d\gamma / dT$, характеризующего чувствительность γ к изменению приповерхностной температуры T , и параметра $p = \gamma^{-1}(d\gamma / dT)\delta T$, характеризующего относительную роль вариаций вертикальной температурной стратификации в тропосфере на разных широтах в межгодовой изменчивости, оцениваемой среднеквадратическим отклонением δT , по данным реанализа для периода 1979–2014 гг. Параметр $d\gamma / dT$ оценивался по среднегодовым данным с использованием линейной регрессии γ на T . Значения γ для разных широт нормировались на значение $\gamma_{NH} = 6,3$ К/км. Оценки $d\gamma / dT$ для разных широт, нормированные на среднеполушарную величину $(d\gamma / dT)_{NH} = 0,045$ км⁻¹, в арктических широтах могут быть в два раза больше, чем $(d\gamma / dT)_{NH}$ для Северного полушария в целом (см. также [16]). Значения параметра p в арктических широтах в 4 раза больше, чем для СП в целом, и намного больше, чем для тропических широт. Общая положительная корреляция γ с приповерхностной температурой T свидетельствует о соответствующей положительной климатической обратной связи.

Отмеченные особенности способствуют ослаблению статической устойчивости атмосферы и усилению конвективных процессов при потеплении с увеличением частоты, интенсивности и продолжительности экстремальных погодно-климатических явлений с наибольшими рисками в высоких широтах [17]. А в условиях более влажной атмосферы (в соответствии с уравнением Клаузиуса–Клапейрона) это способствует увеличению риска формирования интенсивных атмосферных вихрей, в том числе мощных циклонов в полярных широтах [18]. Циклоны играют важную роль в изменениях климатической системы Арктики [18–22]. С ними связаны региональная погодно-климатическая изменчивость, перенос атмосферного тепла и влаги из средних широт в Арктику. Циклоническая активность влияет на формирование климатических обратных связей, в том числе облачных, на температурный режим и режим морских льдов. В [23] проведен разносторонний анализ циклонической активности в Арктике на основе разных данных реанализа (ERA-Interim, NASA-MERRA2, NCEP-CFSR, JRA55) для 30-летнего периода 1981–2010 гг. на основе метода детектирования, использованного также в [19–22]. Отмечено общее хорошее согласие результатов, полученных по разным данным. Проведен детальный анализ сезонных особенностей пространственных распределений разных характеристик арктических циклонов, включая их повторяемость, интенсивность и размеры, с оценкой трендов. В [22] получены оценки изменений циклонической активности в Арктике с использованием расчетов с ансамблем региональных климатических моделей, участвующих в международном проекте Arctic-CORDEX. Для большинства моделей отмечено общее увеличение частоты циклонов зимой и уменьшение летом к концу XXI в. при сценарии RCP 8.5. При этом для половины моделей циклоны в целом становились слабее и существенно меньше зимой и глубже и крупнее летом.

С региональными погодно-климатическими аномалиями связаны региональные аномалии состава атмосферы. В частности, формированию аномального регионального содержания различных атмосферных примесей способствуют квазистационарные антициклонические режимы в атмосфере [24]. Вследствие этого возможны региональные экологические последствия в связи с образованием озоновых «минидыр» с аномалиями интенсивности биологически-активного солнечного излучения, формированием аномального трансграничного переноса, в частности продуктов горения лесных пожаров. Увеличение вероятности наиболее продолжительных блоки-

рований с квазистационарным антициклоническим режимом при общем потеплении [15] способствует увеличению риска подобных региональных аномалий. При этом возможен меридиональный перенос атмосферных примесей в Арктику, в частности продуктов сгорания, включая черный углерод, от сибирских пожаров [25]. Перенос сажевого аэрозоля в Арктику со снежно-ледяным покровом способствует изменению радиационного баланса арктической системы, таянию льдов и общему потеплению.

Климатические изменения в Арктике не могут не сказаться на биоте, на разнообразии всех групп организмов, населяющих морской лед, и на продуктивности планктонных сообществ в Арктическом бассейне [26]. С арктическими льдами связаны уникальные морские экосистемы с особыми группами организмов, включающими бактерии и вирусы [27]. Имеющиеся данные свидетельствуют, в частности, что численность и структура популяции ключевого вида арктического зоопланктона *Calanus glacialis*, составляющего до 60 % всей биомассы зоопланктона, тесно связаны с режимом морских льдов в районе его обитания [28]. В условиях сокращения и изменения структуры ледяного покрова отмечены существенные изменения в популяции этого вида, наиболее значимая корреляция для которого отмечена с концентрацией морских льдов.

С изменением ледовитости в Арктическом бассейне связаны изменения морского волнения. В [29, 30] по модельным расчетам для XXI в. отмечено общее усиление волновой активности в Арктическом бассейне, в том числе усиление образования мощных волн в различных акваториях. Это связано с увеличением длины разгона волн в результате расширения площади открытой воды и с региональным усилением ветра в атмосфере. При этом выявлен рост повторяемости дней с сильным ветром и интенсивными волнами для регионов российских арктических морей с наибольшим усилением на акватории Карского моря. Противоположная тенденция с общим ослаблением морского волнения выявлена в бассейне Баренцева моря и связана с региональным уменьшением скорости ветра.

Возможность смоделированных в [29, 30] пространственно-неоднородных изменений ветро-волнового режима в арктических регионах в первой половине XXI в. с учетом антропогенных воздействий была позже подтверждена с использованием спутниковых данных и данных реанализа для последних лет [31]. До 2006 г. для всех морей в российской части Арктики наметилась тенденция увеличения высоты волн и скорости ветра (табл. 5). А после 2007 г. тенденция роста высоты волн сменилась на обратную в более западных морях — Баренцевом и Карском. При этом тенденция увеличения скорости ветра сменилась на противоположную в акваториях всех морей, хотя для 90-х перцентилей смена тенденций отмечена только для Баренцева и Карского морей (см. также [11]). Приведенный пример подтверждения новых модельных результатов реальными данными свидетельствует не только о способности современных моделей адекватно воспроизводить глобальные и региональные климатические режимы и их изменения, но и о потенциале выявлять новые эффекты, не проявляющиеся или незначимые при современном климатическом режиме, которые могут проявиться при более сильных климатических изменениях. Выявление возможных качественных переходов («сдвигов») при климатических изменениях имеет важное значение для оценки критических изменений, при превышении которых возможно не только изменение структуры климатической системы на региональном и глобальном уровне, но и переход к необратимым изменениям.

Таблица 5

Оценки региональных трендов средних значений (в скобках — для 90-х перцентилей) значительной высоты морских волн в акваториях морей Арктического бассейна по данным [31]. Выделены оценки, статистически значимые на уровне 90 % [11]

Table 5

Estimates of the regional trends in the mean values (in brackets — for the 90th percentile) of significant heights of sea waves in the waters of the seas of the Arctic Basin, according to the data from [31]. The highlighted estimates are those that are statistically significant at the level of 90 % [11].

Акватория	Высота волн, м/10 лет	
	1996–2006 гг.	2007–2015 гг.
Баренцево море	0,3 (0,5)	-0,3 (-0,4)
Карское море	0,4 (0,5)	-0,2 (-0,3)
Море Лаптевых	0,2 (0,3)	0,2 (0,7)
Восточно-Сибирское море	0,4 (0,6)	0,0 (0,1)
Чукотское море	0,0 (0,1)	0,1 (0,3)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Погодно-климатические аномалии и тенденции последних лет свидетельствуют не только об увеличении риска экстремальных региональных событий, но и о проявлении новых процессов, характеризующих достижение определенного критического уровня происходящих изменений. Так, в последние годы выявлено образование воронок (кратеров) на Ямале (впервые в 2014 г.) и в сопредельных арктических регионах [32]. В [32] образование подобных кратеров связано с разложением метангидратов неглубокого залегания с газовым выбросом в атмосферу в регионах распространения вечной мерзлоты при происходящем потеплении. Согласно [32] формирование метангидратов неглубокого залегания было возможно при высоком давлении под существовавшим в отмеченных регионах десятки тысяч лет назад ледяным щитом. То, что кратеры, подобные ямальским, образуются в настоящее время, свидетельствует о том, что современное потепление климата может быть не только сопоставимо с потеплением оптимума голоцена около 6 тысяч лет назад, но и превосходить его, по крайней мере на региональном уровне [33]. В целом это согласуется с оценками [34] для голоцена.

В условиях неопределенности разных модельных оценок более надежно и значимо климатические изменения могут оцениваться при ансамблевых модельных расчетах. Достаточно часто результаты расчетов с ансамблем всех анализировавшихся моделей лучше соответствуют данным наблюдений, чем каждая отдельная модель. Стоит отметить, что согласно [35] есть общее согласие оценок особенностей климатических изменений в Арктике, в частности приповерхностной температуры, по расчетам с ансамблями моделей двух поколений — CMIP5 и CMIP3. Это характеризует общую устойчивость оценок возможных изменений климата при использовавшихся сценариях антропогенных воздействий. При этом региональные оценки зависят от ансамблевой статистики и критериев соответствия модельных расчетов реальным данным. Для

получения более надежных оценок можно выделять подансамбль моделей, лучше соответствующих реальным данным [8, 9], и использовать байесовский подход [10].

Лучшие модели способны адекватно воспроизводить не только региональные особенности климатических режимов, но и их современную изменчивость и тенденции изменения [5, 11]. Об этом свидетельствуют, в частности, полученные в [8, 9] результаты модельных оценок изменений навигационного периода на Северном морском пути в сопоставлении со спутниковыми данными для последних десятилетий. При этом согласно полученным модельным оценкам на фоне общего потепления и увеличения навигационного периода на Северном морском пути в XXI в. при достаточно большой межгодовой изменчивости в ближайшие десятилетия в первой половине века не исключено ослабление тренда роста продолжительности навигационного периода и даже локальное проявление его уменьшения.

Необходимо менять многие критерии и оценки рисков и потенциальных выгод, связанных с климатическими изменениями, особенно быстрыми в высоких широтах, и стратегически оценивать возможные изменения и их последствия, в том числе с учетом повышения вероятности аномальных региональных режимов [3].

Конфликт интересов. Отсутствует.

Финансирование. Существенная часть представленных результатов была получена в рамках программы Президиума РАН «Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования» и российско-германского проекта QUARCCS. Особенности изменчивости морских льдов в Арктике анализировались также в рамках проекта РФФИ (18-05-60111). Анализ взаимных изменений протяженности арктических и антарктических морских льдов проводился в рамках проекта РФФИ (19-05-00240).

Competing interests. No competing interests.

Funding. A significant part of the presented results was obtained within the framework of the Program of the RAS Presidium “Climate Change: Causes, Risks, Consequences and Problems of Adaptation and Regulation” and the Russian-German project QUARCCS. The specific features of sea ice variability in the Arctic were also analyzed within the framework of the RFBR project (18-05-60111). The analysis of mutual changes in the length of the Arctic and Antarctic sea ice was carried out within the framework of the RSF project (19-05-00240).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.). Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press, 2013. 1535 p.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
3. Мохов И.И. Современные изменения климата Арктики // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.
4. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Смоляницкий В.М., Фильчук К.В. Результаты и перспективы исследований климата и климатического обслуживания в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 3. С. 262–269.
5. Mokhov I.I. Contemporary climate changes: Anomalies and trends // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 231. P. 012037.

6. Мохов И.И., Смирнов Д.А. Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультidesятилетней осцилляции в тренды приповерхностной температуры // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 9. С. 5–13.
7. Мохов И.И., Парфенова М.Р. Особенности изменчивости антарктических и арктических морских льдов в последние десятилетия на фоне глобальных и региональных климатических изменений // *Вопросы географии*. Сб. 150. Исследования Антарктиды. М.: Издательский дом «Кодекс», 2020. С. 304–319.
8. Мохов И.И., Хон В.Ч., Прокофьева М.А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // *Доклады АН*. 2016. Т. 468. № 6. С. 699–704.
9. 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. doi:10.1088/1748-9326/aa5841.
10. 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 // *Доклады АН*. 2018. Т. 481. № 1. С. 88–92.
11. Мохов И.И. Оценка способности современных климатических моделей адекватно оценивать риск возможных региональных аномалий и тенденций изменения // *Доклады АН*. 2018. Т. 479 (4). С. 452–455.
12. Тисленко Д.И., Иванов Б.В., Смоляницкий В.М., Священников П.Н., Исаксен К., Гьетлен Х. Сезонные и многолетние изменения ледовитости в районе архипелага Шпицберген за период 1979–2015 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. № 3 (109). С. 50–59.
13. Мелешко В.П., Мирвис В.М., Говоркова В.А., Байдин А.В., Павлова Т.В., Львова Т.Ю. Потепление климата Арктики и аномально холодная погода зимой в 1979–2017 гг. в Северной Евразии // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 4. С. 15–25.
14. Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М. Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
15. Мохов И.И., Тимажев А.В. Атмосферные блокирования и изменения их повторяемости в XXI веке по расчетам с ансамблем климатических моделей // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 6. С. 5–16.
16. Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А., Парфенова М.Р., Ринке А. Особенности температурной стратификации и ее изменений в тропосфере арктических широт по данным реанализа и модельным расчетам // *Метеорология и гидрология*. 2019. № 2. С. 19–27.
17. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 2019. V. 14. P. 045001. doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82.
18. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика / Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС, 2018. 482 с.
19. Акперов М.Г., Дембицкая М.А., Мохов И.И. Циклоническая активность в Арктическом регионе по модельным расчетам и данным реанализа // *Изв. РАН. Сер. Геогр.* 2017. № 6. С. 39–46.
20. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Matthes H., Semenov V.A., Adakudlu M., Cassano J., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Glisan J., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Parfenova M., Scinocca J.F., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Trends of intense cyclone activity in the Arctic from reanalyses data and regional climate models (Arctic-CORDEX) // *IOP Publ.: Earth Environ. Sci.* 2019. V. 231. 012003. doi:10.1088/1755-1315/231/1/012003.

21. Akperov M., Rinke A., Mokhov I., Matthes H., Semenov V. and the Arctic Cordex Team. Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX) // J. Geophys. Res. Atmos. 2018. V. 123 (5). P. 2537–2554.
22. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Parfenova M.R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiema O., Dmitry Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX) // Glob. Planet. Change. 2019. V. 182. P. 103005.
23. Zahn M., Akperov M., Rinke A., Feser F., Mokhov I.I. Trends of cyclone characteristics in the Arctic and their patterns from different re-analysis data // J. Geophys. Res. 2018. V. 123. No. 5. P. 2537–2551.
24. Ситнов С.А., Мохов И.И. Аномалии содержания метана в атмосфере над севером Евразии летом 2016 года // ДАН. 2018. Т. 480. № 2. С. 223–228.
25. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Likhoshertova A.A. Exploring large-scale black-carbon air pollution over Northern Eurasia in summer 2016 using MERRA-2 reanalysis data // Atmos. Res. 2020. V. 235. Art. Id. 104763. doi:10.1016/j.atmosres.2019.104763.
26. Kosobokova K.N., Hopcroft R.R. Diversity and vertical distribution of mesozooplankton in the Arctic's Canada Basin // Deep Sea Res. Part II. Top Studies in Oceanography. 2010. V. 57. P. 96–110.
27. Сажин А.Ф., Романова Н.Д., Копылов А.И., Заботкина Е.А. Бактерии и вирусы в арктическом льду // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 373–382.
28. Choquet M., Hatlebakk M., Dhanasiri A.K.S., Kosobokova K., Smolina I., Sureide J.E., Svensen C., Melle W., Kwasmniewski S., Eiane K., Daase M., Tverberg V., Skreslet S., Bucklin A., Hoarau G. Genetics redraws pelagic biogeography of *Calanus* // Biol. Lett. 2017. V. 13. 20170588. doi: 10.1098/rsbl.2017.0588
29. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч., Погарский Ф.А. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование // Лед и снег. 2013. № 2 (122). С. 53–62.
30. Khon V., Mokhov I.I., Pogarskiy F., Babanin A., Dethloff K., Rinke A., Matthes H. Wave heights in the 21st century Arctic Ocean simulated with a regional climate model // Geophys. Res. Lett. 2014. V. 41 (8). P. 2956–2961.
31. Liu Q., Babanin A.V., Zieger S., Young I.R., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters // J. Climate. 2016. V. 29. P. 7957–7975.
32. Аржанов М.М., Малахова В.В., Мохов И.И. Условия формирования и диссоциации метангидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчетам // Доклады АН. 2018. Т. 480. № 6. С. 725–29.
33. Мохов И.И., Елисеев А.В., Гурьянов В.В. Модельные оценки глобальных и региональных изменений климата в голоцене // Доклады АН. 2020. Т. 490. № 1. С. 27–32.
34. Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years // Science. 2013. V. 339. P. 1198–1201.
35. Катцов В.М., Павлова Т.В. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха в Арктике в 21-м веке: результаты расчетов с помощью ансамблей глобальных климатических моделей (CMIP5 и CMIP3) // Тр. ГГО. 2015. Вып. 579. С. 7–21.

REFERENCES

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

2. *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii*. Second Roshydromet assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. Moscow: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental monitoring (Roshydromet), 2014: 1008 p. [In Russian].
3. Mokhov I.I. Contemporary climate changes in the Arctic. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2015, 85 (3): 265–271.
4. Alekseev G.V., Radionov V.F., Smolyanitsky V.M., Filchuk K.V. Results and prospects of the climate studies and climate service in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (3): 262–269. [In Russian].
5. Mokhov I.I. Contemporary climate changes: Anomalies and trends. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019, 231: 012037.
6. Mokhov I.I., Smirnov D.A. Contribution of greenhouse gas radiative forcing and Atlantic Multidecadal Oscillation to surface air temperature trends. Russian Meteorology and Hydrology. 2018, 43 (9): 557–564.
7. Mokhov I. I., Parfenova M.P. Features of variability of the Antarctic and Arctic sea ice in recent decades against the background of global and regional climatic changes. *Voprosy geografii*. Problems of Geography. 2020, 150 (Exploration of Antarctica): 304–319. [In Russian].
8. Mokhov I.I., Khon V.Ch., Prokof'eva 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, 468 (2): 641–645.
9. 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, 12 (2): 024010. doi:10.1088/1748-9326/aa5841.
10. Kibanova O.V., Eliseev A.V., Mokhov I.I., Khon V.Ch. Variations in the duration of the navigation period along the Northern Sea Route in the 21st century based on simulations with an ensemble of climatic models: Bayesian estimates. Doklady Earth Sciences. 2018, 481 (1): 907–911.
11. Mokhov I. I. Assessment of the ability of contemporary climate models to assess adequately the risk of possible regional anomalies and trends. Doklady Earth Sciences. 2018, 479 (2): 482–485.
12. Tislenko D.I., Ivanov B.V., Smolyanitsky V.M., Svyashchennikov P.N., Isaksen K., Herdis M. Seasonal and long-term changes of sea ice extent in the Svalbard archipelago area during 1979–2015. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2016, 3 (109): 50–59. [In Russian].
13. Meleshko V.P., Mirvis V.M., Govorkova V.A., Baidin A.V., Pavlova T.V., Lvova T.Yu. The Arctic climate warming and extremely cold winters in North Eurasia during 1979–2017. Russian Meteorology and Hydrology. 2019, 44: 223–230.
14. Semenov V.A., Mokhov I.I., Latif M. Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in Eurasia in recent decades. Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2012, 48: 355–372.
15. Mokhov I.I., Timazhev A.V. Atmospheric blocking and changes in its frequency in the 21st century simulated with the ensemble of climate models. Russian Meteorology and Hydrology. 2019, 44: 369–377.
16. Akperov M.G., Mokhov I.I., Dembitskaya M.A., Parfenova M. R. Lapse rate peculiarities in the Arctic from reanalysis data and model simulations. Russian Meteorology and Hydrology. 2019, 44: 97–102.
17. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I.I., Semenov V.A. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades. Environ. Res. Lett. 2019, 14: 045001. doi:10.1088/1748-9326/aafb82.
18. Intensivnye atmosferynye vikhri i ih dinamika. Intense atmospheric vortices and their dynamics. Eds. I.I. Mokhov, M.V. Kurgan, O. G. Chkhetiani. Moscow: GEOS, 2018: 482 p. [In Russian].
19. Akperov M.G., Dembitskaya M.A., Mokhov I.I. Cyclone activity in the Arctic from reanalyses data and regional climate model simulations. *Izvestiya RAN, seriya geograficheskaya*. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2017, 6: 39–46. [In Russian].

20. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Matthes H., Semenov V.A., Adakudlu M., Cassano J., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Glisan J., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Parfenova M., Scinocca J.F., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Trends of intense cyclone activity in the Arctic from reanalyses data and regional climate models (Arctic-CORDEX). IOP Publ.: Earth Environ. Sci. 2019, 231: 012003. doi:10.1088/1755-1315/231/1/012003.
21. Akperov M., Rinke A., Mokhov I., Matthes H., Semenov V. and the Arctic Cordex Team. Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX). J. Geophys. Res. Atmos. 2018, 123 (5): 2537–2554.
22. Akperov M., Rinke A., Mokhov I.I., Semenov V.A., Parfenova M.R., Matthes H., Adakudlu M., Boberg F., Christensen J.H., Dembitskaya M.A., Dethloff K., Fettweis X., Gutjahr O., Heinemann G., Koenigk T., Koldunov N.V., Laprise R., Mottram R., Nikiéma O., Dmitry Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Future projections of cyclone activity in the Arctic for the 21st century from regional climate models (Arctic-CORDEX). Glob. Planet. Change. 2019, 182: 103005.
23. Zahn M., Akperov M., Rinke A., Feser F., Mokhov I.I. Trends of cyclone characteristics in the Arctic and their patterns from different re-analysis data. J. Geophys. Res. 2018, 123 (5): 2537–2551.
24. Sitnov S.A., Mokhov I.I. Anomalies in the atmospheric methane content over Northern Eurasia in the summer of 2016. Doklady Earth Sciences. 2018, 480: 637–641.
25. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Likhoshesterova A.A. Exploring large-scale black-carbon air pollution over Northern Eurasia in summer 2016 using MERRA-2 reanalysis data. Atmos. Res. 2020, 235: 104763. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104763.
26. Kosobokova K.N., Hopcroft R.R. Diversity and vertical distribution of mesozooplankton in the Arctic's Canada Basin. Deep Sea Res. Part II. Top Studies in Oceanography. 2010, 57: 96–110.
27. Sazhin A.F., Romanova N.D., Kopylov, A.I., Zobotkina E.A. Bacteria and viruses in Arctic sea ice. Oceanology. 2019, 59: 339–346. doi: 10.1134/S0001437019030196
28. Choquet M., Hatlebakk M., Dhanasiri A.K.S., Kosobokova K., Smolina I., Sureide J.E., Svensen C., Melle W., Kwasniewski S., Eiane K., Daase M., Tverberg V., Skreslet S., Bucklin A., Hoarau G. Genetics redraws pelagic biogeography of Calanus. Biol. Lett. 2017, 13: 20170588. doi: 10.1098/rsbl.2017.0588
29. Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.C., Pogarsky F.A. Change of sea ice content in the Arctic and the associated climatic effects: detection and simulation. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (2): 53–62. doi: 10.15356/2076-6734-2013-2-53-62. [In Russian].
30. Khon V., Mokhov I.I., Pogarskiy F., Babanin A., Dethloff K., Rinke A., Matthes H. Wave heights in the 21st century Arctic Ocean simulated with a regional climate model. Geophys. Res. Lett. 2014, 41 (8): 2956–2961.
31. Liu Q., Babanin A.V., Zieger S., Young I.R., Guan C. Wind and wave climate in the Arctic Ocean as observed by altimeters. J. Climate. 2016, 29: 7957–7975.
32. Arzhanov M.M., Malakhova V.V., Mokhov I.I. Simulation of the Conditions for the Formation and Dissociation of Methane Hydrate over the Last 130 000 Years. Doklady Earth Sciences. 2018, 480: 826–830. doi: 10.1134/S1028334X18060211.
33. Mokhov I.I., Eliseev A.V., Guryanov V.V. Model estimates of global and regional climate changes in the Holocene. Doklady Earth Sciences. 2020, 490: 23–27. doi: 10.1134/S1028334X20010067.
34. Marcott S.A., Shakun J.D., Clark P.U., Mix A.C. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years. Science. 2013, 339: 1198–1201.
35. Kattsov V.M., Pavlova T.V. Expected Arctic surface air temperature changes through the 21st century: projections with ensembles of global climate models (cmip5 and cmip3). *Trudy GGO*. Proceed. Voeikov Main Geophysical Observatory. 2015, 579: 7–21. [In Russian].