

## **ВЛИЯНИЕ СОКРАЩЕНИЯ ПЛОЩАДИ АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ЛЬДОВ НА АТМОСФЕРНУЮ ЦИРКУЛЯЦИЮ ВО ВНЕТРОПИЧЕСКИХ ШИРОТАХ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ**

Семенов В.А., e-mail: vasemenov@mail.ru

Институт географии РАН, Россия, 119017 Москва, Старомонетный пер., 29  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, 119017 Москва, Пыжевский пер., 3

## **IMPACT OF ARCTIC SEA ICE AREA REDUCTION ON ATMOSPHERIC CIRCULATION IN EXTRATROPICS OF THE NORTHERN HEMISPHERE**

Semenov V.A., e-mail: vasemenov@mail.ru

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 119017 Moscow, Staromonetnyi per., 29  
A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, 119017 Moscow,  
Pyzhevsky per., 29

Key words: Arctic sea ice, anomalous weather regimes, climate model, global warming

### Abstract

The last decades are characterized by significant Arctic sea ice area reduction and rapid warming in the Arctic that exceeds the warming in middle and low latitudes in the Northern Hemisphere. Anomalous regional warming and decrease of inter-zonal temperature gradients lead to considerable changes of atmospheric circulation. Numerical simulations with an atmospheric general circulation model (AGCM) using prescribed sea ice concentration (SIC) data for different periods during the last 50 years revealed that formation of such a blocking anti-cyclone and cooling over Northern Eurasia could be linked to rapid sea ice area decline in the Barents Sea in the last decade. Model results suggest a non-linear atmospheric circulation response to the SIC reduction that has been previously found in the idealized AGCM simulations. The results indicate the important role of the Barents Sea region - a region with the strongest variability of the heat exchange between ocean and atmosphere in winter time - in formation of anomalous weather regimes on the Russian territory.

Прирост глобальной температуры от последнего десятилетия XX века (1991-2000 гг.) к первому десятилетию XXI века был самым сильным за период инструментальных наблюдений (Семенов и др., 2014). В то же время, пространственная структура температурных изменений между этими двумя десятилетиями характеризовалась заметным похолоданием зимой над континентами Северного полушария (СП) [Семенов, 2016]. Важно отметить, что среднее за десятилетие похолодание порядка 1-2 °С связано не с монотонным уменьшением температуры, а с несколькими сильными отрицательными аномалиями. В последние годы с начала XXI века отмечен целый ряд аномально холодных зим в разных частях Евразии, в том числе в российских регионах. Так, для 10-летия 2003-2012 гг. среднезимняя приповерхностная температура в Москве была примерно на 3°С ниже среднеклиматических значений и на 5-7°С ниже, чем для большинства зим предшествующего теплого периода 1988-2002 гг. При этом следует отметить, что до 1980-х гг. сильные отрицательные аномалии среднезимней температуры встречались приблизительно с такой же частотой, как и в последнее десятилетие. Благодаря периоду теплых

зим с 1980-х гг. до начала 2000-х гг. (чему способствовала положительная фаза САК) холодные аномалии в современный период воспринимаются как необычно морозные [Semenov, Latif, 2015].

Формирование аномально холодных зимних режимов над Северной Евразией в последнее десятилетие было связано с характерной структурой атмосферной циркуляции в виде антициклонической аномалии над или южнее Баренцева моря, приводящей к блокированию западного зонального переноса.

Согласно модельным и эмпирическим оценкам, следует ожидать усиления климатических эффектов блокирующих антициклонов (блокингов) при глобальном потеплении [Мохов, Петухов, 1997; Мохов, Тимажев, 2015]. В зимние месяцы подобная тенденция способствует формированию продолжительных морозов на фоне общего потепления. Такие тенденции в целом можно объяснить зависимостью жизни блокингов от температуры и скорости зонального потока [Мохов, Петухов, 1997].

На фоне общих тенденций, связанных с климатическими изменениями в целом, важную роль в формировании региональных аномалий атмосферной циркуляции могут играть изменения площади арктических морских льдов. Похолодание над континентом сопровождалось сильной положительной температурной аномалией над Баренцевым и Карским морями, связанной с сокращением площади морских льдов. С 2005 г. произошло резкое уменьшение площади морских льдов в Баренцевом и западной части Карского моря в зимний период (рис. 1). Можно говорить о переходе в новый режим состояния ледяного покрова в данном регионе. Такие изменения приводят к соответствующему увеличению потоков турбулентного тепла с поверхности моря в атмосферу. Это указывает на возможную связь формирования антициклонической аномалии циркуляции и с аномальными потоками тепла и влаги с поверхности морей, свободных ото льда.

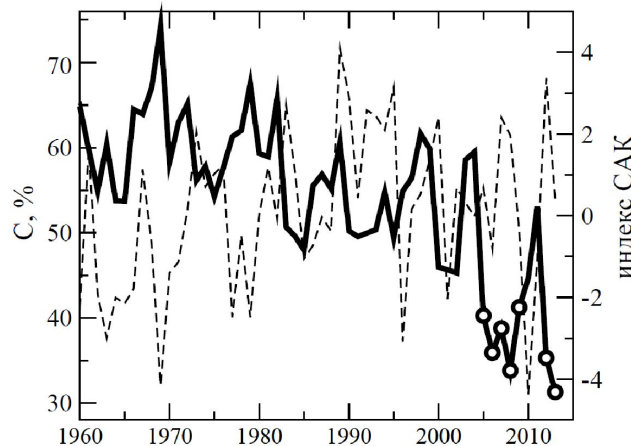


Рис. 1. Концентрация С (в %) морских льдов (КМЛ) зимой в Баренцевом и западной части Карского морей ( $65^{\circ}\text{N}-80^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{E}-80^{\circ}\text{E}$ ) по данным HadISST1 [Rayner et al., 2003] и индекс Северо-атлантического колебания (пунктирная линия). Кружками отмечены годы с аномально низкими значениями КМЛ.

Численные эксперименты с использованием моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) показали, что эффекты регионального похолодания над Северной Евразией можно воспроизвести при уменьшении площади морских льдов в Арктике. Такие эксперименты проводились с использованием композитных аномалий концентрации морских льдов (КМЛ), соответствующих минимумам площади морских льдов в последние десятилетия [Kim et al 2014]. Отмеченные аномалии были воспроизведены и в экспериментах с использованием

реалистичных аномалий КМЛ [Semenov, Latif, 2015] (рис. 2). В этих экспериментах как граничные условия в МОЦА задавались одинаковые среднеклиматические поля температуры поверхности океана и климатологии КМЛ для разных периодов в последние десятилетия, в том числе для периода 2005-2012 гг. Таким образом, систематическая разность воспроизведенных моделью циркуляционных и температурных режимов для различных периодов связана исключительно с изменениями КМЛ. Полученные результаты являются аргументом в поддержку связи участвовавших случаев формирования аномально холодных режимов в Северной Евразии с сокращением площади арктических морских льдов.

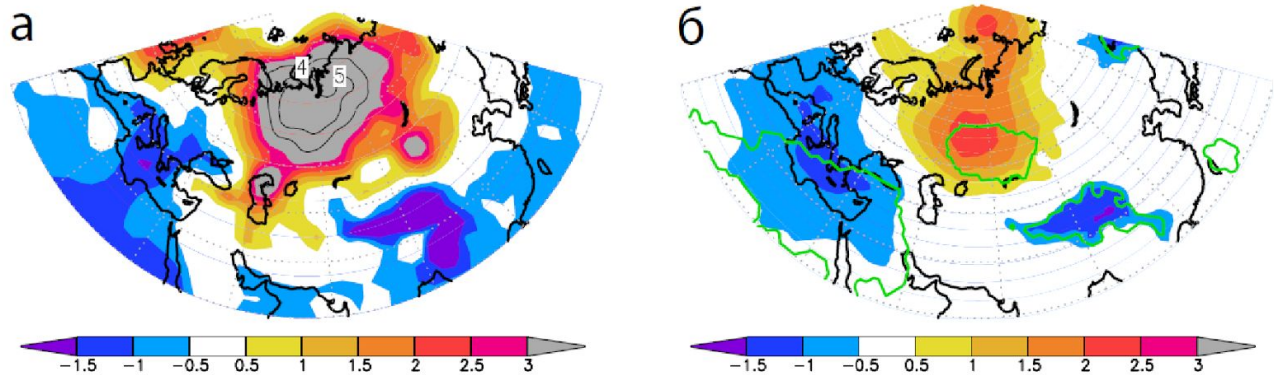


Рис. 2. Аномалии давления на уровне моря (гПа) зимой в 2005-2012 гг. относительно 1971-2000 гг. по данным реанализа (а) и по расчетам с моделью общей циркуляции атмосферы с использованием средних значений концентрации морского льда для этих периодов (б) [Semenov and Latif, 2015]. Зеленые контуры обозначают области, где изменения в модельных экспериментах статистически значимы (95%).

Предложены разные механизмы для объяснения связи региональных холодных режимов с протяженностью морских льдов (см. обзор [Vihma, 2014]). Можно выделить три основных гипотезы. Самая, пожалуй, распространенная объясняет похолодания во второй половине зимы отрицательной аномалией КМЛ в восточной Арктике поздней осенью. При этом считается, что нагрев атмосферы над регионом с аномалией площади морских льдов поздней осенью и в начале зимы приводит к усилению амплитуды стационарных планетарных волн, их проникновению в стратосферу, нагреву и ослаблению Арктического вихря, с последующим распространением сигнала в тропосфере, ослаблению САК и похолоданию над Северной Евразией во второй половине зимы [Kim et al, 2014]. Отметим, что похолодание как отклик на отрицательную аномалию КМЛ воспроизводится и в моделях с низким вертикальным разрешением, не способных адекватно учитывать процессы взаимодействия тропосферы и стратосферы [Petoukhov, Semenov, 2010; Семенов и др., 2012; Semenov and Latif, 2015].

Второй возможный механизм связан с аномальным нагревом атмосферы над регионами с отрицательной аномалией КМЛ, уменьшением градиента толщины геопотенциального слоя 1000 гПа-500 гПа и ослаблением зонального ветра. При этом предполагается, что зональная неоднородность такого нагрева приводит к меридиональному растяжению гребней стационарных планетарных волн, что способствует формированию долгоживущих погодных аномалий [Francis, Vavrus, 2012].

Третий механизм предполагает важную роль региональных эффектов с влиянием конвективных процессов над Баренцевым морем вследствие аномальных потоков явного тепла на формирование циклонической циркуляции над морем. С другой стороны, аномальный нагрев атмосферы способствует формированию аномалий термического ветра и антициклонической

циркуляции. При этом влияние этих двух факторов характеризуется нелинейным откликом циркуляции на изменения КМЛ [Petoukhov, Semenov, 2010; Semenov and Latif, 2015; Семенов, 2016]. Следует отметить, что два последних механизма предполагают практически одновременный отклик на изменения КМЛ, связывая зимнее региональное похолодание с зимними же аномалиями КМЛ.

Нелинейность отклика атмосферной циркуляции на аномалии КМЛ в численных экспериментах с идеализированными [Petoukhov and Semenov 2010] и реалистичными [Semenov and Latif 2015, Семенов 2016] аномалиями КМЛ в регионе Баренцева и Карского морей свидетельствует о важности не только относительной величины аномалий, но и среднего режима ледовитости. С этим можно связать различия результатов модельных экспериментов и неадекватное воспроизведение наблюдаемых аномалий [Байдин Мелешко, 2014]. Возможность отмеченного нелинейного отклика также выявлена для ряда современных моделей, участвующих в международном проекте по сравнению климатических моделей CMIP5 [Yang Christensen 2012].

Также следует отметить влияние уменьшения площади морских льдов в Баренцевом море на Северо-атлантическое колебание, в частности на формирование аномально низких значений индекса САК [Семенов 2016]. В частности, нелинейная обратная связь между САК и КМЛ в Баренцевом море может объяснять нестационарность связи между САК и льдом, а также температурой в Арктике в целом [Семенов, 2008].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00647).

#### Литература

- Байдин А.В., Мелешко В.П. Реакция атмосферы высоких и умеренных широт на сокращение площади морского льда и повышение температуры поверхности океанов // Метеорология и гидрология. 2014. №6. С. 5-18.
- Мохов И.И., Тимажев А.В. Модельные оценки возможных изменений атмосферных блокирований при RCP-сценариях антропогенных воздействий // Доклады АН. 2015. Т. 460. № 2. С. 210-214.
- Мохов И.И., Петухов В.К. Блокинги и тенденции их изменения // Доклады АН. 1997. Т. 337. № 5. С. 687-689.
- Семенов В.А. Влияние океанического притока в Баренцево море на изменчивость климата в Арктике // Доклады РАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 106-109.
- Семенов В.А. Связь аномально холодных зимних режимов на территории России с уменьшением площади морских льдов в Баренцевом море // Изв. РАН Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3.
- 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.
- Francis J.A., Vavrus S.J. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39. L06801. Doi:10.1029/2012GL051000.
- Semenov V.A., Latif M. Nonlinear winter atmospheric circulation response to Arctic sea ice concentration anomalies for different periods during 1966–2012 // Environ. Res. Lett. 2015. Vol. 10. No. 5. P. 054020.
- Kim B.-M., Son S.-W., Min, S.-K., et al. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss // Nature Commun. 2014. Vol. 5. Article no.: 4646. Doi:10.1038/ncomms5646.

Petoukhov V., Semenov V.A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. D21111. doi: 10.1029/2009jd013568.

Vihma T. Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: a review // *Surv. Geophys.* 2014. Vol. 35. P. 1175–214.

Yang S. and Christensen J. H. Arctic sea ice reduction and European cold winters in CMIP5 climate change experiments // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. L20707. Doi:10.1029/2012GL053338.