

## **ВЛИЯНИЕ СОКРАЩЕНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА В АРКТИКЕ НА СТРУКТУРУ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ**

*Вячеслав Сергеевич Градов*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, инженер, тел. (383)330-64-60, e-mail: gradov.v.s@gmail.com

*Ирина Владимировна Боровко*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)330-61-51, e-mail: irina@ommfaol.sccc.ru

*Владимир Николаевич Крупчатников*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (913)921-54-99, e-mail: vkрупчатников@yandex.ru

В данной работе исследуется влияние таяния морского льда под воздействием механизма уменьшения альбедо сухого и мокрого льда и снега на структуру циркуляции атмосферы. В частности, оценивается влияние на шторм-треки в Тихом и Атлантическом океанах. Экстремальные погодные явления, как правило, связаны с условиями атмосферного блокирования. Блокированием называются такие метеорологические условия, при которых в течение нескольких дней над территорией наблюдается крупный антициклонический атмосферный вихрь. Для оценки количества блокирований используются критерий блокирования Молтени-Тибальди и величина локальной антициклонической волновой активности (ЛАВА). Экстремальные значения ЛАВА могут указывать на наличие атмосферных блокирований. Как результат происходит ослабление и смещение на восток траекторий Атлантических штормов. Влияния на Тихоокеанские шторм-треки почти не наблюдается.

**Ключевые слова:** волновая активность, блокирование, циркуляция атмосферы, таяние морского льда, шторм-трек, численное моделирование

## **IMPACT OF ARCTIC SEA ICE REDUCTION ON ATMOSPHERIC CIRCULATION PATTERNS**

*Viacheslav S. Gradov*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Engineer, phone: (383)330-64-60, e-mail: gradov.v.s@gmail.com

*Irina V. Borovko*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-61-51, e-mail: irina@ommfaol.sccc.ru

*Vladimir N. Krupchatnikov*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (913)921-54-99, e-mail: vkрупчатников@yandex.ru

This paper focuses on the effect of sea ice melting under the effect of the mechanism of decreasing albedo of dry and wet ice and snow on the structure of atmospheric circulation. In particular, the Impact on storm tracks in the Pacific and Atlantic Oceans is analyzed. Extreme weather events are usually associated with atmospheric blocking conditions. Blocking is such meteorological conditions in which a large anticyclonic atmospheric vortex is observed over an area for several days. The Molteni-Tibaldi blocking criterion and the magnitude of the local anticyclonic wave activity (LAWA) are used to estimate the number of blockings. Extreme values of LAWA may indicate the presence of atmospheric blockings. As a result, there is a weakening and eastward shift of Atlantic storm trajectories. There is almost no influence on the Pacific storm tracks.

**Keywords:** wave activity, blocking, atmospheric circulation, sea ice melting, storm tracks, numerical modeling

### *Введение*

Широко известной характеристикой современных климатических изменений является быстрое изменение климата Арктики, которое, в частности, проявляется в уменьшении площади морского льда в Северном Ледовитом океане. Морской лед является очень важной компонентой глобальной климатической системы, так как он взаимодействует с различными динамическими процессами, связанными с изменениями в атмосферной и океанической циркуляции [1-3].

Сокращение морского льда может оказывать влияние на циркуляцию атмосферы Северного полушария. Аномалии нагрева Арктики из-за низкой концентрации льда в конце лета (август / сентябрь) вызывают изменения в бароклинических системах осенью из-за более раннего наступления бароклинической неустойчивости, которая влияет на структуру крупномасштабных планетарных волн следующей зимой [4]. От сплоченности морского льда в августе / сентябре также зависит высота геопотенциала тропосферы и стратосферы следующей зимой. Во время фаз низкой сплоченности льда обнаруживается ослабление стратосферного полярного вихря и повышение температуры в стратосфере, что в свою очередь связано с сильными стратосферными аномалиями в атлантическом и европейском регионах [5].

Сокращение морского льда влияет, в частности, на планетарное альbedo. Альbedo поверхности морского льда и снега значительно выше альbedo поверхности открытого океана, поэтому таяние морского льда влечет за собой увеличение площади поверхности открытого океана и, как следствие, уменьшение планетарного альbedo [6].

Таяние льда может происходить под воздействием различных механизмов. В данной работе мы искусственно понижаем альbedo сухого и мокрого льда и снега. Одной из причин может являться усиление меридиональной составляющей циркуляции атмосферы. Это влечет более интенсивное перемешивание воздушных масс и проникновение большего количества примесей в Арктику. Значительную часть таких примесей, составляет сажа, близкая по оптическим характеристикам к абсолютно черному телу [7]. Поэтому лед и снег будет поглощать больше солнечной радиации и активнее таять. В связи с этим, в данной работе

будет исследоваться изменчивость циркуляции атмосферы при уменьшении количества морского льда в Арктике за счет уменьшения альbedo льда и снега.

### *Методы и материалы*

Для проведения экспериментов использовалась совместная модель климатической системы INMCM48, разработанная в ИВМ РАН [8]. Данная модель способна воспроизводить динамику атмосферы, океана, морского льда, растительности и почв с учетом уровня парниковых газов.

Океанический блок данной модели имеет разрешение  $1^\circ \times 0.5^\circ$  по долготе и широте и 40 уровней по вертикали. Разрешение атмосферного блока  $2^\circ \times 1.5^\circ$  и 21 уровень по вертикали.

Было проведено два численных эксперимента: базовый и с уменьшением альbedo. Расчет производился по следующему принципу. Сначала модель рассчитывалась до выхода на стационарный режим (60 лет). После рассчитывались 40 лет обоих экспериментов. Во втором эксперименте были понижены параметры альbedo сухого и мокрого льда и снега, относительно базового. Значения параметров были изменены с 0.8 до 0.7 для льда и с 0.6 до 0.5 для снега.

Для анализа частоты блокирований использовались ежедневные данные высоты геопотенциала  $Z_{500}$ . Для некоторой точки  $(\lambda_0, \phi_0)$  согласно [9] определяются следующие индексы:

$$GHGS(\lambda_0, \phi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \phi_0) - Z_{500}(\lambda_0, \phi_S)}{\phi_0 - \phi_S},$$

$$GHGN(\lambda_0, \phi_0) = \frac{Z_{500}(\lambda_0, \phi_N) - Z_{500}(\lambda_0, \phi_0)}{\phi_N - \phi_0},$$

где  $\phi_S = \phi_0 - 15^\circ$ ,  $\phi_N = \phi_0 + 15^\circ$ .

В нашем случае блокированием будет считаться ситуация, когда условия  $GHGS(\lambda_0, \phi_0) > 0$  и  $GHGN(\lambda_0, \phi_0) < -5 \frac{\text{м}}{\text{гр.ш.}}$  выполняются в течение пяти суток (критерий блокирования Молтени-Тибальди).

Анализ так же включает в себя исследование волновой активности для  $Z_{500}$ . Здесь мы будем пользоваться понятием локальной волновой активности. В работе [10] локальная волновая активность вводилась для величины потенциального вихря PV, но вместо PV можно использовать любую другую монотонную относительно изменения широты величину  $q$ , например  $Z_{500}$ . В [11] были введены понятия циклонической и антициклонической волновой активности  $A_S$  и  $A_N$ , которые для момента времени  $t$  определяются следующим образом:

$$A_S(\lambda, \phi_e, t) = \frac{a}{\cos(\phi_e)} \int_{\substack{\tilde{q} \leq 0, \phi \leq \phi_e(Q), \\ \lambda = \text{const}}} \tilde{q} \cos(\phi) d\phi,$$

$$A_N(\lambda, \phi_e, t) = \frac{a}{\cos(\phi_e)} \int_{\substack{\tilde{q} \geq 0, \phi \geq \phi_e(Q), \\ \lambda = \text{const}}} \tilde{q} \cos(\phi) d\phi,$$

где  $Q$  – некоторый контур высоты геопотенциала  $Z_{500}$ ,  $\tilde{q} = q - Q$ ,  $a$  – радиус Земли и  $\phi_e$  – эквивалентная широта, которая определяется так, чтобы площади областей, по которым берутся интегралы, совпадали.

Антициклоническая волновая активность  $A_N(\lambda, \phi_e, t)$  характерна тем, что ее экстремальные значения могут являться показателями атмосферных блокировок, и как следствие экстремальных погодных явлений [11].

### Результаты и обсуждения

На рис. 1 показано, как меняется площадь поверхности морского льда в Арктике и его объем в эксперименте с измененным альбедо и базовым.

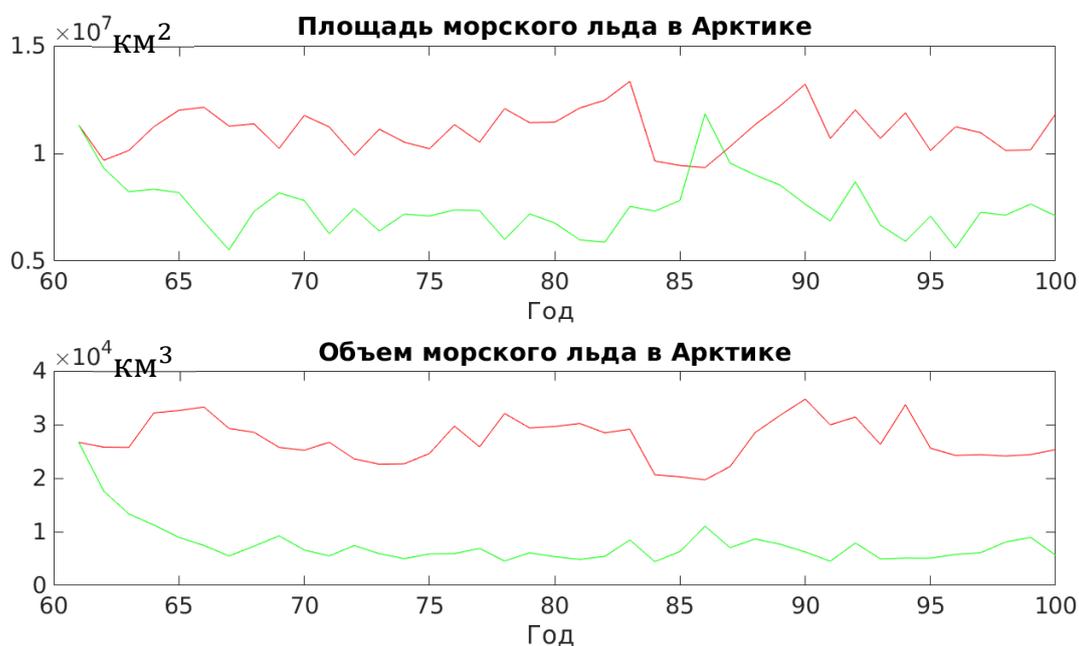


Рис. 1. Изменение площади и объема морского льда за 40 лет:

базовый эксперимент обозначен красной линией, эксперимент с уменьшенным альбедо зеленой

Из рисунка отчетливо видно, что как площадь, так и объем морского льда заметно уменьшается в эксперименте с уменьшенным альбедо и весь рассматриваемый период держится на более низком уровне относительно базового.

На рис. 2, 3 показано изменение температуры и высоты геопотенциала между двумя экспериментами. Осредненная высота геопотенциала увеличилась всюду в арктических широтах (выше 75° N) и почти всюду в субарктических широтах (60° N – 75° N), за исключением сервера Евразии.

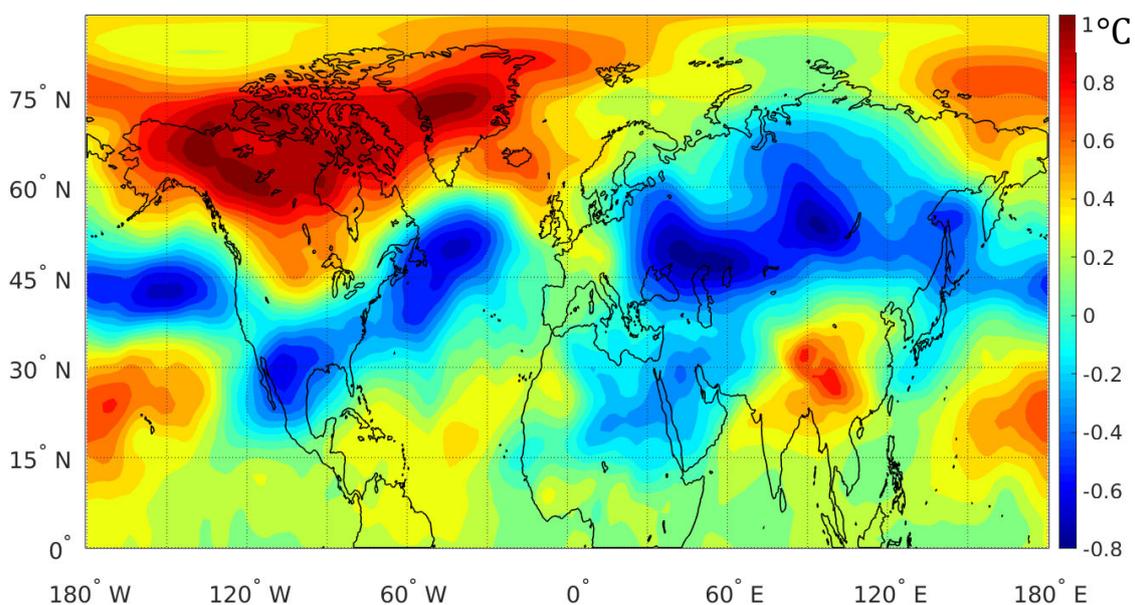


Рис. 2. Изменение температуры (°C) (разность между средними значениями за последние десять лет в базовом эксперименте и в эксперименте с уменьшенным альбедо)

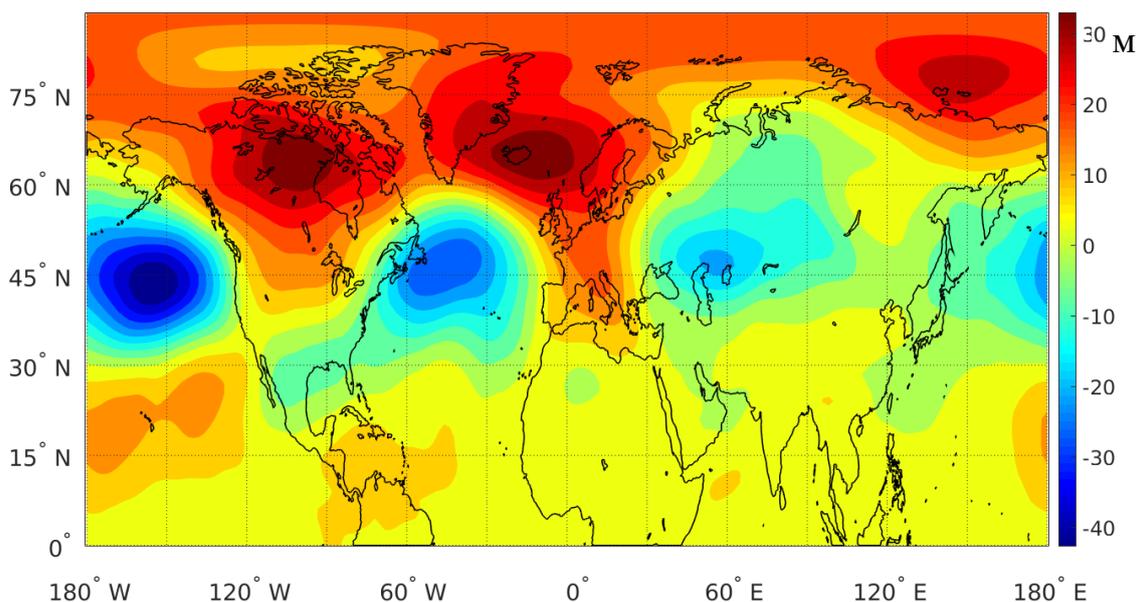


Рис. 3. Изменение высоты геопотенциала (м) (разность между средними значениями за последние десять лет в базовом эксперименте и в эксперименте с уменьшенным альбедо)

Наибольшее увеличение высоты геопотенциала наблюдается в субполярных широтах, а в средних широтах наблюдается наибольшее уменьшение. Возможно, это связано с тем, что в субполярных широтах в результате уменьшения градиента высоты геопотенциала усилился меридиональный поток тепла, что соответствует данным на рис. 2.

На рис. 4 показано количество блокирований в течение первых десяти лет в базовом эксперименте и в течение последних десяти лет в эксперименте с изменением альбедо в период с декабря по февраль. Так как последние 40 лет базового эксперимента рассчитываются после выхода модели на стационарный режим, то можно рассматривать осреднение высоты геопотенциала  $Z_{500}$  по первым десяти годам. В зимних данных выделяются несколько областей с блокировани-ями – это субполярные широты и области шторм-треков над Тихим и Атланти-ческим океанами.

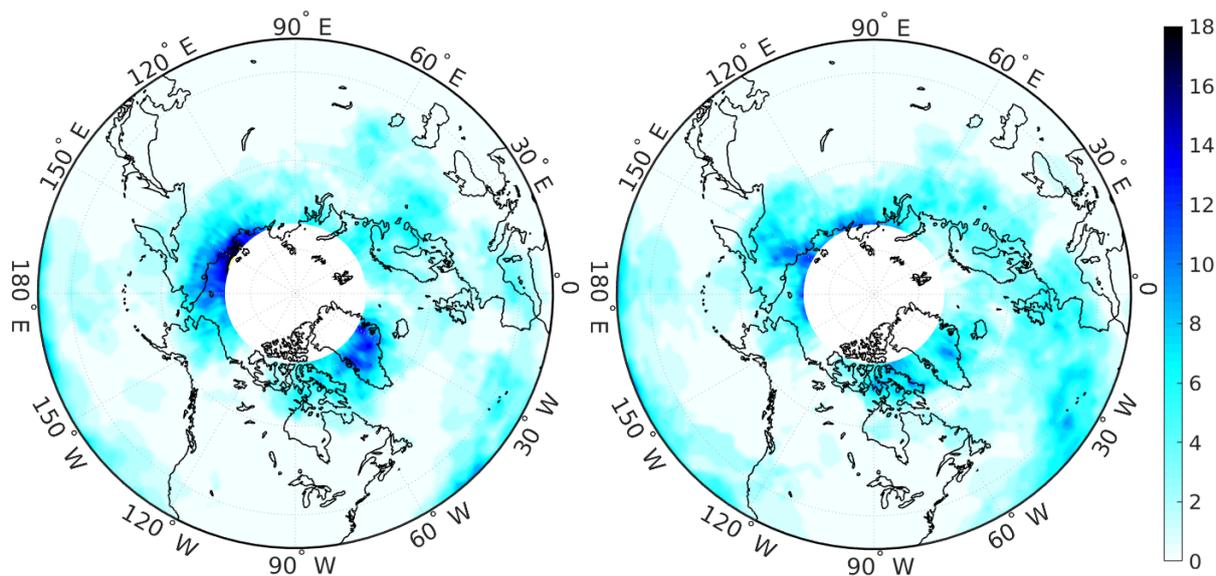


Рис. 4. Число блокирований за период с декабря по февраль: слева – базовый эксперимент, первые 10 лет; справа – эксперимент с изменением альбедо, последние 10 лет

В эксперименте с уменьшением альбедо происходит увеличение числа блокирований в субполярных широтах. Вероятной причиной этого увеличения является усиление волновой активности в результате уменьшения градиента  $Z_{500}$ . Обратная картина наблюдается в субтропических широтах: градиент  $Z_{500}$  увеличивается, а количество блокирований уменьшается.

На рис. 5 изображена антициклональная локальная волновая активность в те же периоды, что и количество блокирований. На обоих изображениях заметна повышенная волновая активность в районе шторм-треков над Тихим и Атлантическим океанами, что соответствует картине блокирований. Так же из рис. 5 видно смещение волновой активности в восточном направлении, что может говорить о смещении траекторий штормов на восток. Сравнивая с данными о количестве блокирований, можно заметить, что в эксперименте с уменьшением альбедо, снижение волновой активности в Атлантическом океане, соответствует уменьшению числа блокирований.

Область траекторий штормов над Тихим океаном, практически не меняется: количество блокирований и величина волновой активности остаются примерно

на том же уровне. Дополнительно стоит отметить, что на обоих рисунках заметен пик волновой активности в западной Европе, что соответствует данным реанализа, которые показывают преобладание антициклонической циркуляции в этом регионе [12].

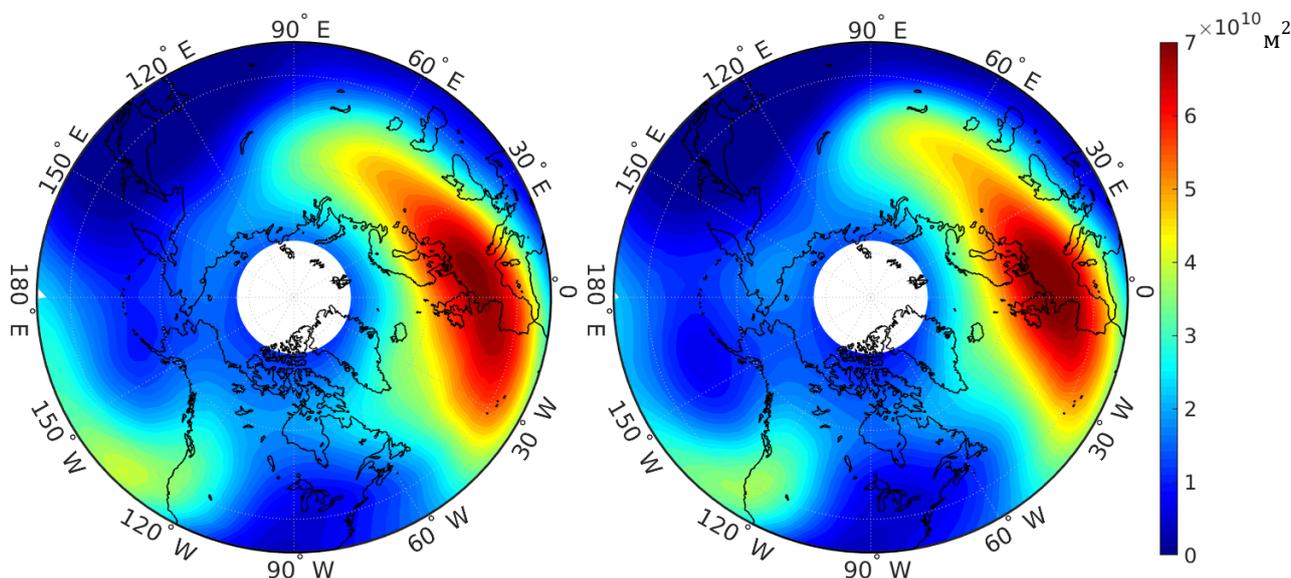


Рис. 5. Антициклональная волновая активность  $A_N$  с декабря по февраль: слева – базовые эксперимент, первые 10 лет; справа – эксперимент с изменением альbedo, последние 10 лет

### Заключение

По результатам модельных экспериментов получено, что таяние льда в Арктике за 40-летний период влечет за собой повышение температуры в субарктических широтах и понижение температуры в средних широтах.

Как следствие, в местах повышения температуры высота геопотенциала  $Z_{500}$  увеличивается, в местах понижения — уменьшается. Увеличение  $Z_{500}$  в субарктических широтах может влиять на характер атмосферной циркуляции на юге, например, на шторм-треки. Влияние на траектории шторм-треков исследовалось двумя способами: с помощью индекса блокирования Молтени-Тибальди и анализа локальной антициклонической волновой активности. В результате получено, что при изменении альbedo происходит ослабление и смещение на восток траекторий Атлантических шторм-треков. Сильного влияния на Тихоокеанские шторм-треки не наблюдается.

Так же анализ волновой активности показывает устойчивость антициклона над западной Европой в обоих экспериментах, что характерно для данного региона.

*Исследование проводится при поддержке гранта Российского Научного Фонда, проект № 19-17-00154.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Overland J., Dethloff K., Francis J. et al. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic // *Nature Clim Change*. – 2016. – V. 6. – P. 992–999. doi.org/10.1038/nclimate3121.
2. Francis J. A., Vavrus S. J., Cohen J. Amplified Arctic warming and mid-latitude weather: new perspectives on emerging connections // *WIREs Clim Change*. – 2017. – V. 8. – e474. doi.org/10.1002/wcc.474.
3. Serreze M. C., Barrett A. P., Stroeve J. C., Kindig D. N., and Holland M. M. The emergence of surface-based Arctic amplification // *The Cryosphere*. – 2009. – V. 3. – P. 11–19. doi.org/10.5194/tc-3-11-2009.
4. 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. doi.org/10.3402/tellusa.v64i0.11595.
5. Jaiser R., Dethloff K., Handorf D. Stratospheric response to Arctic sea ice retreat and associated planetary wave propagation changes. // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. – 2013. – V. 65. – 1. doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.19375.
6. Winton, M. Sea Ice–Albedo Feedback and Nonlinear Arctic Climate Change. // *Arctic Sea Ice Decline: Observations, Projections, Mechanisms, and Implications* (eds E.T. DeWeaver, C.M. Bitz and L.-B. Tremblay). – 2008. – V. 180. – P. 111-132. https://doi.org/10.1029/180GM09.
7. Hansen J., Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos // *PNAS*. – 2004. – V. 101. – 2. – P. 423-428. doi.org/10.1073/pnas.2237157100.
8. Volodin E., Mortikov E., Kostykin S., Galin V., Lykossov V., Gritsun A., Diansky N., Gusev A., Iakovlev N., Shestakova A., Emelina S. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. – 2018. – V. 33. – P. 367-374. doi.org/10.1515/rnam-2018-0032.
9. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // *Tellus*. – 1990. – 42A. P. 343–365. doi.org/10.1034/j.1600-0870.1990.t01-2-00003.x.
10. Huang C. S. Y., Nakamura N. Local finite-amplitude wave activity as a diagnostic of anomalous weather events // *J. Atmos. Sci.* – 2015. – V. 73. – 1. – P. 211-229. doi.org/10.1175/JAS-D-15-0194.1.
11. Chen G., Lu J., Burrows D. A., Leung L. R. Local finite-amplitude wave activity as an objective diagnostic of midlatitude extreme weather // *Geophys. Res. Lett.* – 2015. – V. 42. – P. 10952–10960, doi:10.1002/2015GL066959.
12. Paolo Davini, *Atmospheric Blocking and Winter Mid-Latitude Climate Variability* // *Università Ca' Foscari*. – 2013. – PhD thesis.

© В. С. Градов, И. В. Боровко, В. Н. Крупчатников, 2021