

# Морские, речные и озёрные льды

УДК 551.515.6

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-417>

## Влияние океанического притока тепла в Баренцево море на региональные изменения ледовитости и статической устойчивости атмосферы

© 2019 г. М.Г. Акперов<sup>1\*</sup>, В.А. Семенов<sup>1,2</sup>, И.И. Мохов<sup>1,3</sup>, М.Р. Парфенова<sup>1</sup>,  
М.А. Дембицкая<sup>1</sup>, Д.Д. Бокучава<sup>1,2</sup>, А. Ринке<sup>4</sup>, В. Дорн<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия; <sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия;

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

<sup>4</sup>Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Потсдам, Германия

\*aseid@ifaran.ru

## The influence of ocean heat transport in the Barents Sea on the regional sea ice and the atmospheric static stability

M.G. Akperov<sup>1\*</sup>, V.A. Semenov<sup>1,2</sup>, I.I. Mokhov<sup>1,3</sup>, M.R. Parfenova<sup>1</sup>,  
M.A. Dembitskaya<sup>1</sup>, D.D. Bokuchava<sup>1,2</sup>, A. Rinke<sup>4</sup>, W. Dorn<sup>4</sup>

<sup>1</sup>A.M. Obukhov Institute of Atmosphere Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

<sup>2</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; <sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

<sup>4</sup>Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

\*aseid@ifaran.ru

Received December 22, 2018 / Revised June 20, 2019 / Accepted September 19, 2019

**Keywords:** *the atmosphere, the Barents Sea, climate, climate model, cyclones, ocean water inflow, polar lows, sea ice.*

### Summary

The influence of the oceanic heat inflow into the Barents Sea on the sea ice concentration and atmospheric characteristics, including the atmospheric static stability during winter months, is investigated on the basis of the results of ensemble simulations with the regional climate model HIRHAM/NAOSIM for the Arctic. The static stability of the atmosphere is the important indicator of the spatial and temporal variability of polar mesocyclones in the Arctic region. The results of the HIRHAM/NAOSIM regional climate model ensemble simulations (RCM) for the period from 1979 to 2016 were used for the analysis. The initial and lateral boundary conditions for RCM in the atmosphere were set in accordance with the ERA-Interim reanalysis data. An analysis of 10 ensemble simulations with identical boundary conditions and the same radiation forcing for the Arctic was performed. Various realizations of ensemble simulations with RCM were obtained by changing the initial conditions for integrating the oceanic block of the model. Different realizations of ensemble simulations with RCM are obtained by changing the initial conditions of the model oceanic block integration. The composites method was used for the analysis, i.e. the difference between the mean values for years with the maximum and minimum inflow of oceanic water into the Barents Sea. The statistical significance of the results (at a significance level of  $p < 0.05$ ) was estimated using Student's *t*-test. In general, the regional climate model reproduces the seasonal changes in the inflow of the oceanic water and heat into the Barents Sea reasonably well. There is a strong relationship between the changes in the oceanic water and ocean heat inflow, sea ice concentration, and surface air temperature in the Barents Sea. Herewith, the increase in the oceanic water inflow into the Barents Sea in winter leads to a decrease in static stability, which contributes to changes in regional cyclonic activity. The decrease of the static stability is most pronounced in the southern part of the Barents Sea and also to the west of Svalbard.

**Citation:** Akperov M.G., Semenov V.A., Mokhov I.I., Parfenova M.R., Dembitskaya M.A., Bokuchava D.D., Rinke A., Dorn W. The influence of ocean heat transport in the Barents Sea on the regional sea ice and the atmospheric static stability. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (4): 529–538. [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-438>.

Поступила 22 декабря 2018 г. / После доработки 20 июня 2019 г. / Принята к печати 19 сентября 2019 г.

**Ключевые слова:** *Баренцево море, изменения климата, морской лёд, полярные мезоциклоны, приток океанических вод, региональная модель климата, циклоны.*

На основе результатов ансамблевых расчётов с использованием региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики исследовано влияние притока океанических вод в Баренцево море на концентрацию морских льдов и характеристики атмосферы в зимние месяцы. Показана определяющая роль вариаций притока океанических вод в Баренцево море на режим морских льдов и приповерхностной температуры воздуха, а также статическую устойчивость атмосферы в зимний период.

## Введение

В последние десятилетия наиболее сильный рост приповерхностной температуры воздуха отмечен во внетропических широтах Северного полушария с максимальным потеплением в Арктических регионах (так называемое «арктическое усиление»), превышающим среднеглобальные изменения более чем в 2 раза [1]. Повышение приповерхностной температуры воздуха сопровождается значительным уменьшением площади морских льдов и изменением режимов атмосферной циркуляции в высоких и средних широтах Северного полушария [1–3]. При потеплении существенно изменяется вертикальная температурная стратификация атмосферы, характеризующая статическую устойчивость и конвективную неустойчивость тропосферы [4, 5]. С изменениями вертикальной температурной структуры атмосферы связаны, в частности, изменения конвективных процессов в атмосфере, режимов облачности и вихре-волновой активности [6–8]. Согласно работе [9], роль обратной связи в арктических широтах в разы (до 4 раз) больше по сравнению с Северным полушарием в целом и намного больше, чем для тропических широт.

Приток тёплой атлантической воды не даёт водам юго-западной части Баренцева моря замёрзнуть и увеличивает турбулентный теплообмен между поверхностью океана и атмосферой [2, 10]. В исследованиях [11–13] отмечается определяющая роль притока океанических вод в Баренцево море в изменении площади льда, приповерхностной температуры воздуха и давления в данном регионе в холодный период года. Изменения площади морских льдов зимой в Баренцевом море, связанные с вариациями притока океанических вод, могут вызывать существенные аномалии региональной атмосферной циркуляции [14]. С повышением интенсивности Атлантической термохалинной циркуляции связаны усиление Исландского центра действия в атмосфере, смещение траекторий, а также интенсификация циклонов в атмосфере Северной Атлантики [15]. При увеличении притока океанических вод нагрев нижней атмосферы способствует локальному уменьшению приповерхностного атмосферного давления и усилению западных ветров. Это может повысить приток

тёплых океанических вод в Баренцево море, формируя положительную обратную связь [12].

Атмосферный перенос тепла в Арктику через  $70^\circ$  с.ш. [16] составляет около 1000–1700 ТВт (тераватты). Согласно [17], его расход в акватории Баренцева моря – около 5% (60–80 ТВт) его общего количества. Перенос океанического тепла в Баренцево море оценивается приблизительно в 70 ТВт [17]. При этом, в соответствии с данными работы [18], около 60% изменчивости площади морского льда и 80% изменчивости приповерхностной температуры воздуха в Баренцевом море зимой связано с притоком тёплых океанических вод. Значимая роль притока тёплых океанических вод в изменчивости приповерхностной температуры воздуха, площади морских льдов и региональной циркуляции в Баренцевом море отмечается во многих работах [2, 11, 18–21].

Важная особенность атмосферной циркуляции в высоких широтах, в частности над Баренцевым морем, – полярные мезоциклоны [22]. От синоптических циклонов они отличаются коротким временем жизни (порядка суток) и сравнительно небольшими размерами (диаметр колеблется от 100 до 500 км). Неблагоприятные и экстремальные погодные-климатические условия, связанные с интенсивными циклонами, могут наносить существенный ущерб инфраструктуре, судоходству и природным экосистемам Арктического региона. Полярные мезоциклоны не всегда можно обнаружить на основе данных реанализа и модельных расчётов относительно невысокого пространственного разрешения. Отметим и ограниченный набор эмпирических данных для характеристик мезоциклонов [23, 24]. При этом использование характеристик статической устойчивости атмосферы может послужить важным индикатором пространственно-временной изменчивости полярных мезоциклонов в Арктическом регионе [25]. Как показано в работе [26], снижение концентрации морских льдов в Арктике в зимний период способствует региональным изменениям статической устойчивости атмосферы, что может влиять на условия возникновения и развития полярных мезоциклонов [5, 25].

Оценки влияния притока океанических вод на характеристики климата в Арктике на основе эмпирических данных, к сожалению, ограничены периодом с конца 1970-х годов, что затрудняет

выявление статистически значимых связей. Более полный набор данных с хорошим пространственным и временным разрешением можно получить по расчётам с помощью климатических моделей, в частности, с применением региональных моделей для Арктики при условии их способности адекватно воспроизводить современное состояние климата Арктики и его изменения.

В настоящей работе исследуется связь между изменениями притока океанических вод в Баренцево море, площади морских льдов, приповерхностной температуры воздуха и статической устойчивости атмосферы (как индикатора региональной циклонической активности) на основе результатов ансамблевых расчётов с помощью региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики.

### Используемые данные и методы анализа

Анализ выполнен на основе результатов ансамблевых расчётов с региональной климатической моделью (PKM) HIRHAM/NAOSIM для периода с 1979 по 2016 г. Начальные и граничные атмосферные условия для рассматриваемого в модели региона задавались по данным реанализа ERA-Interim. Анализировалось десять ансамблевых расчётов с идентичными условиями на границах модельной области и с одинаковым радиационным воздействием. Различные реализации ансамблевых расчётов получены изменением начальных условий интегрирования океанического блока модели. Более детальное описание модели и численных расчётов приведено в работе [27].

На южной границе расчётного домена в Северной Атлантике учитывается перенос энергии и массы с внешней областью. В ячейках с направленным внутрь потоком этих переменных используется релаксация температуры и солёности к климатологии [28, 29] с экспоненциальным временным масштабом 30 суток. В ячейках с направленным наружу потоком рассчитываются вынос указанных переменных и излучение волн [30]. В модельных ячейках, соответствующих устьям рек, задаётся соответствующее распреснение верхнего трёхметрового слоя океана.

Модель HIRHAM/NAOSIM состоит из двух основных блоков: атмосферной региональной климатической модели HIRHAM5 и модели океа-

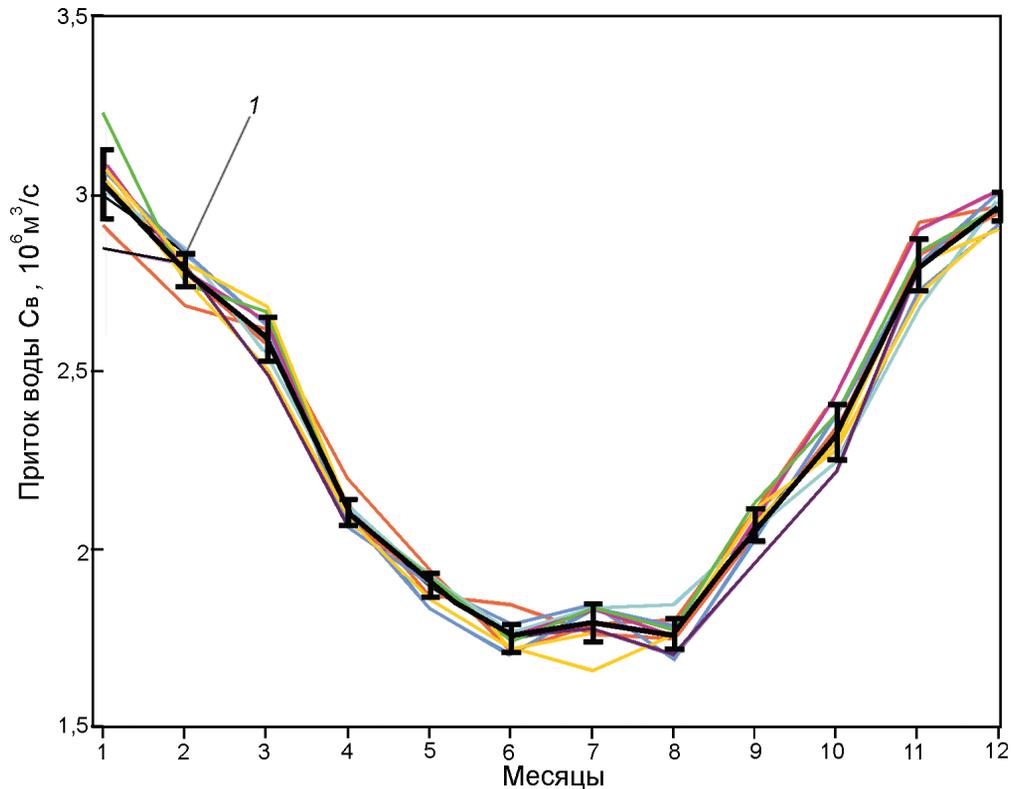
на и морского льда NAOSIM [27]. Атмосферная модель имеет 40 уровней по вертикали (до 10 гПа) и пространственное разрешение 25 км; океаническая модель – 50 уровней по вертикали и пространственное разрешение 9 км. Модель HIRHAM/NAOSIM достаточно адекватно описывает основные физические процессы в климатической системе Арктики, в том числе циклоническую и ветро-волновую активность [31–33].

Приток океанических вод (в свердрупах,  $1 \text{ Св} = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и тепла (в тераваттах,  $1 \text{ ТВт} = 10^{12} \text{ Вт}$ ) в Баренцево море определялся с применением среднемесячных данных для зональной скорости морских течений и температуры в океаническом слое 5–337 м для зимы (декабрь–январь–февраль) на разрезе вдоль меридиана  $20^\circ$  в.д. от Норвегии до Шпицбергена ( $69,5$ – $79,5^\circ$  в.д.). Для анализа использовали также среднемесячные данные для характеристики морских льдов, в частности концентрации, и приповерхностной температуры воздуха в Баренцевом море ( $65$ – $85^\circ$  с.ш.,  $30$ – $60^\circ$  в.д.). При оценке статической устойчивости атмосферы использовали среднемесячные данные для температуры поверхности океана и температуры на уровне 500 гПа (T500) в средней тропосфере для зимы. Статическая устойчивость атмосферы характеризовалась температурной разницей между этими показателями [34].

Отклик характеристик атмосферы и океана на изменения притока океанических вод в Баренцево море исследовался со сдвигом в один месяц (январь–декабрь–март), т.е. приток океанических вод в декабре–феврале, а изменения характеристик атмосферы и океана – в январе–феврале [21]. Анализ проводился для композитов – разности между средними величинами для 37 лет с максимальным и минимальным притоком океанических вод в Баренцево море. Статистическая значимость результатов (с вероятностью ошибки не более 5%) оценивалась с помощью теста Стьюдента.

### Результаты

На рис. 1 приведены: годовой ход притока океанических вод в Баренцево море по десяти модельным расчётам, средний по ансамблю приток, а также среднеквадратическое откло-



**Рис. 1.** Годовой ход притока океанических вод (Св) в Баренцево море по результатам ансамблевых модельных расчётов и среднее по ансамблю со среднеквадратичными отклонениями (*I*)

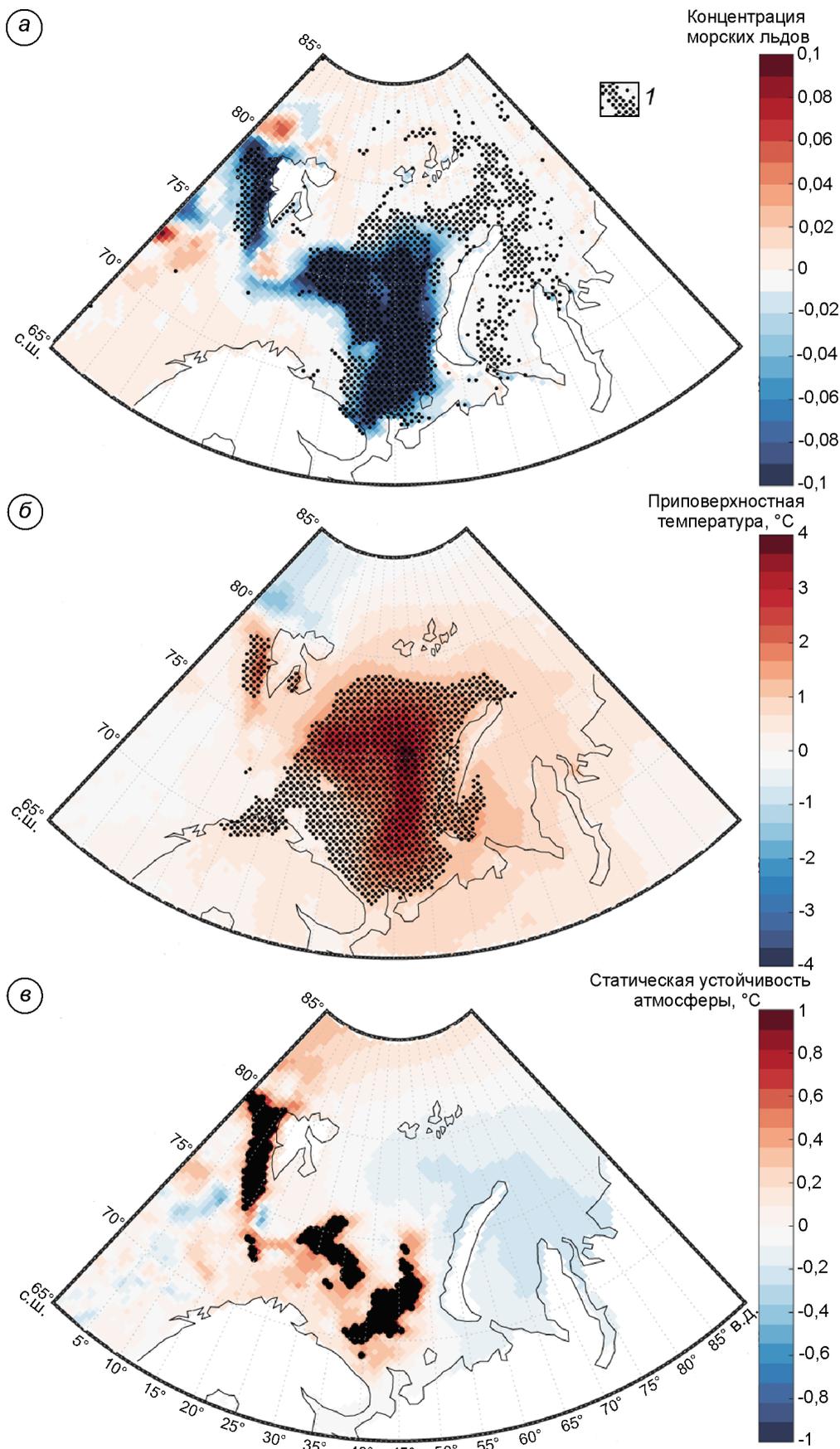
**Fig. 1.** The annual cycle of the oceanic water inflow (Cv) to the Barents Sea according to the results of the model ensemble calculations and the average over the ensemble with standard deviations (*I*)

нение (СКО) индивидуальных реализаций ансамбля. Региональная модель достаточно хорошо воспроизводит сезонные изменения притока океанической воды в Баренцево море (приток объёма воды через меридиан  $20^\circ$  в.д.). Максимум притока приходится на январь и в среднем для ансамбля составляет  $3,1$  Св, а минимум — на июнь —  $1,7$  Св. СКО среднего по ансамблю притока за анализируемый период для января и июня равна  $0,8$  и  $0,3$  Св соответственно. В среднем за год величина притока составляет около  $2,3 \pm 0,3$  Св, что совпадает с диапазоном эмпирических оценок в исследованиях [17, 35, 36]. Среднегодовой ход притока океанического тепла достаточно хорошо коррелирует с притоком воды в Баренцево море. Приток океанического тепла в январе —  $74,5 \pm 19$  ТВт, в июле —  $42,7 \pm 11$ ; средняя за год величина —  $57,2 \pm 7,9$  ТВт. При сопоставлении с данными работы [17] региональная модель недооценивает приток тепла в Баренцево море примерно на 20%. В работе [35] приток тепла оценён в

55 ТВт, что примерно соответствует величине, полученной в настоящей работе.

Отметим, что приток океанических вод тесно связан с изменением площади морских льдов в Баренцевом море и в Арктике в целом [2, 11, 36]. Приток относительно тёплой атлантической воды в арктический бассейн вызывает изменения режима морских льдов. Межгодовая изменчивость притока океанических вод в модели сильно коррелирует с изменениями притока океанического тепла (коэффициент корреляции  $R = 0,9$ ), а также с концентрацией морских льдов ( $R = -0,8$ ) и увеличением приповерхностной температуры воздуха ( $R = 0,5$ ) в Баренцевом море. Это показывает важную роль притока атлантических вод в вариациях концентрации морского льда и, как следствие, приповерхностной температуры воздуха в модели в зимний период.

Для оценки вклада притока океанических вод в Баренцево море в изменения статической устойчивости атмосферы выбраны случаи, когда приток океанических вод выше (максимальный при-



**Рис. 2.** Разница между значениями концентрации морских льдов (а), приповерхностной температуры воздуха (б) и статической устойчивости атмосферы (в), осреднёнными за 37 лет с сильным и за 37 лет со слабым притоком океанических вод в Баренцево море.

*I* – области со статистически значимыми изменениями (с вероятностью ошибки не более 5%)

**Fig. 2.** Differences between values for sea ice concentrations (а), surface air temperature (б) and static atmospheric stability (в) for 37 years with a strong and 37 years with weak inflow of oceanic water into the Barents Sea.

*I* – areas with statistically significant changes (at the level of 5%)

ток) или ниже (минимальный приток) одного стандартного отклонения от среднего по ансамблю притока воды. Для разности соответствующих композитов построены среднемесячные поля характеристик льда, приповерхностной температуры воздуха и статической устойчивости атмосферы на период 1979–2016 гг. Согласно рис. 2, концентрация морских льдов на большей части акватории Баренцева моря уменьшается примерно на 10% (см. рис. 2, а), что способствует радиационному выхолаживанию и увеличению турбулентного обмена теплом между океаном и атмосферой. При этом изменение приповерхностной температуры воздуха над большей частью акватории Баренцева моря составляет около 2 К (см. рис. 2, б).

В целом над Баренцевым морем статическая устойчивость атмосферы уменьшается, что может способствовать мезомасштабному циклогенезу (см. рис. 2, в). Сильнее всего (около 1 К) это выражено в южной части акватории Баренцева моря, а также к западу от Шпицбергена. Результаты модельных расчётов показали важную роль вариаций притока океанических вод в Баренцево море в формировании региональной изменчивости режима морских льдов, приповерхностной температуры воздуха и статической устойчивости атмосферы в зимний период.

### Заключение

Исследовано влияние притока океанических вод в Баренцево море на характеристики атмосферы и океана, а также на статическую устойчивость атмосферы на основе результатов ансамблевых расчётов с использованием региональной климатической модели HIRHAM/NAOSIM для Арктики. Региональная климатическая модель достаточно хорошо воспроизводит сезонные изменения притока океанических вод и тепла в Баренцево море. Отмечена сильная связь между изменениями притока океанических вод и океанического тепла, концентраций морских льдов и приповерхностной температу-

ры воздуха в Баренцевом море. Увеличение притока океанических вод в Баренцево море зимой ведёт к уменьшению статической устойчивости, что может способствовать увеличению региональной мезоциклонической активности [34]. Данные ансамблевых расчётов с региональной климатической моделью показывают определяющую роль вариаций притока океанических вод в Баренцево море в формировании изменчивости режима морских льдов и приповерхностной температуры воздуха. Кроме того, они влияют на статическую устойчивость атмосферы в зимний период, представляя собой важный индикатор пространственно-временной изменчивости поллярных мезоциклонов в Арктическом регионе.

Вариации притока океанических вод в Баренцево море могут также влиять на бароклинную неустойчивость атмосферы и соответственно на циклоническую активность. В работе [39] отмечена значимая связь между изменениями режима морского льда и циклонической активности в атмосфере над Баренцевым морем в холодный сезон. Полученные результаты согласуются с выводами, полученными при исследовании влияния изменения площади морских льдов в Баренцевом море на циркуляцию атмосферы в высоких широтах Северного полушария [26, 37, 38]. В исследовании [39] показано, что уменьшение площади морских льдов в Арктике способствует снижению статической устойчивости атмосферы [26], создавая условия для циклогенеза и развития активности арктических мезоциклонов [34].

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Международного проекта Horizon 2020 при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект 14.616.21.0082 (RFMEFI61617X0082)).

**Acknowledgments.** The work was performed under the international project Horizon 2020 with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (project 14.616.21.0082 (RFMEFI61617X0082)).

### Литература

1. Мохов И.И. Современные изменения климата Арктики // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 5–6. С. 478–484.

### References

1. Mokhov I.I. Modern climate change in the Arctic. *Vestnik RAN. Bulletin of the Russian Academy of Sciences.* 2015, 85 (5–6): 478–484. [In Russian].

2. *Arthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B.* Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents sea ice variability and retreat // *Journ. of Climate*. 2012. V. 25. P. 4736–4743. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
3. *Алексеев Г.В., Кузмина С.И., Глок Н.И., Вязилова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В.* Влияние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // *Лёд и Снег*. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-3-381-390>.
4. *Мохов И.И.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по эмпирическим данным // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1983. Т. 19. № 9. С. 913–919.
5. *Мохов И.И., Акперов М.Г.* Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42. № 4. С. 467–475.
6. *Мохов И.И., Мохов О.И., Петухов В.К., Хайруллин Р.Р.* Влияние глобальных климатических изменений на вихревую активность в атмосфере // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. № 1. С. 11–26.
7. *Мохов И.И., Чернокульский А.В., Акперов М.Г., Дюфрен Ж.-Л., Трет Э. Ле.* Изменения характеристик циклонической активности и облачности в атмосфере внетропических широт северного полушария по модельным расчетам в сопоставлении с данными реанализа и спутниковыми данными // *ДАН*. 2009. Т. 424. № 3. С. 393–397.
8. *Акперов М.Г., Мохов И.И.* Оценки чувствительности циклонической активности в тропосфере внетропических широт к изменению температурного режима // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 2. С. 129. doi: 7868/S000235151302003X.
9. *Mokhov I.I., Akperov M.G., Dembitskaya M.A.* Lapse-rate feedback assessment from reanalysis data // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. Ed. E. Astakhova. 2016. WCRP Report № 15. P. 2.07–2.08.
10. *Onarheim I.H., Eldevik T., Arthun M., Ingvaldsen R.B., Smedstrud L.H.* Skillful prediction of Barents Sea ice cover // *Geophys. Research Letters*. 2015. V. 42. № 13. P. 5364–5371. doi: 10.1002/2015GL064359.
11. *Семенов В.А.* Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // *ДАН*. 2008. Т. 418. № 1. С. 106–109. doi: 10.1007/s11471-008-1020-0.
12. *Semenov V.A., Park W., Latif M.* Barents Sea inflow shutdown: A new mechanism for rapid climate
2. *Arthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B.* Quantifying the influence of Atlantic heat on Barents sea ice variability and retreat. *Journ. of Climate*. 2012, 25: 4736–4743. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00466.1.
3. *Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V.* Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (3): 381–390. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-381-390. [In Russian].
4. *Mokhov I.I.* Tropospheric lapse rate and its relation to surface temperature according to empirical data. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 1983, 19 (9): 913–919. [In Russian].
5. *Mokhov I.I., Akperov M. G.* Tropospheric lapse rate and its relation to surface temperature from reanalysis data. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2006, 42 (4): 430–438. <https://doi.org/10.1134/S0001433806040037>.
6. *Mokhov I.I., Mokhov O.I., Petukhov V.K., Khairullin R.R.* The impact of global climate change on the vortex activity in the atmosphere. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 1992, 28 (1): 11–26. [In Russian].
7. *Mokhov I.I., Chernokulsky A.V., Akperov M.G., Dyufren J.-L., Tret E. Le.* Changes in the characteristics of cyclonic activity and cloudiness in the atmosphere of extratropical latitudes of the northern hemisphere according to model calculations in comparison with reanalysis data and satellite data. *Doklady Akademii Nauk. Reports of the Academy of Sciences*. 2009, 424 (3): 393–397. [In Russian].
8. *Akperov M. G., Mokhov I.I.* Estimates of the sensitivity of cyclonic activity in the troposphere of extratropical latitudes to changes in the temperature regime. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013, 49 (2): 113–120. doi: 10.1134/S0001433813020035. [In Russian].
9. *Mokhov I.I., Akperov M.G., Dembitskaya M.A.* Lapse-rate feedback assessment from reanalysis data. *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. Ed. E. Astakhova. 2016, WCRP Report № 15: 2.07–2.08.
10. *Onarheim I.H., Eldevik T., Arthun M., Ingvaldsen R.B., Smedstrud L.H.* Skillful prediction of Barents Sea ice cover. *Geophys. Research Letters*. 2015, 42 (13): 5364–5371. doi: 10.1002/2015GL064359/
11. *Semenov V.A.* Influence of oceanic inflow to the Barents Sea on climate variability in the Arctic region. *Doklady Akademii nauk. Doklady Earth Sciences*. 2008, 418 (1): 91–94. doi: 10.1007/s11471-008-1020-0.
12. *Semenov V.A., Park W., Latif M.* Barents Sea inflow shutdown: A new mechanism for rapid climate

- changes // *Geophys. Research Letters*. 2009. V. 36. № 14. P. L14709. doi: 10.1029/2009GL038911.
13. *Schlichtholz P.* Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas // *Geophys. Research Letters*. 2011. V. 38. № 5. P. L05705. doi: 10.1029/2010GL045894.
  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., Семенов В.А., Хон В.Ч., Латиф М., Рокнер Э. Связь аномалий климата Евразии и Северной Атлантики с естественными вариациями Атлантической термохалинной циркуляции по долгопериодным модельным расчетам // *ДАН*. 2008. Т. 419. № 5. С. 687–690.
  16. *Trenberth K.E., Stepaniak D.P.* The flow of energy through the Earth's climate system // *Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society*. 2004. V. 130. P. 2677–2701. doi: 10.1256/qj.04.83.
  17. *Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Ottera O.H., Sando A.B., Semenov V.A., Sorokina S., Risebrobakken B.B.* The role of the Barents sea in the arctic climate system // *Reviews of Geophysics*. 2013. V. 51. № 3. P. 415–449. doi: 10.1002/rog.20017.1.
  18. *Schlichtholz P.* Observational evidence for oceanic forcing of atmospheric variability in the Nordic seas area // *Journ. of Climate*. 2013. V. 26. № 9. P. 2957–2975. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00594.1.
  19. *Schlichtholz P.* Local wintertime tropospheric response to oceanic heat anomalies in the Nordic Seas area // *Journ. of Climate*. 2014. V. 27. № 23. P. 8686–8706. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00763.1.
  20. *Koenigk T., Brodeau L.* Ocean heat transport into the Arctic in the twentieth and twenty-first century in EC-Earth // *Climate Dynamics*. 2014. V. 42. № 11–12. P. 3101–3120. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1821-x>.
  21. *Lien V.S., Schlichtholz P., Skagseth Ø., Vikebø F.B.* Wind-driven Atlantic water flow as a direct mode for reduced Barents Sea ice cover // *Journ. of Climate*. 2017. V. 30. № 2. P. 803–812.
  22. Мохов И.И., Акперов М.Г., Лагун В.Е., Луценко Э.И. Интенсивные арктические мезоциклоны // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 3. С. 291–297.
  23. *Condron A., Bigg G.R., Renfrew I.A.* Polar mesoscale cyclones in the Northeast Atlantic: Comparing climatologies from ERA and satellite imagery *Mon. Monthly weather review*. 2006. V. 134. № 5. P. 1518–1533. doi: org/10.1175/MWR3136.1.
  24. Акперов М.Г., Мохов И.И., Дембицкая М.А. Арктические мезоциклоны по спутниковым данным, changes. *Geophys. Research Letters*. 2009, 36 (14): L14709. doi: 10.1029/2009GL038911.
  13. *Schlichtholz P.* Influence of oceanic heat variability on sea ice anomalies in the Nordic Seas. *Geophys. Research Letters*. 2011, 38 (5): L05705. doi: 10.1029/2010GL045894.
  14. *Semenov V.A., Mokhov I.I., Latif M.* The influence of ocean surface temperature and sea-ice boundaries on the change of regional climate in Eurasia over the past decades. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012, 48 (4): 403–421.
  15. *Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch., Latif M., Roekner E.* Communication of climate anomalies of Eurasia and North Atlantic with natural variations of the Atlantic thermohaline circulation by long-period model calculations. *Doklady Akademii nauk*. *Doklady Earth Sciences*. 2008, 419 (5): 687–690. [In Russian].
  16. *Trenberth K.E., Stepaniak D.P.* The flow of energy through the Earth's climate system. *Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society*. 2004, 130: 2677–2701. doi: 10.1256/qj.04.83.
  17. *Smedsrud L.H., Esau I., Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Ottera O.H., Sando A.B., Semenov V.A., Sorokina S., Risebrobakken B.B.* The role of the Barents sea in the arctic climate system. *Reviews of Geophysics*. 2013, 51 (3): 415–449. doi: 10.1002/rog.20017.1.
  18. *Schlichtholz P.* Observational evidence for oceanic forcing of atmospheric variability in the Nordic seas area. *Journ. of Climate*. 2013, 26 (9): 2957–2975. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00594.1.
  19. *Schlichtholz P.* Local wintertime tropospheric response to oceanic heat anomalies in the Nordic Seas area. *Journ. of Climate*. 2014, 27 (23): 8686–8706. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00763.1.
  20. *Koenigk T., Brodeau L.* Ocean heat transport into the Arctic in the twentieth and twenty-first century in EC-Earth. *Climate Dynamics*. 2014, 42 (11–12): 3101–3120. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1821-x>.
  21. *Lien V.S., Schlichtholz P., Skagseth Ø., Vikebø F.B.* Wind-driven Atlantic water flow as a direct mode for reduced Barents Sea ice cover. *Journ. of Climate*. 2017, 30 (2): 803–812.
  22. *Mokhov I.I., Akperov M.G., Lagun V.E., Lutsenko E.I.* Intense arctic mesocyclones. *Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana*. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2007, 43 (3): 259–265. doi: 10.1134/S0001433807030012.
  23. *Condron A., Bigg G.R., Renfrew I.A.* Polar mesoscale cyclones in the Northeast Atlantic: Comparing climatologies from ERA and satellite imagery *Mon. Monthly weather review*. 2006, 134 (5): 1518–1533. doi: org/10.1175/MWR3136.1.

- данным реанализа и модельным расчетам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 297–304. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-297-304.
25. Zahn M., Von Storch H. Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming // *Nature*. 2010. V. 467. № 7313. P. 309. doi: 10.1038/nature09388.
  26. Jaiser R., Dethloff K., Handorf D., Rinke A., Cohen J. Impact of sea ice cover changes on the northern hemisphere atmospheric winter circulation // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2012. V. 64. № 1. P. 11 595. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.11595.
  27. Dorn W., Rinke A., Köberle C., Dethloff K., Gerdes R. HIRHAM–NAOSIM 2.0: The upgraded version of the coupled regional atmosphere-ocean-sea ice model for Arctic climate studies // *Geosci. Model Dev. Discuss.* 2018. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-278>. In review.
  28. Levitus S., Boyer T. World Ocean Atlas // NOAA Atlas NESDIS 4, U.S. Gov. Printing Office, Washington, DC, USA. 1994. V. 4. Temperature. 117 p.
  29. Levitus S., Burgett R., Boyer T. World Ocean Atlas // NOAA Atlas NESDIS 3, U.S. Gov. Printing Office, 25 Washington, DC, USA. 1994. V. 3. Salinity. P. 99.
  30. Fieg K., Gerdes R., Fahrbach E., Beszczynska-Möller A., Schauer U. Simulation of oceanic volume transports through Fram Strait 1995–2005 // *Ocean Dynamics*. 2010. V. 60. № 3. P. 491–502. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0263-9>, 2010.
  31. Khon V.C., Mokhov I.I., Pogarsky F.A., Babanin A., Dethloff K., Rinke A., Matthes H. Wave heights in the 21st century arctic ocean simulated with a regional climate model // *Geophys. Research Letters*. 2014. V. 41. P. 2956–2961. doi: [org/10.1002/2014GL059847](https://doi.org/10.1002/2014GL059847).
  32. Akperov M., Mokhov I., Rinke A., Dethloff K., Matthes H. Cyclones and their possible changes in the Arctic by the end of the twenty first century from regional climate model simulations // *Theoretical and Applied Climatology*. 2015. V. 122. № 1–2. P. 85–96. doi: [org/10.1007/s00704-014-1272-2](https://doi.org/10.1007/s00704-014-1272-2).
  33. Akperov M., Rinke A., Mokhov I., Matthes H., Semenov V., 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., Nikiema O., Scinocca J.F., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX) // *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres*. 2018. V. 123. № 5. P. 2537–2554. <https://doi.org/10.1002/2017JD027703>.
  34. Zahn M., Von Storch H. A long-term climatology of North Atlantic polar lows // *Geophys. Res.*
  24. Akperov M.G., Mokhov I.I., Dembitskaya M.A. Arctic mesocyclones from satellite data, reanalyses data and model simulations. Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2017, 14 (3): 297–304. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-297-304.
  25. Zahn M., Von Storch H. Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming. *Nature*. 2010, 467 (7313): 309. doi: 10.1038/nature09388.
  26. Jaiser R., Dethloff K., Handorf D., Rinke A., Cohen J. Impact of sea ice cover changes on the northern hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2012, 64 (1): 11 595. doi: 10.3402/tellusa.v64i0.11595.
  27. Dorn W., Rinke A., Köberle C., Dethloff K., Gerdes R. HIRHAM–NAOSIM 2.0: The upgraded version of the coupled regional atmosphere-ocean-sea ice model for Arctic climate studies. *Geosci. Model Dev. Discuss.* 2018. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-278>. In review.
  28. Levitus S., Boyer T. World Ocean Atlas. National Environmental Satellite, Data, and Information Service, Washington, DC, USA. 1994, 4 (Temperature): 117 p.
  29. Levitus S., Burgett R., Boyer T. National Environmental Satellite, Data, and Information Service, Washington, DC, USA. 1994, 3 (Salinity): 99 p.
  30. Fieg K., Gerdes R., Fahrbach E., Beszczynska-Möller A., Schauer U. Simulation of oceanic volume transports through Fram Strait 1995–2005. *Ocean Dynamics*. 2010, 60 (3): 491–502. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0263-9>, 2010.
  31. Khon V.C., Mokhov I.I., Pogarsky F.A., Babanin A., Dethloff K., Rinke A., Matthes H. Wave heights in the 21st century arctic ocean simulated with a regional climate model. *Geophys. Research Letters*. 2014, 41: 2956–2961. doi: [org/10.1002/2014GL059847](https://doi.org/10.1002/2014GL059847).
  32. Akperov M., Mokhov I., Rinke A., Dethloff K., Matthes H. Cyclones and their possible changes in the Arctic by the end of the twenty first century from regional climate model simulations. *Theoretical and Applied Climatology*. 2015, 122 (1–2): 85–96. doi: [org/10.1007/s00704-014-1272-2](https://doi.org/10.1007/s00704-014-1272-2).
  33. Akperov M., Rinke A., Mokhov I., Matthes H., Semenov V., 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., Nikiema O., Scinocca J.F., Sein D., Sobolowski S., Winger K., Zhang W. Cyclone activity in the Arctic from an ensemble of regional climate models (Arctic CORDEX). *Journ. of Geophys. Research: Atmospheres*. 2018, 123 (5): 2537–2554. <https://doi.org/10.1002/2017JD027703>.
  34. Zahn M., Von Storch H. A long-term climatology of North Atlantic polar lows. *Geophys. Research Letters*. 2008, 35 (22): 1–6. doi: 10.1029/2008GL035769

- search Letters. 2008. V. 35. № 22. P. 1–6. doi: 10.1029/2008GL035769.
35. *Tsubouchi T., Bacon S., Aksenov Y., Naveira Garabato A.C., Beszczynska-Möller A., Hansen E., L. de Steur, Curry B., Lee C.M.* The Arctic Ocean Seasonal Cycles of Heat and Freshwater Fluxes: Observation-Based Inverse Estimates // *Journ. of Physical Oceanography*. 2018. V. 48. № 9. P. 2029–2055. doi: 10.1175/JPO-D-17-0239.1.
36. *Long Z., Perrie W.* Changes in ocean temperature in the Barents Sea in the twenty-first century // *Journ. of Climate*. 2017. V. 30. № 15. P. 5901–5921. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0415.1.
37. *Semenov V.A., Latif M.* Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // *Environmental Research Letters*. 2015. V. 10. № 5. P. 054020.
38. *Koyama T., Stroeve J., Cassano J., Crawford A.* Sea ice loss and Arctic cyclone activity from 1979 to 2014 // *Journ. of Climate*. 2017. V. 30. № 12. P. 4735–4754. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0542.1.
39. *Inoue J., Hori M.E., Takaya K.* The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly // *Journ. of Climate*. 2012. V. 25. № 7. P. 2561–2568. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00449.1.
35. *Tsubouchi T., Bacon S., Aksenov Y., Naveira Garabato A.C., Beszczynska-Möller A., Hansen E., L. de Steur, Curry B., Lee C.M.* The Arctic Ocean Seasonal Cycles of Heat and Freshwater Fluxes: Observation-Based Inverse Estimates. *Journ. of Physical Oceanography*. 2018, 48 (9): 2029–2055. doi: 10.1175/JPO-D-17-0239.1.
36. *Long Z., Perrie W.* Changes in ocean temperature in the Barents Sea in the twenty-first century. *Journ. of Climate*. 2017, 30 (15): 5901–5921. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0415.1.
37. *Semenov V.A., Latif M.* Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012. *Environmental Research Letters*. 2015, 10 (5): 054020.
38. *Koyama T., Stroeve J., Cassano J., Crawford A.* Sea ice loss and Arctic cyclone activity from 1979 to 2014. *Journ. of Climate*. 2017, 30 (12): 4735–4754. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0542.1.
39. *Inoue J., Hori M.E., Takaya K.* The Role of Barents Sea Ice in the Wintertime Cyclone Track and Emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly. *Journ. of Climate*. 2012, 25 (7): 2561–2568. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00449.1.